HAL
open science

Approche cognitive pour l'intégration des outils de la géomatique en sciences de l'environnement: modélisation et évaluation.

Raffaella Balzarini

To cite this version:

Raffaella Balzarini. Approche cognitive pour l'intégration des outils de la géomatique en sciences de l'environnement: modélisation et évaluation.. Ingénierie de l'environnement. Université de Grenoble, 2013. Français. NNT : . tel-00956879

HAL Id: tel-00956879

https://theses.hal.science/tel-00956879

Submitted on 7 Mar 2014

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.

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Ing®nierie de la Cognition, de lôinteraction, de lôApprentissage et de la cr®ation.**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par **Raffaella BALZARINI**

Thèse dirigée par **Muriel NEY**
et codirigée par **Paule-Annick DAVOINE**

Préparée au sein du Laboratoire d'Informatique de Grenoble dans l'École Doctorale Ingénierie de la Santé, la Cognition et l'Environnement

«APPROCHE COGNITIVE POUR L'INTÉGRATION DES OUTILS DE LA GÉOMATIQUE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMMENT : MODÉLISATION ET ÉVALUATION»

Thèse soutenue publiquement le
devant le jury composé de : 27 Novembre 2013

Mme Françoise GOURMELON
Directeur de Recherche CNRS, LTG Géomer Brest, Rapporteur
M Thierry JOLIVEAU
Professeur des Universités, Université Jean Monnet, Saint Etienne, Rapporteur
M Philippe BELLEUDY
Professeur des Universités, Université Joseph Fourier Grenoble, Examinateur
M Laurent POLIDORI
Professeur CNAM, Ecole Supérieure des Géomètres et Topographes, Le Mans, Examinateur
M Eric SANCHEZ
Maitre de Conférence, Institut Français de l'Education-ENS Lyon, Examinateur
M Stanislas PACHULSKI,
Responsable Education et Recherche ESRI France, Lyon, Invité

Université Joseph Fourier / Université Pierre Mendès France / Université Stendhal / Université de Savoie / Grenoble INP

A Maria e Vittorio

RÉSUMÉ

Cette thèse s'est intéressée à l'intégration des Systèmes d'Information Géographique, dans les domaines de la formation en géosciences appliquées et sciences de l'environnement. L'étude de cette intégration et des difficultés qui l'accompagnent, s'est articulée autour de trois dimensions :

1. une dimension cognitive, pour explorer les approches et les méthodes qui permettent d'étudier la façon de raisonner d'utilisateurs expérimentés ou novices, face à la résolution de problèmes spatiaux avec les SIG ;

2. une dimension didactique pour, à partir des différences entre les raisonnements des experts et des novices, identifier et intégrer les démarches expertes utilisables dans les stratégies de résolution des apprenants ;

3. une dimension pédagogique, pour concevoir, en s'appuyant sur les acquis cognitifs et didactiques, des dispositifs de formation innovateurs, en adéquation avec les demandes du monde professionnel.

Afin de limiter notre champ d'étude, il a été nécessaire d'effectuer une analyse des pratiques de cartographie et SIG dans les domaines des Géosciences et de l'Ingénierie de l'Environnement et effecteur des choix pertinentes dans une perspective pédagogique, professionnelle et sociétale. Nous nous sommes intéressés à une activité de cartographie particulière : la cartographie d'aptitude réalisée avec des méthodes d'analyses spatiales multicritères pour la localisation de site(s) apte(s) à répondre à une problématique environnementale. En effet, cette méthode implique, d'un point de vue pédagogique, une approche progressive et complète à l'usage des SIG. Elle a un caractère professionnalisant, car elle est d'usage dans les projets environnementaux et, enfin, elle appuie le débat sur les choix territoriaux qui impliquent des prises de décisions.

C'est lors de la réalisation de cette activité de cartographie d'aptitude que différents types d'utilisateurs ont été observés : des experts et des étudiants issus de notre entourage académique et professionnel. Nous avons élaboré un protocole expérimental exploratoire qui a permis de recueillir des données écrites et orales. Les analyses des données issues de la phase expérimentale ont été guidées par les cadres qui relèvent des sciences cognitives : sur le plan théorique, pour la définition des mécanismes visuo-cognitifs impliqués dans les raisonnements, et sur le plan méthodologique pour l'approche qualitative et quantitative d'analyse de données verbales. En termes de résultats, des composants des processus de

raisonnement qui interviennent dans la réalisation et perception de la carte d'aptitude, ont été identifiés. De plus, les différences d'occurrences d'actions, d'opérations et de concepts mobilisés par les experts et les novices dans le même contexte, ont pu être mesurées. La comparaison des différentes stratégies adoptées par les expertes et par les étudiants a permis ensuite de ré-penser les dispositifs de formation, avec des aides didactiques qui ciblent les lacunes des étudiants.

Le vrai défi de cette thèse a été l'apport pluridisciplinaire à la cartographie et aux SIG dans les Sciences de l'Information Géographique. En apportant des connaissances de la psychologie cognitive, de la didactique des sciences et des sciences de l'éducation, cette thèse a contribué à une meilleure compréhension de certains processus de représentations et d'appropriation des SIG, lors de la production cartographique et de son interprétation. Cette compréhension peut contribuer à améliorer les représentations ou à en proposer de nouvelles, favorisant ainsi la construction de la connaissance spatiale.

ABSTRACT

This thesis concerns the integration of GIS mapping tools and analysis in training curricula of applied geosciences and environmental sciences.

This study focuses on three dimensions:

1. a cognitive dimension, in order to explore the way of thinking of experienced and novice users when solving spatial problems with GIS;

2. an instructional dimension, in order to identify and integrate the expert methods in the resolution strategies of learners;

3. an educational dimension in order to design, based on cognitive achievement, innovative training tools in line with the demands of the working world.

To limit the scope of our study, it was necessary to perform an analysis of the practices of mapping and GIS in the areas of Geosciences and Environmental Engineering. It was also necessary to make relevant choices in a professional, educational and societal perspective.

We were interested in a particular kind of mapping: GIS-bases land-use suitability mapping, with multi criteria spatial analysis methods. Indeed, this method involves, from a pedagogical point of view, a progressive and comprehensive approach to the use of GIS. It has a

professionalizing nature, as it is common practice in environmental projects. Finally, it supports the debate on territorial choices that involve decision making.

Different types of users have been observed: experts and students from our academic and professional environment. We performed an exploratory experimental protocol that allowed collecting written and verbal data. Data analyses were supported by theoretical frameworks that fall within the cognitive sciences, especially on visual-cognitive processes involved in reasoning. In terms of methodology, we used the quantitative-based qualitative approach for verbal data analysis.

Regarding the results, some components of reasoning involved in the production and perception of the suitability map have been identified. Moreover, differences of instances of actions, operations and concepts used by experts and novices could be measured. Comparing the different strategies adopted by the expert and the students enabled us to re-think the training tools, with instructional aids that target gaps in students' abilities.

The real challenge of this thesis was the multidisciplinary contribution to mapping and GIS in Geographic Information Science. Providing knowledge of cognitive psychology and science education, this thesis has contributed to a better understanding of some processes in GIS representation and appropriation. This understanding can improve performances on representations, or propose new ones, thus fostering spatial knowledge.

REMERCIEMENTS

L'aboutissement de cette thèse n'aurait pas été possible sans l'aide et la confiance que certaines personnes m'ont accordée. Je tiens à les remercier pour leur soutien scientifique, matériel et surtout…moral.

Mes premiers remerciements vont à ma Directrice de thèse Muriel Ney (Chargée de recherche CNRS et membre de l'équipe Metah du LIG) et à ma co-directrice Paule-Annick Davoine (MCF à l'Institut polytechnique de Grenoble et membre de l'équipe Steamer du LIG). Elles ont accompagné ce travail de recherche avec des perspectives différentes et complémentaires sans jamais perdre de vue le défi scientifique et personnel que je m'étais donné. Leur encadrement, ouvert mais attentif, m'a permis de me construire en tant que 'jeune' chercheur, même si le qualificatif 'jeune' nous a toujours fait sourire…

Je tiens à remercier Stanislas Pachulski, mon responsable auprès de l'entreprise ESRI France, qui a vu dans ce projet de thèse des éléments précurseurs dans le domaine de l'apprentissage et de l'enseignement de la géomatique , et qui a sans cesse appuyé ma démarche auprès de sa société.

Je remercie vivement les rapporteurs Françoise Gourmelon (DR au CNRS) et Thierry Joliveau (Professeur à l'Université Jean Monet) pour le regard constructif qu'ils ont porté sur mon travail : leurs remarques ont permis d'enrichir ma réflexion et de finaliser le travail de valorisation de cette thèse. Un remerciement particulier à Thierry pour avoir accepté de participer à mon comité de thèse et d'avoir suivi l'avancement de cette recherche.

Je tiens à remercier les membres du jury :

Laurent Polidori (Professeur au CNAM), qui a été à l'origine de cette aventure, et qui a validé notre projet de recherche en tant qu'expert auprès de la Commission CIFRE-ANRT. Je le remercie sincèrement de sa confiance, c'est aussi grâce à lui que cette thèse a vu le jour.

Eric Sanchez (Professeur en Sciences de l'Education à l'Université de Sherbrook), qui a accepté de participer à mon comité de thèse, a cru dans ce projet depuis son esquisse et m'a indiqué les bonnes directions d'avancement.

Philippe Belleudy, (Professeur à l'Université Joseph Fourier), pour son enthousiasme et sa détermination à intégrer notre projet dans ses formations et pour nous avoir permis de l'expérimenter auprès de classes d'étudiants. J'adresse à Philippe ma profonde reconnaissance pour la confiance qu'il m'a accordée, pour les échanges dynamiques et constructifs que nous avons eus et pour ce sentiment de soutien qu'il m'a toujours transmis. Les encouragements et les perspectives donnés de sa part m'ont permis à plusieurs moments de ne pas lâcher prise.

J'exprime ma plus vive gratitude aux deux équipes du Laboratoire d'Informatique de Grenoble (LIG) Steamer et Metah qui m'ont accueillie et fourni le cadre nécessaire à la réalisation de cette thèse. Merci aux responsables respectifs, Jérôme Gensel (Professeur à l'Université Pierre-Mendès-France), et Pierre Tchounikine (Professeur à l'Université Joseph Fourier), de leur patience et compréhension face à mes multiples changements de bureau!

Merci à tous les membres de l'équipe Steamer pour avoir contribué, dans l'enthousiasme et la bonne humeur, à l'amélioration de ma connaissance en modélisation et traitement de l'information géographique. Merci pour

leurs encouragements dans les moments les plus difficiles. Un remerciement particulier à Marlène Villanova-Olivier (MCF à l'Université Pierre-Mendès-France) pour s'être mobilisée afin que je puisse bénéficier d'un après thèse serein.

Merci à tous les membres de l'équipe Metah pour m'avoir instruite sur la didactique des maths, de la biologie et de la chimie, sur la scénarisation, la randonnée, l'escalade et la haute cuisine !Un remerciement tout particulier à Nadine Mandran (Ingénieur méthodes au LIG) pour son aide dans les phases d'analyse et de traitement des données, ainsi que pour son sourire.

Je tiens également à remercier Philippe Dessus (Professeur à l'Université Pierre-Mendès-France) pour ses incontournables conseils en terme de littérature et Erica de Vries (Professeur à Pierre-Mendès-France) pour ses très précieux conseils en méthodologie.

Mes remerciements vont aussi à Sophie Abry et Stéphane Guillet (Coordinateurs de la cellule pédagogique PERFORM à l'INPG), qui ont assuré l'accompagnement et le conseil dans la conception et la mise en œuvre de notre module d'apprentissage par pédagogie active (APP) : leur expérience et leur connaissance des situations d'enseignement ont été un apport déterminant à notre scénarisation.

Je remercie très sincèrement les trois 'experts' qui ont accepté de jouer ce rôle pendant la phase expérimentale, en consacrant du temps, de l'énergie et de la rigueur à mon expérimentation. Sans leur contribution, cette thèse n'aurait pas pu explorer le domaine de l'expertise. Je remercie Alexandra Berger, Guillaume Franck (Ingénieurs chez ESRI France) et Erwan Pathier,(MCF en Géophysique à l'Université Joseph Fourier) pour leur disponibilité et leur sérieux. J'adresse un remerciement particulier à Erwan, avec qui j'ai eu la chance de partager la conception de cours ces trois dernières années : c'est en l'observant faire que j'ai appris et compris beaucoup de choses sur les usages des SIG. Avec sa gentillesse et son esprit scientifique, il m'a aidé à surmonter les obstacles techniques et notionnels rencontrés sur mon chemin. Le nom d'Erwan est, par la force des choses associé à celui de Mai-Lihn Dohan (MCF en Géophysique à l'Université Joseph Fourier). Un grand merci à Mai-Lihn à la fois pour m'avoir permis d'utiliser ses étudiants dans le cadre de mon protocole expérimental et pour m'avoir toujours fait sentir comme une de ses paires.

Je ne peux pas oublier de remercier les étudiants qui ont participé à l'expérimentation. C'est finalement avec eux que ce travail a pris tout son sens et que j'ai vécu les moments les plus intenses et satisfaisants de la thèse.

Si dans la sphère académique toutes les personnes citées ci-dessus ont beaucoup compté pour moi, c'est dans la sphère personnelle que mes remerciements plus profonds s'adressent. Sans certitudes, sans jugements et sans plaintes, ma petite famille a vécu avec moi et souvent à côté de moi, pendant trois ans. Merci à Tim, Joanne et Arto de ne pas m'avoir abandonnée à ma vie de thésarde et de m'avoir rappelé que j'étais une mère et une femme.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT PROPOS 15

1. Les équipes du LIG 16

2. ESRI France 17

INTRODUCTION 19

1. Présentation générale de la recherche 19

2. La problématique et les questions de recherche 20

2.1 Le constat 20

2.2 La problématique 21

3. Les objectifs généraux 23

4. Une démarche pluridisciplinaire 24

4.1 Le rôle de la géomatique 25

4.2 Le rôle de la psychologie cognitive 26

4.3 Le rôle de la didactique 28

4.4 Le rôle des Géosciences 30

5. Un positionnement de recherche 31

5.1 La recherche cognitive dans les Sciences de l'Information Géographique 31

5.2 La recherche en didactique des SIG 34

6. Une démarche méthodologique globale 36

7. La structure de la thèse 39

CHAPITRE I : L'ANALYSE DES BESOINS 43

1. Des référentiels de compétences géomatiques 44

2. L'analyse des métiers 47

2.1. Les fiches-métiers de l'Union Française des Géologues 48

2.1.1 Description des fiches UFG 48

2.1.2 Méthodologie pour le traitement des Fiches UFG 49

2.2. Les profils métiers du Bureau de Recherches Géologiques et Minières 56
2.3. Les offres d'emploi 57
2.4. Bilan sur les profils métiers 62
2.5 Les entretiens avec les professionnels 64
3. L'analyse des rapports de stage des formations professionnalisantes 65
4. La production cartographique en Géosciences 67
5. Conclusions 72
CHAPITRE II : CARTOGRAPHIE DE SUSCEPTIBILITÉ : DES DÉFINITIONS 77
1. Définition de la cartographie de susceptibilité avec des méthodes d'ASMC 77
1.1 L'analyse 'spatiale' et les problèmes 'spatiaux' : généralités 77
1.2 Définition de la méthodologie générale de l'AMC combinée aux concepts de spatialité 79
1.3 Transition lexicale interdisciplinaire 85
1.4 Définition et procédure générale pour la cartographie d'aptitude 86
1.5 Synthèse des approches SIG - AMC selon la littérature 90
1.6 Bilan 92
2. Aspects sémiologiques de la cartographie d'aptitude 92
3. Conclusions 99
CHAPITRE III : LES ANALYSES PRÉLIMINAIRES 103
1. L'approche fonctionnelle : les méthodes ASMC dans les SIG 104
1.1. Les modes d'intégration SIG – AMC 104
1.2 Les fonctionnalités d'ASMC dans ARCGIS V.10 106
1.3 Les fonctionnalités d'ASMC dans IDRISI 109
1.4 Bilan 111
2. L'Approche cognitive : schème d'activité et champs conceptuels 113
2.1 La théorie des « Champs Conceptuels » 113
2.2. Le schème d'activité pour la cartographie d'aptitude 115

2.3 Bilan 120
3. L'approche exploratoire du terrain : l'observation de l'activité des étudiants 120
3.1 Le Pilote 121
3.2 La validation de l'expert 122
3.3 Bilan 123
4. Conclusions 123
CHAPITRE IV : LES CADRES THÉORIQUES ET LES QUESTIONS DE RECHERCHE 125
1. Mécanismes du système visuo-spatial 126
1.1 La perception visuelle 128
1.1.1 Early vision 128
1.1.2 L'attention sélective 130
1.2 Mécanismes visu-cognitifs et cartographie 132
2. Les schémas mentaux 133
2.1 Les schémas en cartographie 134
3. Les modèles mentaux 136
3.1 Les modèles mentaux selon une perspective didactique 137
3.2 L'expertise : une synthèse de schémas et modèles 139
4. Le raisonnement 142
4.1 Concepts spatiaux : définitions 144
4.2 Représentations spatiales : définitions 147
4.3 Raisonnement spatial : définitions 148
4.3.1 Raisonnements et résolutions de problèmes : le cas de la cartographie d'aptitude avec des méthodes d'analyse spatiale multicritères. 151
5. Les questions de recherche 153
6. Synthèse 156
CHAPITRE V : LE PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL 157
1. Introduction au protocole expérimental 157

2. L'expérimentation avec les étudiants 158

2.1 Les participants 158

2.2 La conception de l'Unité d'Enseignement : 'Initiation aux SIG et à l'Analyse Spatiale Multicritère 159

2.2.1 L'approche par la pédagogie active : l'Apprentissage Par Problème 160

2.2.2 Les objectifs d'apprentissage généraux 162

2.2.3 La conception du problème 164

2.2.4 Le 'bon problème' à poser 167

2.2.5 Les ressources 170

2.2.6 L'architecture et l'organisation de l'UE 172

2.2.7 Les livrables et les évaluations 175

2.2.8 Les supports du module 177

2. 3 Etude expérimentale : les dispositifs de recueil des données 178

3. L'expérimentation avec les experts 184

3.1 Les participants 185

3.2 Le problème 186

3.3 Les ressources 186

3.4 Les modalités 187

3.5 Le recueil des données. 187

4. Synthèse 188

CHAPITRE VI : L'ANALYSE DES DONNÉES 191

1. La méthode d'analyse des données verbales 191

1.1 Procédure de la 'verbal data analysis' 195

2. Analyse de données écrites : les questionnaires 198

3. Analyse des données verbales : les enregistrements 201

4. Analyses des productions cartographiques 207

5. Analyses des données croisées. 209

6. Analyses comparées des données 210

7. Bilan 210

CHAPITRE VII : LES RÉSULTATS 213

1. Les résultats des données écrites 213

1.1 Les résultats qualitatifs : les thèmes 213

1.2 Les résultats quantitatifs : les occurrences des types de réponses 218

1.2.1 Analyse des réponses du Questionnaire 1. 218

1.2.2 Analyse des réponses du Questionnaire 2 222

1.2.3 Analyse des réponses du Questionnaire 3 225

1.3 Bilan 230

2. Les résultats des données verbales (orales) 233

2.1. Les résultats qualitatifs 233

2.1.1. Le répertoire d'actions. 234

2.1.2. Les catégories des opérations de contrôle 237

2.1.3. Les catégories des objets conceptuels 241

2.2 Les résultats quantitatifs 247

2.2.1 Analyse de la tâche T0 : standardisation et classement des données. 247

2.2.2 Analyse de la tâche T1 : pondérations et agrégations des données 249

2.2.3 Analyse de la tâche T2 : analyse et choix des cartes des sommes pondérées 251

2.2.4 Analyse de la tâche T3 : préconisation du site - 253

2.3 Bilan 254

3 Évaluation des cartes produites 255

4. Comparaison des résultats 259

5. Conclusions 272

CHAPITRE VIII : DISCUSSION 275

1. Des composants du raisonnement aux schémas cognitifs 276

1.1. Schémas cognitifs relatifs à l'activité des experts 278

1.2. Schémas cognitifs relatifs à l'activité des étudiants 282

1.2.1 Les étudiants ingénieurs 283

1.2.2 Les étudiants géologues 285

2. Des connaissances sur les raisonnements à la proposition des aides didactiques 287

3. Des suggestions pour concevoir des nouveaux dispositifs d'apprentissage (SIG) 290

4. Limites et Conclusion 294

CHAPITRE IX : CONCLUSION 297

1. Des critiques et des nouvelles questions 297

2. Des pistes de recherche 299

BIBLIOGRAPHIE 306

TABLE DES ILLUSTRATIONS 319

LISTE DES TABLEAUX 324

« Chi non risica non rosica »

Proverbio popolare toscano (1600)

AVANT PROPOS

Cette thèse nait d'un projet personnel qui a mûri pendant longtemps et a vu ces prémices il y a cinq ans. Ma formation initiale en Sciences de la Terre à l'Université de Turin avait marqué les années qui ont suivi, non seulement d'un point de vue scolaire, pour les connaissances qu'elle m'a apportées, mais et surtout d'un point de vue professionnel, en alimentant ma passion envers le métier de géologue. Si pour des multiples raisons je n'ai jamais exercé ce métier, d'autres parcours m'ont permis d'évoluer et enrichir mon bagage personnel et professionnel. Notamment, une longue période de ma vie professionnelle a été consacrée à l'enseignement et à l'ingénierie de formation : cette direction a pleinement convenu à mon inclination pour la transmission des savoirs, des savoir-faire et des compétences. Ainsi, l'idée de combiner mes anciennes connaissances en Géosciences et mes nouvelles compétences en Technologie de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement (TICE), est née. Mais où et comment trouver un lien ?

Etant, à l'époque, ingénieur TICE à l'Université Stendhal et travaillant en collaboration avec la Direction des Systèmes d'Information, j'ai eu la possibilité de découvrir les Systèmes d'Information Géographiques, IDRISI en l'occurrence. Tout au long de la familiarisation avec ce logiciel, plusieurs questionnements ont pris forme :

Est-ce que les professionnels des géosciences les utilisent dans leurs pratiques courantes ?

Est-ce que les filières en géosciences de l'enseignement supérieur proposent des formations en SIG ?

Est-ce que les apprentissages sont efficaces et réinvestis dans les métiers ?

Mais surtout, une curiosité fondamentale a alimenté ma réflexion : comment un géologue appréhende les SIG pour la construction des connaissances dans son domaine ?

Ceci découle du fait que ma formation universitaire a eu lieu à une époque où les Systèmes d'Information n'intervenaient pas dans la gestion, le traitement et l'analyse de la donnée géo scientifique. Toutes les cartes (géologiques, structurales..) étaient réalisées à la main avec des calques et des crayons de couleur. Sans nécessairement faire des comparaisons entre époques

différentes, il m'a paru constructif de pouvoir analyser comment les stratégies de résolution de problèmes spatiaux des concepteurs-utilisateurs de cartes s'adaptent aux technologies et méthodologies SIG, et d'autre part comment les institutions intègrent cette adaptation.

Ces perspectives se sont concrétisées dans un premier temps dans le cadre de mon stage de fin d'année (2009-2010) du Master 2 Ingénierie de Développement Territorial, Systèmes d'Information Territoriale (IDT-GéoSIT), de l'Institut de Géographie Alpine de l'Université Joseph Fourrier de Grenoble, intitulé « Proposition d'ingénierie pour l'intégration des pratiques géomatiques dans l'enseignement supérieur ». La mission du stage comportait la mise en œuvre d'une analyse des besoins et d'un parcours pédagogique bâti autour du SIG ArcGIS 9.3. de la société ESRI ; l'objectif principal était d'observer les bénéfices pédagogiques, apportés par l'usage du SIG aux apprenants en Géosciences, là où des lacunes et des difficultés spécifiques avaient été détectées. Cette étude, réalisée grâce au soutien et à la confiance de divers partenaires (ESRI France, LIG et OSUG), a ouvert d'intéressantes pistes d'enquête, et mis les bases pour mener une réflexion plus approfondie et solide dans les didactiques, académiques et professionnelles, des disciplines liées à l'analyse du territoire. Il s'est poursuivi dans le cadre de la thèse, où les questions naïves, initiales, ont évolué en véritable questions de recherche et ont été traitées dans un contexte expérimental exploratoire.

Ce projet de thèse a bénéficié du partenariat LIG-ESRI France dans le cadre d'un dispositif de recherche CIFRE-ANRT. Il a aussi bénéficié de la collaboration avec l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble (OSUG) et l'Institut Polytechnique de Grenoble (Grenoble-INP), ces deux institutions ont consenti la mise en œuvre d'une démarche exploratoire en situation authentique, en mettant à disposition des classes d'étudiants.

1. Les équipes du LIG

Au sein du Laboratoire d'Informatique de Grenoble qui est le laboratoire d'accueil de cette thèse, deux équipes ont participé à l'encadrement de la recherche :

- l'équipe STEAMER (Spatio-Temporal information, Adaptability, Multimedia and KnowlEdge Representation), qui a accompagné le travail de recherche d'un point de vue thématique en terme d'analyse spatiale et SIG. Les recherches de STEAMER portent sur les systèmes d'information spatio-temporelle à travers l'exploration des problématiques liées à la gestion de deux dimensions particulières de l'information que sont l'espace et le temps. Plus précisément, l'équipe concentre ses travaux sur trois thèmes de recherche,

avec comme cibles particulières les dimensions espace et temps de l'information :1) le web sémantique, 2) la visualisation et 3) la mobilité et l'adaptation au contexte, dans deux domaines d'application privilégiés, la prévention des risques naturels et l'analyse spatiale. Les travaux de recherche de Steamer s'inscrivent en informatique dans le domaine de la représentation des connaissances, des systèmes d'information, et de l'ubiquité, mais également le domaine de la géomatique, c'est-à-dire au point de rencontre de l'informatique et de la géographie.

- l'équipe MeTAH (Modèles et Technologies pour l'Apprentissage Humain), qui a encadré la recherche d'un point vue méthodologique en termes de démarche exploratoire, ingénierie didactique et démarche expérimentale. Il s'agit d'une équipe interdisciplinaire (didactique, informatique) qui travaille sur la conception des modèles computationnels de connaissances épistémiques et didactiques, la réalisation des logiciels d'aide à l'apprentissage, la mise en œuvre et le suivi des situations actives d'apprentissage et l'analyse des usages des Environnements Informatiques d'Apprentissage Humain (EIAH). Les chercheurs de l'équipe mettent l'accent sur la conceptualisation pluridisciplinaire des questions de recherche, sur l'étude des approches informatiques pouvant être réutilisées, adaptées, ou étendues pour les résoudre et sur l'étude didactique, non seulement de l'usage des propositions élaborées, mais également de leur impact dans une perspective d'ingénierie et de réingénierie des systèmes.

Cette thèse s'inscrit d'une part dans les axes de recherche de l'équipe Steamer pour son intérêt envers les usages des SIG et d'autre part dans les axes de recherche de l'équipe Metah pour son intérêt envers les apprentissages de disciplines scientifiques et techniques.

2. ESRI France

Le partenaire industriel de cette thèse est la Société ESRI France : son Département 'Education et Recherche' est le service de rattachement. Esri Inc. (USA) a été le premier éditeur de logiciel en 1969 à prendre en compte l'importance de la dimension géographique pour visualiser, analyser comprendre et décider et ce dans tous les domaines. Depuis cette date, Esri Inc. et l'ensemble de ses représentants dans le monde s'emploient à promouvoir, développer et optimiser l'utilisation des SIG. Société de droit privé indépendante, créée en 1988 par Rony Gal, ESRI France est le distributeur exclusif des logiciels ESRI Inc. en France et dans plusieurs pays francophones. La société emploie à ce jour 130 personnes, la plus grande partie du personnel est composée de cadres, ingénieurs ou universitaires possédant une

double compétence indispensable en géographie et en informatique. Outre son département commercial destiné à la promotion et la commercialisation des produits, ESRI France associe une démarche "solution" destinée à faciliter au maximum la mise en place des projets de système d'information géographique de ses clients. ESRI France dispose ainsi des solutions les plus avancées et propose aux entreprises et organismes des services complets pour la gestion de leurs données géographiques : vente de logiciels, conseil, développement d'applications, fourniture de données et support technique. Par le nombre de ses utilisateurs et son chiffre d'affaires, ESRI France est le premier fournisseur français de SIG. Les logiciels ESRI sont le fruit de longues années de recherche sur les techniques de traitement de l'information spatiale. L'entreprise étant entièrement consacrée aux Systèmes d'Information Géographique, ses logiciels et solutions sont conçus et développés par la plus importante équipe de Recherche et Développement du monde des SIG. La gamme des logiciels ArcGIS permet de déployer l'information géographique sur toutes les grandes plateformes technologiques et dans tous les environnements (mobile, bureautique, Client / Serveur, SGBD, Internet / Intranet). Conscient que le SIG doit pouvoir communiquer avec les autres applications existantes, ESRI développe ses logiciels dans un esprit de compatibilité, d'interopérabilité et de respect des standards (i.e. : ISO, W3C) et est à ce titre membre principal de l' Open GIS Consortium (OGC). Coordonnée par le Responsable du Département Education et Recherche, la contribution d'ESRI France à cette thèse, s'est concrétisée à travers la mise à disposition substantielle de moyens matériels (Ordinateurs, Logiciel, Licences) et humains (supports techniques, méthodologiques, expertise). En contrepartie, l'apport de cette thèse à la société peut se matérialiser à travers trois issues : le développement d'une approche pédagogique innovante adaptée aux programmes de formation que ESRI France propose à ses clients ; la mise en place d'une méthodologie d'analyse 'métier' afin que le support technique et méthodologique, offert aux clients, puisse proposer des solutions ciblées aux différents secteurs professionnels ; la présence scientifique dans la communauté géomatique française et internationale, ce qui confirme et conforte l'implication d' ESRI France dans le milieu académique.

La convergence d'expériences et d'expertises différentes a encouragé le développement de ce projet de recherche, fort aussi d'un contexte éducatif et professionnel où la géomatique devient à la fois outil et méthode d'analyse scientifique et apparaît comme une nécessité pour l'étude des problématiques environnementales.

Ainsi, cette thèse n'est pas une fin, mais une ouverture vers de nouveaux défis.

INTRODUCTION

1. Présentation générale de la recherche

Les enjeux des formations et des débouchés professionnels sont au cœur du développement et de la reconnaissance de la geomatique en tant que métier à part entière. Néanmoins si l'enseignement des Systèmes d'Information Géographique (SIG) et de la géomatique est largement diffusé dans les formations en sciences du territoire, géographie et aménagement, force est de constater qu'il reste encore marginal dans les formations en géosciences et en ingénierie de l'environnement, même si les enseignants s'accordent à reconnaître son intérêt.

L'étude menée en 2010, nous avait permis de mettre en évidence d'une part les lacunes dans les pratiques d'enseignement et d'autre part les principales difficultés des étudiants à appréhender les concepts et les méthodes d'analyse spatiale (Balzarini et Al., 2011). Forts de cette expérience et convaincus du besoin d'approfondir la démarche exploratoire en direction des processus de construction de la connaissance qui sous-tendent la maitrise des SIG, nous avons décidé d'entreprendre la voie d'une thèse de doctorat.

L'intention de fond de cette thèse a été de mieux comprendre la façon de raisonner d'utilisateurs expérimentés et débutants (experts et novices), face à la résolution de problèmes spatiaux. Certes, les utilisateurs des SIG ont des multiples profils et les problèmes spatiaux ont des multiples spécificités. Par conséquent, il a été nécessaire d'effectuer une analyse des besoins en termes de cartographie et SIG dans les domaines des Géosciences et de l'Ingénierie de l'Environnement pour nous aider à limiter notre champ d'étude et effecteur des choix pertinentes dans une perspective pédagogique, professionnelle et sociétale.

Le chemin qui va de l'identification d'activités SIG dans les métiers des géosciences à la modélisation de raisonnements propres à ces activités, jusqu'aux propositions didactiques qui puissent améliorer l'apprentissage des SIG dans les formations géo scientifiques, est le parcours emprunté par cette thèse.

2. La problématique et les questions de recherche

2.1 Le constat

Ces cinq dernières années, l'Union Française des Géologues, la Fédération Française des Géologues (e.g. Geologue, 2004) et le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM, Varet 2008) ont présenté différents rapports et publications concernant le développement des professions géoscientifiques face aux enjeux environnementaux de demain et au renouvèlement des technologies et des savoirs. Si une démarche intellectuelle équilibrée entre l'observation et la modélisation reste à la base des pratiques, il est indéniable que l'apport technique de ces 20 derniers années a profondément influencé la gestion des problématiques de terrain et fait évoluer les compétences. Plusieurs tâches et méthodes relèvent totalement de l'exploitation des SIG : l'élaboration et la mise à disposition de bases de données géo-référencées, l'intégration de données (GPS), l'acquisition de données géo-référencées, la visualisation 3D, la normalisation des données géographiques, la création et la diffusion des cartes (sur le Web). Or, dans les sciences de la terre, le SIG ne constitue pas une fin en soi, c'est donc la finalité d'usage qui constitue l'objectif et la vision du géologue est déterminante pour les spécifications requises et la structuration d'un SIG. Attentif à fournir une information de base pertinente, seule à même de donner la vraie valeur aux interprétations proposées, le géologue ajoute à la maitrise de ces compétences, sa capacité à avoir un regard critique sur les données (Revue Geologue, 2004).

Il parait évident que l'acquisition des savoir-faire géomatiques, indispensables aujourd'hui à la pratique des métiers des géoscience doit être assurée par les formations. Deux modèles de formation sont concernés par l'enseignement des SIG : les cursus qui forment aux métiers proprement dits de la géomatique (géomètre-topographe, responsable SIG, cartographe, géomaticien..) et les cursus qui forment aux métiers de l'environnement. Les deuxièmes sont considérés comme des « non spécialistes ». A côté des géosciences, d'autres disciplines scientifiques forment au SIG pour non spécialités : la gestion économique des ressources territoriales, les sciences de l'ingénieur en environnement, la santé, etc. (Balzarini et Al., 2012). Nous avons examiné le contenu des 97 masters relevant des Sciences de la Terre et de l'Univers (STU), dispensés dans 35 établissements universitaires et écoles supérieures ; nous avons constaté que les modules SIG ne sont pas systématiquement présents dans tous les parcours. Lorsqu'ils sont affichés, ils apparaissent plutôt en fin de cursus (S3 ou S4), ont un

volume horaire d'environ 15 heures, et ils ont un caractère d'initiation, vu qu'il s'agit souvent de la première occasion pour les étudiants de se familiariser au SIG (Balzarini et Al., 2011).

Aussi, la courte enquête[1] menée dans le cadre des enseignements SIG en géosciences à l'Université de Grenoble confirme que les modalités pédagogiques sont d'une part ponctuelles et non progressives et d'autre part sont caractérisées par une approche très technique (découverte de l'environnement numérique et de l'organisation des outils, manipulation de principales fonctionnalités, création et publication des cartes).

Le constat que nous relevons est qu'il existe, de nos jours en France, un décalage entre ce que les formations universitaires en géosciences offrent actuellement et l'évolution des compétences métiers dans ce domaine. Les parcours universitaires qui forment aux métiers des géosciences semblent offrir des enseignements SIG qui nécessitent d'être perfectionnés.

2.2 La problématique

En partant de ce constat, notre problématique est de trouver *les causes et les remèdes* au niveau des apprenants qui nous permettent d'améliorer les pratiques d'enseignement des SIG dans les formations aux métiers de l'environnement.

Le développement de formations plus performantes et adéquates aux demandes du monde professionnel requiert de traiter progressivement différentes interrogations.

Avant tout, il est nécessaire de saisir, à l'intérieur d'un domaine d'application tel que les Géosciences, les secteurs d'application qui profitent le plus de l'apport des technologies SIG ; des compétences et des savoir-faire nouveaux sont alors à établir. Lorsque des activités-métiers précises ont été identifiées, dans notre étude il s'agira d'une activité de cartographie de synthèse, la cartographie d'aptitude, il faut comprendre comment les modalités conceptuelles et techniques de telle(s) activité(s) sont acquises par un novice. La compréhension des mécanismes d'acquisition d'un savoir-faire peut se faire à travers deux approches : d'une part il s'agit de comprendre les mécanismes intellectuels qui régissent un acte cognitif et d'autre part de connaitre minutieusement les principes, les concepts, les actions et les inférences, l'épistémologie, qui régit une telle activité. A l'intérieur des mécanismes cognitifs à examiner il faut savoir quel(s) élément(s)- niveau de granularité-

[1] Enquête menée dans le cadre du Master 2009-2010 sur le site grenoblois, auprès de bureaux d'études locaux, quelques enseignants intervenants à l'UJF et l'INPG et leurs étudiants. (20 personnes en tout)

atteindre et comment pouvoir l'identifier, le matérialiser et éventuellement le mesurer afin d'élaborer des évaluations. Les évaluations doivent permettre de reconnaitre si un élément cognitif (verbal, visuel ou gestuel..) est plutôt présent dans les mécanismes mentaux des apprenants, s'il est compatible avec les descripteurs épistémologiques, ou encore s'il est comparable à des éléments mobilisés par des experts. L'identification des modalités de raisonnements des utilisateurs (novice et experts) met en évidence les points critiques des phases de l'enseignement-apprentissage : des concepts, des stratégies qui sont donnés comme acquis et qui en réalité ne le sont pas. Ces points critiques peuvent difficilement être repérés dans des situations d'enseignement classique. C'est justement sur le repérage de ces points critiques que peut se construire la conception de dispositifs d'apprentissage innovants et performants.

Cette réflexion autour d'une problématique 'en entonnoir' (voir Figure1) qui part d'une dimension métier et va jusqu'aux éléments cognitifs qui participent aux raisonnements des utilisateurs,-nous amène à poser les questions suivantes qui ont motivées ce travail de thèse :

1. Comment étudier les raisonnements des utilisateurs, novices et experts?
2. Comment utiliser la connaissance sur les raisonnements pour suggérer des aides didactiques ?
3. Comment concevoir des nouveaux dispositifs d'apprentissage plus performants et en adéquation avec les demandes du monde professionnel ?

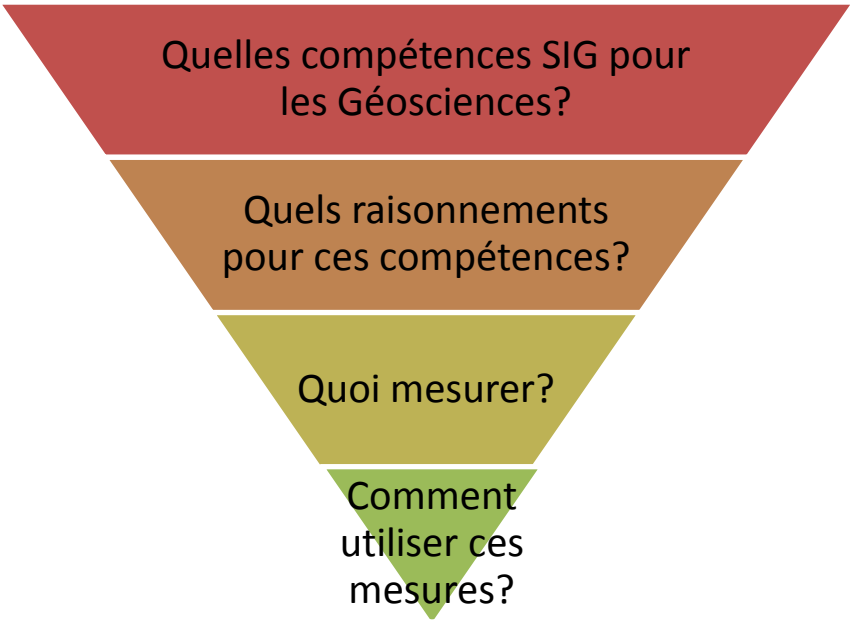


Figure 1 *Schéma en 'entonnoir' des questionnements*

Apporter des réponses à ces questions constitue l'objectif de cette thèse, ce qui peut se résumer dans le paragraphe sur les objectifs généraux présentés ci-après.

3. Les objectifs généraux

Les objectifs de la thèse sont :

1. **Définir une taxonomie des concepts** et des actions mobilisés par des experts et des étudiants lors d'une activité de cartographie de synthèse avec les SIG ; si des catégories d'objets conceptuels ont été réalisées pour différents types d'activité cartographique, notamment pour la lecture et interprétation de la carte topographique (Kent et Cheng, 2008), une taxonomie reste à être précisée pour la cartographie de synthèse.
2. **Identifier les différences** entre les concepts et les stratégies mobilisés par les étudiants et par les experts. Les relations entre expertise géo-scientifique et enseignement ont été largement explorées dans la recherche en didactique des Géosciences en Amérique du Nord (Kastens et Manduca, 2012) : observer et analyser l'activité des experts permet de penser à des modalités et à des contenus d'enseignement qui rapprochent les étudiants de l'expertise. Si cette perspective est visiblement adoptée dans l'enseignement des fondamentaux en Géosciences générales, elle l'est moins dans le cas de l'enseignement des pratiques SIG à des futurs techniciens de l'environnement; adopter cette perspective et l'adapter à l'activité de cartographie d'aptitude constitue notre deuxième sous-objectif.
3. **Proposer des aides didactiques** pour viser les difficultés émergées et optimiser la conception de dispositifs de formation. Cibler les contenus notionnels qui sont difficilement appréhendés par les étudiants et modéliser des situations d'apprentissage dans des démarches pédagogiques 'actives', pour que les connaissances acquises ne soient plus « de savoirs morts », mais pour qu'elles soient rentables sur le long terme (Raucent et Al., 2010), tels sont les derniers sous-objectifs de cette thèse.

Ces objectifs peuvent être atteints uniquement dans une démarche pluridisciplinaire, apte à prendre en charge les problématiques de cognition et d'apprentissage dans les domaines des SIG et de la cartographie.

4. Une démarche pluridisciplinaire

Le sociologue, philosophe Edgar Morin (1994) définit une discipline comme « une catégorie organisationnelle au sein de la connaissance scientifique ; elle y institue la division et la spécialisation du travail et elle répond à la diversité des domaines que recouvrent les sciences. Bien qu'englobée dans un ensemble scientifique plus vaste, une discipline tend naturellement à l'autonomie, par la délimitation de ses frontières, le langage qu'elle se constitue, les techniques qu'elle est amenée à élaborer ou à utiliser, et éventuellement par les théories qui lui sont propres». Le même auteur nous rappelle[2] que « l'histoire des sciences n'est pas seulement celle de la constitution et de la prolifération des disciplines, mais en même temps celle de ruptures des frontières disciplinaires, d'empiètements d'un problème d'une discipline sur une autre, de circulation de concepts, de formation de disciplines hybrides qui vont finir par s'autonomiser ; enfin c'est aussi l'histoire de la formation de complexes où différentes disciplines vont s'agréger et s'agglutiner ». Même si la Science se définit à travers ses disciplines, deux démarches lui sont inévitablement liées : la pluridisciplinarité et l'interdisciplinarité[3].

La première est la rencontre autour d'un thème commun entre chercheurs, enseignants de disciplines distinctes mais où chacun conserve la spécificité de ses concepts et méthodes. Il s'agit d'approches parallèles tendant à un but commun par addition des contributions spécifiques. La seconde suppose un dialogue et l'échange de connaissances, d'analyses, de méthodes entre deux ou plusieurs disciplines. Elle implique qu'il y ait des interactions et un enrichissement mutuel entre plusieurs spécialistes. L'interdisciplinarité est aussi le principe que l'on retrouve comme fondateur des sciences cognitives. « Même si l'interdisciplinarité permet de mieux appréhender un sujet dans sa « réalité globale », elle comporte le risque de l'approximation conceptuelle, de la confusion des concepts voire de l'illusion de l'embrassement de tous les savoirs » (Morin, 1994).

Le travail de recherche conduit dans le cadre de cette thèse se situe à l'intersection de différents domaines disciplinaires : les Sciences de l'Information Géographique et la Géomatique, les Sciences Cognitives, la Didactique des sciences et les Géosciences

[2] *Articuler les disciplines*, communication au colloque « Interdisciplinarité » organisé en 1990 par le CNRS.

[3] Il y en a une 3° : La transdisciplinarité désigne un savoir qui parcourt diverses sciences sans se soucier des frontières.

Appliquées. Dans ce sens, elle assume à la fois l'ambition et le risque d'être pluridisciplinaire et interdisciplinaire.

Quelques précisions sont apportées ci-après sur la nature du rôle de chacune des disciplines concernées par cette thèse : géomatique, psychologie cognitive, didactique et géosciences.

4.1 Le rôle de la géomatique

Notre thèse s'inscrit dans le domaine de la Géomatique. La Géomatique est une discipline de recherche orientée vers la représentation, la modélisation, l'intégration, l'analyse et la visualisation de données géographiques. Les domaines d'application de cette discipline sont très variés : aménagement et planification des territoires, systèmes et services de mobilité, espaces géographiques complexes et dynamiques (RIG, 1260-5875, 2013). La géomatique est une activité scientifique dont le SIG est le produit (Joliveau, 2004). Il n'est pas de notre ressort d'apporter, dans l'univers des définitions formulées au sujet des SIG, une énième proposition, banale ou redondante. Pour cela nous prenons les parti pris d'adhérer à celle proposée par T. Joliveau (2004) : « un SIG doit être simultanément envisagé à la fois comme un instrument technique, un outil intellectuel, une production organisationnelle et une construction sociale ». « Il peut être envisagé come un empilement en couches de niveaux différents, reliés par des protocoles ». (voir Figure 2) Cette configuration répond à notre situation d'étude qui implique des secteurs académiques et professionnels, les Géosciences Appliquées et l'Ingénierie de l'Environnement, où l'usage des SIG doit s'adapter à des objectifs et des priorités différentes : cela implique des choix en termes de données, de traitements ou de méthodes. Or, indépendamment de la hiérarchie des composants, selon le modèle en couches, « chaque couche constitue une condition nécessaire à l'avancement du processus ». La réponse à une question donnée « ne peut avoir lieu que si elles fonctionnent et communiquent toutes ensemble ». C'est ce fondement que nous adoptons dans notre démarche d'enseignement des SIG.

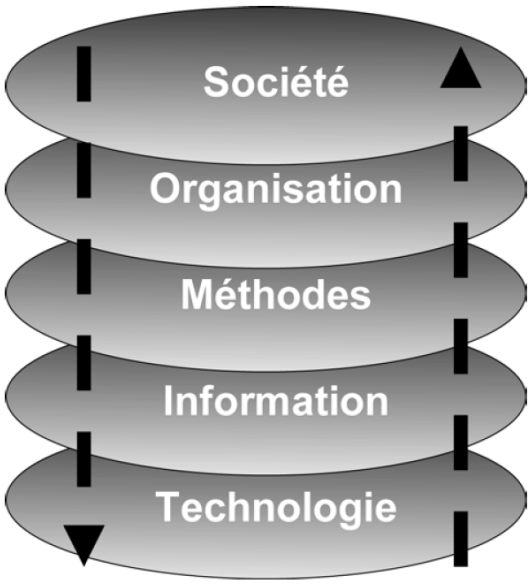


Figure 2 *SIG : Schéma de modèle en couches proposé par T.Joliveau (HDR, 2004).*

Notre situation d'étude concerne l'intégration des SIG dans l'enseignement supérieur de disciplines 'techniques' destinées à résoudre des problématiques de terrain. La notion de SIG en tant que support technologique et méthodologique à la solution de projets environnementaux reste donc importante. Pour cela, nous retenons aussi que « un SIG est toujours un outil technologique et informationnel visant à donner des éléments de réponse à un problème ayant une dimension spatiale dans un contexte organisationnel précis » (Joliveau, 2004).

Dans l'univers des thématiques traitées par et avec les SIG, nous nous sommes intéressés aux mécanismes cognitifs liés à leur usage. Nous étudions donc les usagers confrontés à la réalisation d'une tâche nécessitant un SIG.

4.2 Le rôle de la psychologie cognitive

L'objet de notre étude est l'identification des raisonnements d'utilisateurs novices et d'experts dans le cadre d'une (activité) tâche précise de cartographie réalisée avec les SIG. Par conséquent, la deuxième discipline de notre recherche est celle de la Psychologie Cognitive. La psychologie cognitive est la sous-discipline de la psychologie qui se focalise sur la cognition. Le terme « cognition » est un terme contemporain synonyme d'« intelligence

», de « pensée ». La cognition est cette faculté mobilisée dans de nombreuses activités, comme la perception (des objets, des formes, des couleurs…), les sensations (gustatives, olfactives…), les actions, la mémorisation et le rappel d'informations, la résolution de problèmes, le raisonnement (inductif et déductif), la prise de décision et le jugement, la compréhension et la production du langage, etc. Les psychologues cognitivistes cherchent à déterminer par quels mécanismes nous réalisons toutes ces tâches auxquelles nous sommes confrontés. « Ceci signifie que ce qui importe au psychologue cognitiviste, c'est de dresser la liste précise des opérations mentales élémentaires (i.e., processus) décrivant comment un sujet accomplit une tâche cognitive. Les processus, et les mécanismes par lesquels ils sont déclenchés et exécutés, doivent pouvoir être définis précisément. […] L'approche de la psychologie cognitive est une approche scientifique. Ceci signifie que le psychologue étudie la cognition comme le biologiste étudie une autre fonction du vivant. Le psychologue cognitiviste découvre les mécanismes cognitifs en mettant au point des expériences. Ces expériences ont lieu en laboratoire ou sur le terrain. Pour découvrir les processus cognitifs, les psychologues cognitivistes contemporains utilisent toutes les méthodes qui leur permettront d'expliquer les performances d'un sujet dans une tâche par la suite des processus cognitifs mis en œuvre.[…] Pour découvrir cette suite de processus, le psychologue cognitiviste manipule la structure de l'environnement et des tâches (consignes, caractéristiques des stimuli) et analyse les conséquences de ces manipulations sur les performances des sujets. Divers indices de ces comportements sont mesurés par le psychologue (le temps de réaction, le pourcentage d'erreurs, les protocoles verbaux, etc.). […] Il existe trois types d'observation en psychologie cognitive : l'observation naturelle (collectant les informations telles qu'elles se présentent au chercheur), l'observation corrélationnelle (consistant à mettre en relation différentes variables) et l'observation expérimentale (permettant la manipulation et le contrôle de facteurs pour expliquer les phénomènes). Les psychologues cognitivistes analysent la cognition humaine dans le cadre de la théorie du traitement de l'information. Ils conçoivent ainsi le système cognitif humain comme un système de traitement de l'information » (synthèse d'un extrait de Psychologie Cognitive, P. Lemaire, Ed. DeBoeck, 2006).

Notre intérêt dans le domaine de la psycho-cognition est double : d'une part nous allons explorer les cadres théoriques de cette science pour mieux comprendre les mécanismes qui régissent les raisonnements, plus précisément nous nous appuierons sur les théories cognitivistes adoptées et intégrées aux Sciences de l'Information Géographique ; d'autre part

nous adoptons les démarches expérimentales issues de ce domaine scientifique pour conduire nos expériences.

Identifier les éléments des mécanismes cognitifs mobilisés dans une activité précise, nous permet de mieux connaitre l'activité et de mieux penser à comment l'enseigner, ce qui représente notre objectif général.

4.3 Le rôle de la didactique

Nous nous tournons vers la discipline qui prend en charge les problématiques d'enseignement et d'apprentissage quand elles sont étudiées du point de vue des savoirs de la discipline enseignée : la Didactique. Afin de préciser les liens qui nous unissent à cette science, nous donnons ci-après quelques lignes extraites d'un article de Gérard Vergnaud (2012), psychologue et didacticien, élève de Jean Piaget. L'approche de Gérard Vergnaud sur l'enseignement (des mathématiques) qui se fonde sur la relation entre concept (à enseigner) et situation et qui permet de faire le lien entre champs professionnels et champs conceptuels (ARDM, 2013), conforte notre intention d'allier psychologie et didactique dans notre recherche.

Dans son article « A quoi sert la didactique ? » publié en janvier 2012 dans la Revue Sciences Humaines, Vergnaud nous explique que « la didactique étudie chacune des étapes de l'acte d'apprentissage et met en évidence l'importance du rôle de l'enseignant, comme médiateur entre l'élève et le savoir […]. De l'épistémologie des disciplines aux avancées de la psychologie cognitive, c'est l'ensemble du processus construisant le rapport au savoir qui est analysé. […] La didactique ne s'oppose pas à la pédagogie, elle va simplement au-delà, par un souci plus grand d'analyse du contenu des activités mises en jeu dans l'apprentissage, notamment des opérations de pensée que ces activités impliquent. C'est pourquoi cette discipline s'appuie d'une part sur la psychologie du développement cognitif, et d'autre part sur l'épistémologie des disciplines, indispensable à l'analyse du contenu des connaissances […]. La didactique est d'une certaine manière une provocation, puisqu'il faut souvent déstabiliser les croyances des élèves qui reposent sur l'intuition, c'est-à-dire sur une lecture et une interprétation insuffisamment critique de l'expérience. Provoquer l'enfant dans ses conceptions, c'est l'obliger à s'adapter à des phénomènes imprévus et même imprévisibles. « *La connaissance est adaptation* », nous a enseigné Piaget. Mais s'adapter, c'est rencontrer le

nouveau ; et c'est l'un des actes principaux de médiation de l'enseignant que d'aménager cette rencontre des élèves avec le nouveau. Surgit alors une question théorique capitale. A quoi s'adapte-t-on ? Et qu'est-ce qui s'adapte ? La meilleure réponse aujourd'hui, à la lumière des recherches en didactique et des recherches sur le développement des compétences dans le travail, est que nous nous adaptons à des situations et que ce sont les formes d'organisation de notre activité qui sont l'instrument et le résultat de cette adaptation. Ces formes d'organisation, appelées schèmes par les psychologues et notamment Piaget, concernent en fait tous les registres de l'activité : les gestes (ordinaires, sportifs,…) , les formes de raisonnement et de prise d'information impliquées dans la résolution de problèmes scientifiques et techniques, les formes d'énonciation orale et les formes d'interaction sociale et affective.[…]
Si l'école veut offrir aux élèves des situations qui leur permettent d'exercer des schèmes déjà formés, d'en élargir la portée et d'en préciser les limites, et en même temps de développer des schèmes nouveaux, alors la première qualité professionnelle de l'enseignant consiste à choisir à bon escient les situations d'enseignement, au regard de l'épistémologie de la discipline concernée et de la psychologie de l'apprentissage et du développement ».

Les cadres théoriques de Vergnaud nous serons précieux pour analyser l'activité géomatique de cartographie d'aptitude, selon une approche par schème organisationnel qui permet de définir, pour chaque étape de l'activité, les concepts mobilisés, les représentations utilisées et les caractéristiques de la situation. Aussi l'approche de Vergnaud nous aidera à modéliser une situation d'apprentissage cohérente. La conception d'une situation cohérente est d'autant plus importante que notre recherche s'intéresse à des utilisateurs (les étudiants) novices en SIG et sans un véritable bagage conceptuel et méthodologique issu de la Géographie et/ou de l'Informatique, ce qui pourrait les aider à mieux appréhender l'outil SIG. Cette condition soulèvera les questions relatives aux concepts (et aux schémas) déjà formés, à élargir, à développer, à déclencher chez une population de haut niveau intellectuel, qui s'initie à cette pratique nouvelle. En effet, l'objet de notre étude ainsi que l'objectif didactique se concrétisent dans un domaine d'application, celui des Géosciences. Nos étudiants qui se forment à cette discipline seront qualifiés de 'non-spécialistes' en géomantique.

4.4 Le rôle des Géosciences

La situation d'enseignement que nous allons concevoir sera une application de la Géomatique en Géosciences. Les Géosciences ou Sciences de la Terre regroupent les sciences dont l'objet est l'étude de la Terre (lithosphère, hydrosphère et atmosphère) et de son environnement spatial.

Bien que la construction de la connaissance se soit faite autrefois par de supports autres que ceux informatiques, l'apport de ces derniers à la connaissance géologique, dans un processus qui va de l'acquisition de la donnée sur le terrain à la modélisation de l'espace géologique et des phénomènes qui s'y déroulent, nous parait aujourd'hui flagrant. Nous aborderons ce sujet en termes d'évolution de compétences et non d'impact cognitif : nous ne menons pas une comparaison entre des résultats cognitifs issus de l'observation d'une activité géo scientifique (type cartographie ou analyse spatiale) conduite sans les SIG et une activité conduite avec. Toutefois, l'analyse de l'évolution des pratiques, induite par l'introduction des SIG dans les métiers, permet d'identifier des indicateurs « cognitifs », comme, par exemple, la capacité des scientifiques et professionnels à traiter de masses de données de plus en plus considérables ou à extraire de l'information d'environnements visuels complexes, qui se sont développés grâce au support informatique.

L'avancée des applications SIG dans les géosciences appliquées est indéniable, soit d'un point de vue des filières métiers (ex. : l'Hydrogéologie, la Géophysique appliquée, les Minéraux industriels) que d'un point de vue des compétences requises (Balzarini et Al., 2011). Les données géologiques sont croisées avec des données environnementales et socio-économiques. Cette évolution impose au géologue de s'ouvrir à de nouvelles disciplines, parfois même d'acquérir une double compétence en maitrise des systèmes d'informations, permettant :

> la génération d'informations nouvelles résultant du croisement et de la modélisation de données et informations de sources diverses et indépendantes ;

> la réduction de l'incertitude géologique, notamment liée au gain de précision apporté par le référencement spatial, et les contraintes géométriques et sémantiques ;

> l'accès à des moyens d'analyse de la donnée et de traitement de l'information de plus en plus performants, mettant en œuvre des puissances de calcul et de combinaison inégalables

par les méthodes analogiques, et inconcevables il y a encore quelques année (Revue Géosciences, 2007).

Paradoxalement, sur le plan pragmatique de l'enseignement des SIG dans les filières universitaires des géosciences, l'intégration de cette discipline reste marginale. Ce constat (Balzarini et Al., 2011) constitue l'élément déclencheur de notre questionnement, comme nous l'avons évoqué dans la « Problématique ».

5. Un positionnement de recherche

Les Sciences de l'Information Géographique englobent plusieurs sphères de recherche, dont l'une d'elles est la recherche en cognition. Nous allons donc préciser maintenant notre positionnement à l'intérieur de la recherche cognitive propre aux Sciences de l'Information Géographique.

5.1 La recherche cognitive dans les Sciences de l'Information Géographique

Nous nous appuyions sur la littérature nord-américaine et plus spécifiquement sur les définitions de Daniel R. Montello (2009), qui précisent les différents domaines de la recherche cognitive identifiées à partir des années 90. La recherche cognitive en Géomatique, dans les Sciences de l'Information Géographique, concerne la connaissance humaine liée et issue de l'information géographique et des SIG. Elle étudie les représentations internes et externes de structures et processus et elle est motivée par le désir d'améliorer la facilité d'utilisation, l'efficacité, l'équité et la rentabilité de l'information géographique et les SIG. L'objectif ultime de ce champ de recherche est celui d'aider les utilisateurs inexpérimentés à accéder aux technologies de l'information géographique, et d'aider les utilisateurs expérimentés à améliorer leur utilisation des technologies.

Selon Montello (Traduction libre, 2009), la recherche cognitive dans les SIG s'inscrit dans six axes : les facteurs humains des SIG, la géovisualisation, les systèmes de navigation, les géo-ontologies, le raisonnement spatial en géographique et dans l'environnement, et les aspects cognitifs de l'enseignement de la géographie.

- Le premier domaine de recherche se concentre spécifiquement sur l'interaction entre les humains et les systèmes d'information. Les facteurs humains, ou ergonomie, est

une discipline appliquée de la recherche qui vise à améliorer l'utilisation humaine (convivialité) des systèmes, des dispositifs et des environnements conçus. L'ergonomie traduit la facilité, l'efficacité, la sécurité d'apprentissage et d'utilisation. Un sous-ensemble important de la recherche sur les facteurs humains en Géomatique s'est penché sur la nature du raisonnement et de décision avec l'information géographique : Cette recherche a examiné des situations où les gens utilisent les SIG pour prendre des décisions telles que l'implantation des installations, choix d'itinéraire, et la prévision du climat (Ishikawa et Al. 2005). Certaines de ces études ont examiné la nature sociale de la cognition, en examinant comment fonctionne l'acte de prise de décision via l'information géographique, quand elle est répartie socialement ou de façon collaborative.

- La deuxième sphère, la géovisualisation, bien que considérée comme un sous-ensemble de facteurs humains, mérite une reconnaissance distincte parce qu'elle poursuit la longue tradition d'étude des aspects cognitifs de la communication cartographique (Lloyd 1993; Montello 2002). Les cartes comprennent des systèmes souvent complexes des signes et des symboles dont l'interprétation dépend profondément de la connaissance préalable de la personne et de l'expérience d'apprentissage (MacEachren 1995). Il y a donc de nombreuses questions, intéressantes et subtiles pour les chercheurs qui s'intéressent à la connaissance humaines construites à partir des affichages computationnels (et des représentations) d'informations géographiques. Par exemple, les recherches conduites par Fabrikant (2004, 2006) sur l'utilisation des écrans spatiaux pour représenter métaphoriquement le contenu sémantique de grandes bases de données, fournit un important corpus de recherche dans le domaine des métaphores, des schémas, et la conception des interfaces numériques. Ces écrans sont connus comme «spatialisation de l'information."
- Le troisième domaine de recherche cognitive en géomatique a étudié les systèmes de navigation, y compris celles impliquant des cartes et des directives de routes verbales. La quasi-totalité de cette recherche a porté sur la composante signalétique de navigation, qui comprend la planification des voyages, le choix des itinéraires, et d'orientation (Golledge 1999; Montello 2005).
- Le quatrième axe concerne l'étude des ontologies cognitives qui est essentiellement l'étude de la structure conceptuelle et de changement des caractéristiques et des phénomènes du monde. La recherche sur la géo-ontologie est confrontée à la question

persistante de la relation entre le langage et la pensée. Les concepts peuvent être considérés comme des règles qui définissent les systèmes de catégorie. La plupart des recherches sur géo-ontologies cognitives a, en effet, été stimulée par la théorie des catégories cognitives et linguistiques (Mark 1993).

- Le cinquième axe se réfère plus particulièrement à la cognition des référents géographiques dans le monde réel plutôt qu'à la cognition des systèmes d'information géographique. En effet, ce domaine concerne les études sur la pensée spatiale et la mémoire, mobilisés dans les espaces environnementaux et géographiques. Une question clé ici est dans quelle mesure la connaissance du territoire est continue ou discrète ? Cela est essentiel parce qu'il fait écho à une discussion dans les Sciences de l'Information Géographique (GISCience) sur les ontologies d'objets de l'espace géographique : de toute évidence les gens catégorisent la surface de la Terre dans des régions discrètes, qui organisent la mémoire, l'influence raisonnement, et fournissent des références pour les labels verbaux (Friedman et Al., 2005).
- Le sixième et dernier axe de la récente recherche cognitive en Sciences de l'Information Géographique a mis l'accent sur l'évolution de l'enseignement de la géographie avec l'intégration des SIG dans le secondaire et à l'université. Le Conseil National pour la Recherche aux US a publié en 2006 un livre capital intitulé *Learning to think spatially.* La commission de rédaction soutient que la pensée spatiale est un mode fondamental de la pensée humaine, mais qu'il reçoit peu d'intérêt dans le curriculum de l'éducation : pour cela la Commission a demandé la définition de normes éducatives pour encadrer et performer la pensée spatiale. La Commission a également fait valoir que l'intégration de SIG et d'autres technologies spatiales dans le K-12 curriculum (cycle primaire et secondaire en France) serait très utile comme un moyen d'apprendre à réfléchir et raisonner spatialement (Montello, 2009).

Dans cette vue d'ensemble proposée par D. Montello (2009), notre posture de recherche touche aux facteurs humains non pas en termes d'étude de l'ergonomie mais en termes d'étude des situations de résolution de problème et de prise de décision supportée par les SIG ; elle touche également à la géo-visualisation en termes d'étude des perceptions visuelles, de mécanismes cognitifs de traitement de l'information visuelle et des représentations cartographiques dans un environnement numérique ; enfin, notre recherche prend une posture fortement 'éducative', dans la mesure où nous nous préoccupons de fournir des éléments d'amélioration de l'apprentissage de concepts et technologies SIG dans l'enseignement

supérieur. Ce dernier volet nous tient particulièrement à cœur, car notre recherche s'inscrit dans un contexte local, français, où la recherche sur l'éducation aux SIG n'est pas aussi significative qu'aux US. Ainsi, quelques précisions sur la recherche en éducation sont apportées dans le paragraphe qui suit.

5.2 La recherche en didactique des SIG

Baker, Kerski, Huynh, Vieherig et Bednarz, (2012), dans leur "Call for un Agenda for GIS Education Research", (RIGEO[4], 2012) nous explique ce que c'est la recherché en éducation/ didactique des SIG. Nous nous référons une fois de plus aux cadres scientifiques nord-américains car ils ont une culture et une position bien plus ancrées/enracinées qu'en France : l'introduction des SIG dans l'enseignement secondaire et supérieur aux US est une priorité institutionnelle depuis une vingtaine d'années. Cette priorité s'est donnée les moyens théoriques et pragmatiques pour développer des projets soutenus par le National Research Council, comme le programme *Learning to think spatially*[5], qui a produit un rapport qui synthétise cinq ans d'investigation sur les apports en termes de compétences et d'apprentissages de l'usage des technologies SIG dans les classes.

L'enseignement des SIG se concentre sur la façon dont l'information géographique est représentée et comment elle peut être traitée, pour analyser les caractéristiques, les relations et les tendances des phénomènes spatiaux dans une variété de domaines différents.

Pour les auteurs, l'enseignement avec les SIG aide à résoudre les problèmes et à comprendre les concepts dans d'autres disciplines comme les études environnementales, la géographie, l'histoire, les mathématiques, la biologie, la chimie, les sciences de la Terre, le marketing ou la médecine.

Si l'usage des SIG s'est étendu en raison de sa nature interdisciplinaire, l'éducation aux SIG définit une plate-forme pour les chercheurs dans ces différents domaines en établissant un dialogue commun centré sur les thèmes suivants : la pensée critique, la pensée spatiale et l'analyse, l'éducation basée sur la technologie et l'investigation scientifique.

La recherche en éducation aux SIG s'intéresse aux contenus et aux mécanismes d'apprentissages que les étudiants mobilisent avec des données spatiales, des méthodes d'analyse spatiale et des fonctionnalités des SIG, ainsi qu'aux modalités que les éducateurs

[4] Review of International Geographical Education Online www.rigeo.org
[5] Le Rapport est largement présenté plus loin

mettent en œuvre pour faciliter ces apprentissages. Dans la recherche, les modèles pédagogiques sont postulés, testés et retravaillés. Les expériences sont menées en s'appuyant sur des méthodes de recherche variées : enquêtes, études de cas, études expérimentales, conception pédagogique, et autres (Baker, Kerski et Al., 2012).

A l'échelle européenne, le domaine de l'éducation aux SIG et à la géographie est coordonné par le réseau d'experts européens Herodot (http://www.herodot.net/) issus de l'European Association of Geographers (EUROGEO) qui comprend 150 institutions membres. Ce réseau vise à fédérer une communauté d'acteurs sur 4 thématiques principales :

- la dimension européenne de l'enseignement de la géographie,
- l'innovation dans l'enseignement de la géographie
- la promotion de l'enseignement de la géographie en Europe
- l'enseignement tout au long de la vie.

Le réseau organise des séminaires, formations, conférences et ateliers sur l'enseignement de la géographie. Depuis 2011, EUROGEO et RIGEO ont établi un étroit partenariat afin de supporter le développement et la recherche dans l'éducation aux SIG en Europe.

A l'échelle nationale, les recherches les plus considérables sur l'introduction des SIG dans l'enseignement, sont celles conduites au sein de l'Institut Français de l'Education (anciennement INRP), par l'équipe EducTICE avec l'Observatoire des Pratiques Géomatiques. Cet observatoire a été fondé en 2005 à l'INRP pour permettre de faire avancer la réflexion sur les usages et les enjeux des outils géomatiques dans l'enseignement secondaire. Le principal objectif est de permettre un enrichissement mutuel par le croisement des regards (approche pluridisciplinaire) et par la confrontation des expériences qui se déroulent actuellement en France et à l'étranger. Il s'agit de créer une communauté de pratiques autour des usages pédagogiques de la géomatique. Les chercheurs questionnent les démarches innovantes en termes d'approche systémique, de démarche d'investigation, de résolution de problème qui peuvent soutenir le développement d'usages disciplinaires et transversaux. L'Observatoire des Pratiques Géomatiques a conduit plusieurs actions : une veille pédagogique et technique sur les outils et ressources ainsi que sur les démarches pédagogiques associées à l'usage des outils géomatiques ; des recherches sur le thème jeux numériques et apprentissages, du point de vue des jeux de simulation environnementale, des jeux géo-localisés et des situations ludo-éducatives à construire ; un groupe de travail et de

recherche sur les thématiques "espaces, sonorités et mobilités" autour de la géomatique sonore, cartographie du bruit grâce aux outils mobiles (smartphones, tablettes tactiles).

Des travaux sur l'usage de la géomatique dans l'enseignement des géosciences sont pratiquement inexistants dans le panorama de la recherche française : néanmoins un volet concernant l'intégration des TICE dans l'enseignement des géosciences est présent au sein de l'activité de l'équipe EducTice de l'INRP.. C'est dans ce cadre qu'en 2007, la thèse d'Eric Sanchez, « Investigation scientifique et modélisation pour l'enseignement des sciences de la Terre », dirigée par Luc Trouche et Christian Orange à l'Université Claude Bernard - Lyon I, a été menée : elle développe l'idée que l'apprentissage des sciences s'appuie nécessairement sur la conduite d'une démarche d'investigation c'est-à-dire une démarche qui, dans le cadre de la résolution d'un problème, conduit à mettre en tension un modèle scientifique – considéré comme un outil « pour penser » - et un registre empirique constitué lors d'activités de terrain. Une analyse exhaustive de l'évolution de la recherche sur l'intégration des SIG dans l'enseignement secondaire en France est apportée, à la communauté internationale, par Sanchez, Genevois, et Joliveau (2011).

En guise de synthèse à ce tour d'horizon sur les contextes disciplinaires et scientifiques dans lesquels notre recherche s'inscrit, il est nécessaire de rappeler que cette recherche creuse des questions d'ordre cognitif, en s'intéressant aux raisonnements d'utilisateurs non-spécialistes en SIG, dans une perspective didactique et appliquée aux Géosciences. Elle se distingue d'autres recherches conduites dans le milieu de la recherche en éducation aux SIG en France, par son orientation exclusivement consacrée à l'enseignement supérieur. Cette perspective éducative prend ses fondements dans la méthodologie d'ingénierie didactique, que nous précisons ci-après.

6. Une démarche méthodologique globale

« La méthodologie caractérise les moyens que l'on prévoit de se donner (a priori) pour prouver ce qu'on avance, ou au moins pour inscrire ce qu'on propose dans la réalité, qu'elle soit ou non construite, l'interprétation ne pouvant se faire qu'à l'intérieur du cadre de référence où on est placé » (Robert, 1992).

Comme Robert (1992) le souligne, « nous avons basé notre contribution sur les recherches [en didactique] qui relèvent d'une activité en partie expérimentale et empruntent une partie de

leurs méthodes aux sciences humaines expérimentales (sciences cognitives), élargies aux expériences sur le terrain, tout en ayant un cadre théorique spécifique pour le choix des variables (qualitatives aussi quantitatives), pour l'interprétation et pour la conceptualisation. Il y a une certaine unité dans la conception méthodologique entre le problème qu'on se pose (qui débouche sur la problématique) et les moyens qu'on se donne pour obtenir les résultats. Mener une recherche amène à mettre en œuvre, après adaptation, différents méthodes d'investigation puis de traitement de données, ayant plus ou moins d'extension […] Il s'agit de pouvoir préciser ce que l'on sait, ce que l'on admet, ce que l'on cherche et de prévoir si ce que l'on va trouver pourra être interprété, voire généralisé. Le champ de la didactique se rapproche bien de celui d'une science humaine, dont l'objet n'est pas d'établir des « théorèmes », mais bien plutôt d'arriver à mettre en évidence certaines régularités. Les seules preuves auxquelles ont peut prétendre, là où c'est possible, sont des preuves partielles à caractère probabiliste ».

Le même auteur propose un classement des méthodologies de recherche en didactique en trois types :

- Les ingénieries, centrées sur l'enseignement d'un contenu donné à un niveau donné : elles comportent une réflexion épistémologique, balisage du champ conceptuel concerné, des diagnostics sur l'enseignement ordinaire, une conception de séquences avec prévision d'observations, un 'évaluation d'expériences effectives (M. Artigue, 1990).
- Les recherches sur les représentations, plus centrées sur les acteurs : elles comportent la recherche de traces directes des représentations, que l'on confronte avec des traces plus indirectes, plus spontanées, produites selon les cas à travers des productions ou des discussions.
- Les recherches transversales, centrées sur un type de scénario.

Notre recherche s'inscrit dans une démarche exploratoire. La posture que nous adoptons en termes de méthodologie peut se définir mixte : elle est à la fois issue de l'ingénierie, en tant que analyse et conception didactique et issue de la recherche sur les représentations, car elle tente de répondre à des questions sur les représentations internes, propres aux sujets et externes, propres aux environnements (informatiques) observés.

Dans une perspective plus internationale et contemporaine, notre démarche trouve les moyens pour répondre à ses questions de recherche, dans les paradigmes de la Design-Based

Research, (DBR) (Edelson, 2002). Il s'agit d'une méthodologie systématique mais souple, visant à améliorer les pratiques éducatives à travers l'analyse itérative, la conception, le développement et la mise en œuvre de dispositifs d'apprentissage : cette approche est basée sur la collaboration entre chercheurs et praticiens dans le monde réel. Elle a suscité l'intérêt de la communauté française des chercheurs en didactique des mathématiques, qui l'a adoptée dans le but de coordonner et contextualiser les connaissances des grandes théories (constructivisme piagétien, théorie des situations..) aux processus de design pédagogique (Ruthven, Laborde, Leach et Tiberghien, 2009).

L'approche DBR (Sandoval et Al., 2004) commence par une phase d'analyse de la situation de terrain, suivie par l'identification dans la littérature des théories permettant de poser des hypothèses vérifiables au moyen de mesures de processus et de produits de l'activité. Suit une phase de conception itérative et de validation des hypothèses de recherche et développement. Au final, la démarche DBR est supposée aboutir à un système répondant aux objectifs de formation tout en fournissant des résultats concernant l'effet d'un élément de conception sur les processus d'apprentissage. La DBR est intégrative parce que les chercheurs ont besoin d'intégrer une variété de méthodes et de recherche qualitative et quantitative, en fonction des besoins de la recherche. Les chercheurs utilisent plusieurs méthodes mixtes au fil du temps pour constituer un corps de preuves qui appuient les principes théoriques qui sous-tendent une innovation spécifique. Le résultat de l'application de la DBR produit souvent un modèle de conception pédagogique avec ses règles de conception. Ce modèle est souvent très contextuel et pas nécessairement applicable à un contexte plus large, c'est à dire qu'il doit être corroboré par des approches de recherche plus traditionnelles.

Notre contexte méthodologique global est donc régi par le cadre de la Design-Based Research où, à chaque itération, les résultats obtenus se rapprochent un peu plus de l'accomplissement des objectifs proposés. Il comporte :

- Une analyse des pratiques, professionnelles et pédagogiques
- Une analyse épistémologique de l'activité de référence
- Une analyse des principales difficultés des apprenants réalisant l'activité
- Une définition d'hypothèses et de questions de recherche
- Une proposition de design de dispositif de formation pour tester les hypothèses
- Une observation de l'activité des apprenants sur ce dispositif selon les questions émises

- Une analyse des résultats
- Une proposition de modifications au design du dispositif de formation
- Une observation de l'activité des apprenants…

Ce processus correspond au déroulement global de la thèse, dont les spécificités de la structure sont présentées ci-après.

7. La structure de la thèse

La thèse est organisée en deux parties : la première, qui explore selon différents axes le domaine de l'activité géomatique étudiée ; la deuxième qui développe une démarche d'investigations théoriques et empiriques déployée pour répondre à une série de questions de recherche en rapport avec certains de nos objectifs énoncés plus haut.

La **première partie** est constituée de trois chapitres :

- Le **Chapitre I** présente l'analyse conduite au sein du milieu professionnel des Géosciences pour identifier les besoins métiers en termes de compétences et savoir-faire géomatiques. Dans un souci de cohérence avec nos objectifs pédagogiques visant à enseigner des contenus en adéquation avec la demande du monde du travail, la première étape de cette recherche a été de reconnaitre les activités géomatiques les plus courantes auprès des professionnels des géosciences. L'approche méthodologique de cette phase a consisté en une analyse documentaire de fiches-métiers, d'offres d'emploi, de rapports de stages professionnalisant, ainsi que des interviews à des professionnels. A l'issue de cette phase une activité géomatique relativement courante dans le milieu des géosciences appliquées a été identifiée : il s'agit de la cartographie de susceptibilité ou d'aptitude, réalisée, avec les SIG, avec des méthodes d'analyse spatiale multicritère.
- Le **Chapitre II** propose un 'analyse épistémologique de l'activité de cartographie d'aptitude. En effet, pour aller plus loin dans la compréhension de cette activité il est nécessaire d'en préciser toutes les spécificités. Il s'agit d'une activité complexe, qui appartient au domaine général de l'analyse spatiale, qui sert à résoudre un type particulier de problème spatial, la recherche de site apte à un 'opération d'aménagement particulière, et qui se réalise à travers des méthodes mathématiques d'agrégation de critères. Chaque volet qui participe à la conceptualisation et à l'application de cette activité est donc explicité. Or, si les aspects procéduraux sont centraux dans cette démarche d'analyse

spatiale multicritères, il ne faut pas oublier que le résultat est *cartographique*. Les spécificités sémiologiques de la carte d'aptitude sont alors présentées en détail, car les caractéristiques des représentations graphiques interpellent nos interrogations de recherche sur les mécanismes cognitifs de lecture et d'interprétation d'une carte.

- Le **Chapitre III** concerne trois études de l'activité de cartographie d'aptitude selon trois perspectives. Une perspective 'fonctionnelle' qui analyse comment les outils nécessaires à la résolution du problème spatial de localisation de site, sont organisés dans les SIG ; nous en avons examinés deux : Arcgis 10.1 et Idrisi. L'objectif étant de comparer les différences entre deux types d'approches d'aide à la résolution du problème, ce qui se reflète dans des architectures et ergonomies des SIG différentes. Une perspective 'conceptuelle' : cette analyse s'appuie sur un cadre théorique issu de la psychologie cognitive et appliqué à la didactique, celui des Champs Conceptuels. Il fournit une grille d'analyse pour décliner, à n'importe quel niveau granulaire de l'activité concernée, les concepts qui entrent en jeux, les inférences mobilisées, les opérations exécutées, les anticipations activées. Cette analyse constitue la première approche cognitive à l'activité, fournit un référentiel, et aide le chercheur à préconiser les éléments de la connaissance impliqués dans la cartographie d'aptitude. Pour finir, une perspective 'exploratoire' : une observation a été menée sur un groupe pilote d'étudiants résolvant un problème de cartographie d'aptitude, afin d'extraire des informations de terrain sur les difficultés et les erreurs rencontrés ainsi que sur les stratégies mobilisées.

  Ces trois perspectives sont dites 'préliminaires' car elles précédent et préparent la phase expérimentale de la recherche. A l'issue du chapitre III, les différentes analyses ont permis de définir le processus de réalisation, les variables, les obstacles et les subtilités de l'activité.

La Partie I fournit les tenants et aboutissants de l'activité qui fait l'objet de notre étude cognitif : nous pouvons formuler nos questions de recherche et concevoir le dispositif expérimental, développé dans la Partie II.

La **deuxième partie** comporte cinq chapitres.

- Le **Chapitre IV** annonce les questions de recherche qui régissent notre approche expérimentale et qui représentent le noyau dur de notre étude. Les notions de raisonnement spatial et visuel, de représentation et de schéma mental sont définies selon la littérature. La spécification de ces notions, permet de tracer une sorte de

passerelle entre le géographe qui, en s'appuyant sur la cognition veut comprendre la carte et le cognitiviste qui en s'appuyant sur la carte veut comprend le géographe. La littérature, notamment celle nord-américaine, a abondamment exploré ce lien entre géographie et cognition : nous nous appuyons sur les travaux d'A. MacEachren (1995) pour en présenter une synthèse. Néanmoins, en vue de la grande quantité de courants, d'approches, de domaines et sous-domaines de recherche développés depuis les vingt dernières années, nous présentons dans ce chapitre un effort d'éclaircissement des définitions employées, selon un ordre logique des mécanismes mentaux, tels que les psycho-cognitivistes les entendent : la perception, le traitement des informations, les raisonnements.

- Le **Chapitre V** décrit le protocole expérimental mis en place pour apporter des réponses aux questions de recherche. Une situation d'apprentissage a été conçue pour observer les étudiants agir dans des conditions dites 'authentiques'. Deux populations différentes d'étudiants, une issue des Géosciences Appliquée et l'autre issue de l'Ingénierie de l'Environnement ont suivi le module d'initiation à l'analyse spatiale multicritères avec ArcGIS, créé pour l'expérimentation. Le problème posé concernait la localisation des meilleurs emplacements pour l'implantation d'une station de ski en Isère. Les étudiants ont dû produire une cartographie d'aptitude pour répondre au problème donné. Afin de saisir les attitudes, les comportements, les discours, tout au long de leur activité de résolution, un dispositif de recueil de données a été mis en place : enregistrements audio et vidéo, productions et questionnaires. Parallèlement un protocole expérimental a été mis en œuvre pour observer, sur le même problème, l'activité d'experts. Si les modalités de ce dernier diffèrent, pour des raisons organisationnelles, de celles des étudiants, les conditions du recueil de données sont commensurables et permettent de mener une des principales analyses de cette thèse : la comparaison entre novices et experts.
- Le **Chapitre VI** est consacré à la méthode d'analyse des données issues de l'observation de l'activité des étudiants et des experts. Une grande partie de ce chapitre présente le cadre théorique de la méthodologie d'analyse des données verbales issues des enregistrements : les données verbales représentent le volume le plus important de nos données. Il s'agit concrètement de l'intégration d'analyse quantitative et qualitative pour les données écrites ou orales, proposé par Michelene T.H. Chi en 1997. 'L'analyse verbale' est une méthodologie pour quantifier le codage subjectif ou qualitatif des contenus des phrases. Essentiellement, cette méthode

permet, à travers le codage d'éléments verbaux (*verbatim*) propres à une idée, de concrétiser l'idée même, pour ensuite pouvoir en comptabiliser ou comparer les occurrences. D'autres analyses, de nature essentiellement qualitative, ont été conduites : la qualité des cartes d'aptitude produites a été évaluée selon une grille d'indicateurs conçue à partir des recommandations de Cauvin et Al (2007) relatives à la perception, la lisibilité et les règles de construction de la carte.

- Le **Chapitre VII** présente les résultats des analyses. Les résultats sont organisés par la typologie des données. A partir des données verbales écrites, issues des questionnaires, on obtient des résultats qualitatifs, des thèmes, qui correspondent à des concepts évoqués dans les réponses, et des résultats quantitatifs, les occurrences de chaque thème sur le nombre totale des réponses des étudiants. Les types de thèmes identifiés préparent le terrain pour les analyses des données orales. A partir des données orales, issues des enregistrements on obtient des résultats qualitatifs, des catégories taxonomiques des concepts et d'opérations de contrôle mobilisées, et des résultats quantitatifs, les occurrences de ces catégories. Le dénombrement des occurrences permet ensuite de mesurer les différences entre les experts et les étudiants dans le déploiement d'un concept.
- Le **Chapitre VIII** constitue la réponse aux objectifs 1 et 2 de la thèse, la discussion sur les résultats de l'expérimentation, attendus et nouveaux, et surtout sur l'intérêt d'identifier les points de divergence entre experts et étudiants afin de proposer des aides didactiques ciblés.

La **CONCLUSION** souligne les apports de la thèse, les limites et les perspectives de recherche. Une analyse des limites du protocole expérimental est présentée, elle est suivie par un 'analyse critique globale de la thèse. Cette analyse débouche sur les perspectives d'amélioration, de progression et d'innovation qui, comme dans tout travail de recherche, relancent le cycle d'investigation !

CHAPITRE I : L'ANALYSE DES BESOINS

Dans une perspective didactique, l'analyse des besoins est une démarche qui permet de recenser les domaines et la nature de connaissances à transmettre. Dans notre recherche, cette analyse est guidée par un double constat (Balzarini et Al., 2011): d'une part l'évolution des pratiques et des métiers géo-scientifiques suite aux développements technologiques et d'autre part le manque d'adéquation entre les nouvelles demandes professionnelles et la formation. Afin d'éclaircir et harmoniser les réels besoins en termes de formation aux professions géo scientifiques et environnementales, nous présentons dans ce chapitre, l'analyse menée pour identifier les compétences SIG les plus demandées et pertinentes dans les différents secteurs d'activité géo scientifiques. L'identification des besoins professionnels a été un préliminaire indispensable pour pouvoir concevoir des situations d'apprentissage ciblées et pour observer les stratégies des étudiants confrontés à la résolution d'une problématique crédible et proche de la vie professionnelle.

L'avancée des applications SIG dans les géosciences appliquées est indéniable, tant d'un point de vue des filières métiers (ex. : l'Hydrogéologie, la Géophysique appliquée, les Minéraux industriels) que d'un point de vue des compétences requises (Balzarini et Al., 2011). Plusieurs tâches et méthodes relèvent totalement de l'exploitation des SIG : l'élaboration et la mise à disposition de bases de données géo-référencées, la précision du positionnement des données l'acquisition de données, la visualisation 3D, la normalisation des données géographiques et l'utilisation interactive et la diffusion des cartes.. Or, dans les sciences de la terre, le SIG ne constitue pas une fin en soi, c'est donc la finalité d'usage qui constitue l'objectif et la vision du géologue est déterminante pour la structuration et l'usage d'un SIG. Un géologue maitrisant un SIG est en mesure de :

- gérer des données
- faire des analyses spatiales
- produire des nouvelles données
- éditer des cartes et des rapports

Mais, attentif à fournir une information de base pertinente, seul à même de donner la vraie valeur aux interprétations proposées, le géologue ajoute à la maitrise de ces compétences, sa

capacité à avoir un regard critique sur les données.
Il nous parait donc clair que l'acquisition des savoir-faire géomatiques, indispensables aujourd'hui à la pratique des métiers des géoscience, doit être assurée par les formations. Or, en examinant le contenu des masters en Sciences de la Terre et de l'Environnement dispensés en France dans les 35 établissements universitaires et écoles supérieures, on constate (Balzarini et Al , 2011) que les modules SIG, apparaissent plutôt en fin de cursus, ont un volume horaire limité et que les savoirs transmis sont dépendants de l'approche académique de l'enseignant. On observe d'une part une approche plutôt « thématique », visant à optimiser l'acquisition d'opérations SIG propres à des situations et des contextes professionnels spécifiques au détriment des aspects fonctionnels, et d'autre part une approche plus « informatique » où les opérations SIG sont plutôt proposées dans leur globalité et sélectionnées ensuite par rapport aux besoins professionnels.

Les principaux objectifs de cette analyse sont d'une part d'identifier les tâches les plus récurrentes dans l'utilisation des SIG dans les Géosciences et les Sciences de l'Environnement, et d'autre part d'identifier les compétences mobilisées pour la réalisation des tâches indiquées.

Pour atteindre ces objectifs nous avons analysé les descriptifs des secteurs des métiers et les contenus de stages des formations universitaires professionnalisantes. Les analyses documentaires conduites sont de nature thématique : la conception de grilles successives visant l'extraction de l'information a permis de mettre en évidence des procédés et des compétences propres à chaque métier. Mais avant d'effectuer l'analyse des métiers, nous avons établi une synthèse des référentiels de compétences géomatiques, afin de préciser les définitions.

1. Des référentiels de compétences géomatiques

L'appropriation de référentiels géomatiques est essentielle pour pouvoir associer et adapter des actions géomatiques à des actions géoscientifiques ; elle est également nécessaire pour valider, combiner et surtout formaliser des compétences géomatiques. La constitution d'un référentiel géomatique n'étant pas l'objet de notre démarche, cette phase a surtout consisté en une vaste recherche, afin de collecter les sources les plus fiables et exhaustives.
La recherche s'est effectuée sur des sources documentaires françaises, européennes et

américaines. L'analyse des sources françaises AFIGEO[6], INRP EducTICE, et Géorezo[7] bien que très exhaustives en matière d'identification de compétences SIG, ne fournissent pas des référentiels. Le réseau européen Herodot (Network for Geography in higher education), propose depuis 2009, « Un référentiel de compétences SIG: pourl'enseignement secondaire », qui reste trop élémentaire et général pour être utilisable à nos fins. En revanche, les ressources suivantes, peuvent constituer de solides bases de construction des définitions :

- « Geographic Information System Technician », Texas Skills Standards Boards, Mai 2007.

- « European Computer Driving Licence » (EDCL) Foundation, Certificazione Syllabus GIS, Aica & Uuiroma1 Labsita, Février 2007.

- « Les référentiels de compétences de l'activité géomatique dans les services du gouvernement », Service Géomatique et Télédétection(SGT) du Gouvernement de la Nouvelle Caledonie, Décembre 2008.

- « Geospatial Technology Competency Model », GIWIS, Employment and Training Administration United States Department of Labor, June 2010.

- « GIS &T Body of Knowledge » Edited by David DiBiase, et Al., AAG and UCGIS, 2009. Publié la première fois par l'Association des Géographes Américains (AAG) en 2006, il est le résultat de plus d'une décade d'efforts conduits par des chercheurs, des professionnels et des enseignants en Science de l'Information Géographique (GIScience), et représente une première compilation du large panel de compétences et concepts qui caractérisent le domaine des Systèmes d'Information Géographique. The GIS&T Body of Knowledge inclut 10 domaines de connaissance : les méthodes analytiques (AM), les concepts fondamentaux (CF), la cartographie et la visualisation (CV), la gestion de projet (DA), la modélisation de données (DM), la transformation des données (DN), les géo-traitements (GC), la typologie des données géographiques (DA), les Sciences de l'Information Géographique et la société (GS), les aspects organisationnels et institutionnels (OI). Chaque domaine de connaissance est décliné en unités. Une Unité est un ensemble cohérent de thèmes qui englobe les concepts, les

6

Colloque national « Métiers et Compétences en Géomatique », le 14 nov. AFIGEO La Lettre, Août / Septembre 2013 - N° 98

[7] Démarche Métiers : vers une reconnaissance des métiers de la géomatique http://georezo.net/wiki/main:formetiers:dem_metiers, 2013

méthodologies, les techniques et les applications représentatifs.73 unités sont définies, déclinées à leur tour en thèmes : un thème correspond à un seul concept, méthodologie ou technique ; chaque thème est défini en termes d'un ou plusieurs objectifs pédagogiques. Au total 329 thèmes et plus de 1600 objectifs pédagogiques, allant des méthodes d'analyse spatiale à la modélisation des données et à la diffusion sociétale, sont répertoriés dans le Bok. Ce référentiel spécifie ce que tout aspirant à une profession traitant l'information géographique a besoin de savoir et de savoir-faire. Cette ressource incontournable est donc utilisée pour planifier et structure les enseignements et les curriculums dans les programmes académiques et/ou professionnels, comparer et évaluer les contenus des programmes de formation pour les étudiants, harmoniser les certifications professionnelles et guider les professionnels des ressources humaines dans le recrutement et la sélection des employés, ainsi que dans le développement de la formation continue (GIS&T BOK, 2009, Traduction libre).

Après avoir analysé ces quelques documents de référence, nous retiendront, dans un souci de synthèse et de clarté, les entrées par compétences données dans les supports de formation ESRI (qui ont par ailleurs, contribué à l'élaboration du Geospatial Competency Model et au GIS&T BOK) pour ArcGIS I, II et Spatial Analyst, ainsi que les définitions des domaines du Body of Knowledge.

Niveau débutant:

- Explorer des données
- Examiner le système de coordonnées
- Créer et documenter les données (créer des classes d'entités)
- Mettre à jour les données (géométrie et attributs)
- Travailler avec les tables (définir les propriétés, faire des jointures et des relations)
- Répondre à des questions spatiales simples à l'aide de requêtes

Niveau élémentaire :

- Créer une géodatabase (comportements et insertion)
- Géo référencer une couche DAO
- Explorer les outils de géo traitement et de paramétrage
- Faire des analyses des données vectorielles
- Développer des projets d'analyse spatiale en utilisant les fonctionnalités d'analyse et les requêtes complexes

Niveau confirmé :

- Connaître les concepts sur les rasters (formats, résolution, référencement et, calage, statistique…)
- Connaître les principes de généralisation raster (extraction et échantillonnage, expansion,..)
- Savoir appliquer les concepts et les techniques d'Interpolation (krigeage..)
- Savoir créer des données dérivées avec les calculs de surface
- Savoir modéliser un réseau hydrologique grâce aux fonctionnalités de calcul Hydrogéologique
- Savoir faire des analyses de distance
- Modéliser une problématique spatiale (modèles de potentialité binaire et pondérée)

La finesse du détail des niveaux ci-dessus sera difficilement identifiable dans les descriptifs des postes et des emplois, mais elle nous permet de maintenir une ligne conductrice des connaissances, structurée et progressive. Cette structuration nous permet également de situer dans les différents niveaux les compétences repérées et de savoir quel est le palier de base attendu dans le milieu professionnel.

2. L'analyse des métiers

L'approche documentaire est une étape essentielle, qui nous a permis dans un premier temps, de cataloguer tous les métiers des géosciences selon les modèles donnés par les instances officielles, ainsi que leurs situations de travail génériques ; ensuite, dans chaque métier, nous avons pu dégager des activités liées aux pratiques géomatiques, afin de constituer des familles de compétences. Etant donné la variété et la complexité des métiers géo scientifiques, l'identification des compétences SIG demandées dans ces domaines s'est réalisée en deux parties essentiellement : une partie de recensement des métiers et de leurs tâches générales, réalisée à travers l'analyse des Fiches métiers de l'Union Française des Géologues (UFG) et des Profils métiers du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) et une partie de caractérisation détaillée des tâches, issue de l'analyse d'Offres d'emploi et d'entretiens avec des professionnels.

2.1. Les fiches-métiers de l'Union Française des Géologues[8]

Les fiches examinées sont issues du volet Métiers de l'Union Française des Géologues (UFG) et supportées par le Répertoire des Métiers du Pole Emploi, catégories ROME (Répertoire Opérationnel Métiers-Emploi). Le Répertoire ROME, Fiche F1105 Etudes géologiques et Fiche F1203 Direction et ingénierie d'exploitation des gisements et des carrières ont permis de reconnaitre 36 Appellations (type de métier), de repérer des activités et des compétences communes très génériques : elles institutionnalisent les contenus des Fiches UFG, mais pour leur nature très formelle, ne fournissent aucun élément d'analyse exploitable. Pour cette raison, la description qui suit ne concernera que les fiches UFG. Les Fiches de l'UFG ont permis d'identifier des situations professionnelles, des processus opératoires généraux et des domaines d'intervention spécifiques à chaque filière et à chaque métier ; néanmoins elles n'ont pas permis d'extraire des descriptions précises des compétences nécessaires à la réalisation de la(e) tâche(s) requise(s).

2.1.1 Description des fiches UFG

Un premier niveau de description concerne les 6 Filières Géo scientifiques, à l'intérieur des quelles tous les métiers sont répertoriés. Il s'agit de :

- Mines et Carrières
- Hydrocarbures
- Géophysique
- Géotechnique
- Hydrogéologie
- Environnement

Les descriptifs des filières présentent tous le même formalisme. Ils comprennent :

- L'historique qui présente de manière générale le domaine d'intervention et son évolution au fil des années. L'historique met l'accent sur les problématiques affrontées et sur les difficultés de gestion technique, méthodologique et humaine que les acteurs du secteur ont pu et peuvent rencontrer.

[8] Fusionnée avec la Société Française des Géologues

- Les activités principales : pour chaque filière, les activités et les pratiques communes à tous les métiers du secteur sont énumérées. Il s'agit, en règle générale, d'une suite de modes opératoires propres à la filière et que l'on retrouve, avec des niveaux d'application différents, dans tous les métiers.
- Les acteurs : il s'agit d'informations sur les acteurs concernés par un tel domaine d'activité : il s'agit principalement des établissements publics ou semi-publics qui opèrent dans le secteur et des sociétés privées, grandes et petites, qui interviennent à côté des structures publiques en support et/ou en sous-traitance ; aussi les grandes multinationales sont citées dans le cadre des gros travaux d'exploration/production.
- Les formations/emplois qui indiquent les parcours de formation à entreprendre pour viser les métiers de la filière choisie. Les grandes écoles d'ingénieurs, les universités, les instituts techniques, les Masters et les Doctorats de spécialité sont listés et proposés selon leur pertinence et leur prestige.

Un deuxième niveau de description concerne les métiers A l'intérieur de chaque filière ; il comporte :

- L'intitulé : appellation du métier ou titre officiel dans le descriptif d'un profil de poste.
- Le domaine : descriptions des domaines d'intervention et des missions à effectuer.
- Les tâches : les tâches sont explicitées avec un verbe à l'infinitif, qui illustre l'action, (ex. : faire une carte géologique) sans préciser l'enchainement des procédés soit d'un point de vue méthodologique que technique. Les compétences à mobiliser pour effectuer les taches et réaliser la mission ne sont pas décrites.
- La formation : les écoles d'ingénieur spécifiques au métier et les filières universitaires avec les titres nécessaires sont ici précisément indiquées
- La carrière : ce paragraphe expose les conditions d'évolution de carrière pour chaque métier.

2.1.2 Méthodologie pour le traitement des Fiches UFG

Le schéma présenté en Figure3 illustre la méthode d'analyse documentaire qui nous a permis d'extraire les informations relatives aux compétences générales d'une filière, puis spécifiques à un métier et ensuite à reconnaitre les éventuelles compétences géomatiques.

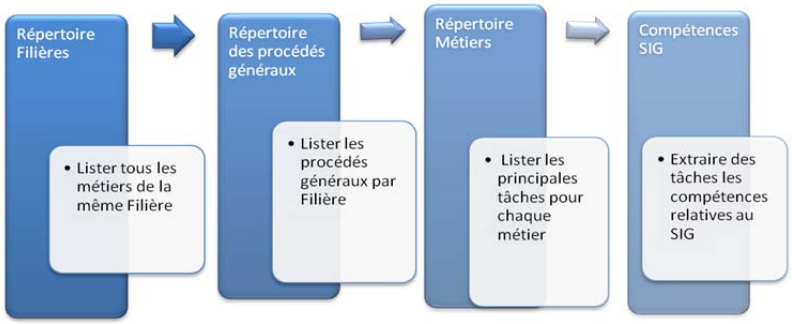


Figure 3. *Les étapes de l'analyse des fiches métiers*

La formalisation de l'extraction d'informations s'est faite par 3 tableaux successifs, allant du plus générique au plus détaillé.

Tableau 1. L'analyse des fiches-métiers nous a permis de proposer des répertoires par filière. Les différentes appellations métiers pour chaque filière ont été répertoriées. Les intitulés en bleu indiquent le même métier qui apparait dans deux filières. Le tableau ci-dessous présente les répertoires.

Filières	**Métiers principaux et spécialités**
1. L'Hydrogéologie	1. enseignant-chercheur 2. hydrogéologue d'administration et d'agence de l'eau 3. hydrogéologue de collectivité territoriale 4. hydrogéologue BRGM 5. hydrogéologue de bureau d'études 6. hydrologue
2. La Géophysique appliquée Exploration / production des hydrocarbures :	7. Géophysicien d'acquisition. 8. Géophysicien de traitement. 9. Géophysicien d'interprétation et de synthèse. 10. Géophysicien de gisement. 11. Géophysicien Méthode ou de Recherche et Développement
Géothermie -Mines - Hydrogéologie	12. Ingénieur géophysicien
Géotechnique et génie civil	13. Ingénieur d'application
	15. Chercheur - Enseignant-chercheur 16. Ingénieur d'étude et de recherche en physique du globe

Filières	**Métiers principaux et spécialités**
3. Les Mines et carrières	17. Géologue d'exploration 18. Directeur de l'exploration 19. Géologue d'exploitation 20. Géologue environnement et foncier 21. Géophysicien minier 22. Consultant
4. Les Hydrocarbures Géologie :	23. Géologue d'opérations 24. Géologue de spécialité 25. Géologue d'interprétation et de synthèse 26. Géologue de gisement
Géophysique :	27. Géophysicien d'acquisition 28. Géophysicien de méthode et recherche 29. Géophysicien de traitement 30. Géophysicien d'interprétation et de synthèse 31. Géophysicien de gisement.
Gisement	32. Ingénieur réservoir
5. La Géotechnique	33. Géotechnicien assistant au maître d'ouvrage. 34. Géotechnicien de maîtrise d'œuvre (bureau d'études…). 35. Géotechnicien d'entreprise de bâtiment et travaux publics 36. Géotechnicien d'entreprise de sondage. 37. Géotechnicien de bureau de contrôle. 38. Géotechnicien de laboratoire. 39. Géotechnicien de travaux pétroliers.
6. La gestion de l'environnement	40. concepteur, maître d'œuvre qui correspond à une fonction d'ensemblier conducteur de travaux (chantiers) ; 41. spécialiste de l'acquisition des données et de l'appareillage) 42. gestionnaire de bases de données (BD) et de (SIG) 43. hydrogéologue (de bureau d'étude) 44. géophysicien 45. modélisateur 46. géochimiste 47. géotechnicien 48. ingénieur de procédés

Tableau 1 *Répertoire Métiers*

Tableau 2. Identification des procédés généraux par filières : nous avons comparé les différents procédés pour focaliser les éventuels points et étapes communes. On observe l'identification de situation(s) professionnelle(s) (Tableau 2) et une définition de procédés (modes opératoires) pour chaque filière (Tableau 3), comparables les uns avec les autres. On remarque que le déroulement des modes opératoires mis en ouvre en géophysique, hydrogéologie et environnement présente des similitudes: des phases d'analyses préalables, sont suivies par des moments d'acquisition de données, de traitement et de validation pour aboutir à des phases d'enquête, d'exploration et d'interprétation finale. Bien que l'on suppose l'application ponctuelle de compétences géomatiques dans ces différentes phases, ces compétences sont évoquées très rarement et de façon succincte tout au long des descriptions.

Filières	**Géophysique appliqué**	**Hydrogéologie**	**Environnement**
Situations	Les compétences du géophysicien dans le cadre d'expertises environnementales sont : savoir définir le problème posé, choisir les techniques et le programme de mesures, acquérir des mesures, les traiter, interpréter et formaliser un rapport.	appréhender l'ensemble du cycle de l'eau : précipitations, ruissellement, infiltration, stockage et évolution, restitution au milieu, etc.	Le classement des domaines concernés par l'environnement peut se faire selon différentes logiques : - les milieux (eau, sol, air) ; - les objets d'aménagement : centre de stockage de déchets, sites pollués et friches, mines et carrières, - les modes de dégradation des milieux : pollution ponctuelle, diffuse, accidentelle...

Tableau 2 *Exemple de situations métiers et procédés généraux pour 3 Filères : Géophysique, Hydrogéologie, Environnement*

Procédés	**Géophysique appliqué**	**Hydrogéologie**	**Environnement**
Etape 1	Exposé du problème à résoudre	Gestion du Cycle de l'eau , la collecte de données de qualité, la maitrise d'outils de gestion (BD)	Conception, démarche de haute qualité environnementale (HQE), études d'impact, Conception de mesures ou d'instruments, analyses *in situ* ou en laboratoire,
Filières	Géophysique appliqué	Hydrogéologie	Environnement
Etape 2	Choix des paramètres physiques Imagerie et télédétection		Réalisation Gestion des informations et systèmes d'information géographique (SIG), modélisation, procédés de traitements
Etape 3	Acquisition des données Maitrise des techniques d'imagerie et de traitement d'images spécifiques	Gestion informatique des mesures et de leurs résultats	
Etape 4	Traitement des données	Maitrise de la modélisation et de la visualisation	
Etape 5	Interprétation géophysique des résultats		Surveillance
Etape 6	Contrôle et calibration par des moyens directs d'investigation		
Etape 7	Interprétation géologique synthétique Production des cartes	Accès cartographique aux données	Arrêt et mise en sécurité en fin de vie.

Tableau 3 *Exemple de Situations métiers et procédés généraux pour 3 Filères : Géophysique, Hydrogéologie, Environnement*

Tableau 3. Création des répertoires par Métier. Nous avons créé des tableaux des principales tâches des procédés, à partir des Métiers par Filière (voir Annexe I). Le tableau ci-dessous est

un des 6 tableaux réalisés pour extraire les compétences de chaque métier ; il s'agit ici de la filière Hydrogéologie. Les lignes correspondent aux métiers indiqués dans la fiche filière ; la première colonne indique, par rapport au déroulement des phases vues plus haut, la situation-métier, les colonnes suivantes représentent l'enchainement des tâches, pour un processus qui se lit de gauche à droite (voir flèche Tableau 4).

Métier :	**Compétences décrites**					
Hydrogéologue	Situation	Procédé →				
2. d'agence d'eau	Gestion de la ressource et des réseaux	Définition des besoins Mise en place des règles de gestion	Surveillance piézométrique Production des données		Validation des données	Valorisation communication des données
3. de collectivité territoriale	Recherche et protection de ressources		Collecte des données de terrain :	Meise en forme Conservation des données	Processus de décision Vérification	
4. au BRGM	Modélisation visualisation (2D, 3D)		Acquisition Analyse des données de terrain Interprétation Validation	Gestion des réseaux Structuration de l'information (atlas, SI, BD)	Elaboration de synthèses Création de cartes de vulnérabilité	Rédaction de documents d'aide à la décision Communication Expertise
5. de bureau d'études	Campagnes piézométriques	Diagnostic	Evaluation des ressources – Collecte Exploitation des données Validation	Gestion des bases de données	Exploitation des données Validation	Expertise

Tableau 4 *Filières Hydrogéologie : quelques exemples de compétences générales par métier.*

Nous avons comparé les différentes tâches-métiers et mis en évidence des compétences communes et/ou semblables. Par exemple, une synthèse des tâches communes aux métiers en hydrogéologie comporte : l'acquisition des données, leur structuration dans des Bases de Données, l'utilisation de logiciels spécifiques, l'interprétation et l'analyses des données, évaluations, des travaux de synthèse et des bilans finaux .

A l'issue de la comparaison de tous les métiers de toutes les filières, une dizaine de compétences géomatiques sont identifiées (spécifiées dans les tableaux filières en Annexes I), il s'agit essentiellement de :

- Savoir structurer les données et l'information (BD et SI)
- Savoir gérer les données
- Savoir spatialiser les données et effectuer des analyses spatiales (cartes de synthèse et de vulnérabilité).
- Savoir appliquer des choix multicritères pour définir la potentialité d'un site
- Savoir éditer des rapports contentant des cartes
- Savoir évaluer des risques
- Savoir élaborer et traiter de Modèles Numériques de Terrain
- Savoir modéliser la surface d'un bassin versant, d'élaborer des modèles de pente..
- Savoir traiter l'imagerie selon les techniques et les procédés SIG
- Savoir réaliser une carte thématique ou d'analyse.

Afin d'enrichir et approfondir le panel d'information collecté, d'autres ressources documentaires sont à analyser. Les profils métiers du BRGM, qui est la plus importante institution géologique française ainsi que les offres d'emploi peuvent nous aider à affiner notre recherche des tâches SIG.

2.2. Les profils métiers du Bureau de Recherches Géologiques et Minières

Le rapport « Stratégie du BRGM pour 2020 » de J. Varet, publié en 2008, met l'accent sur les huit axes thématiques que le BRGM s'engage à développer dans les 10 ans à venir. Il s'agit de :

1. La connaissance du sous-sol : 3D / 4 échelles ; régolite:
2. Le stockage géologique du CO2 : connaissance des gisements et sécurité
3. Les ressources en eau : quantitative et qualitative, phénomènes de transferts; gestion prospective
4. Les ressources minérales et énergie : métallogénie, minéralurgie et métaux rares, chauffage en métropole…
5. Les risques naturels : risques mouvements de terrains, sismiques, littoral…
6. Les risques anthropiques : après-mine, sites pollués/déchets…
7. Les nouvelles méthodes d'investigation : Systèmes d'observation (sol, air, spatial) : métrologie, géophysique
8. Les Systèmes d'information : interopérabilité, mémoire, conservation, sécurisation.

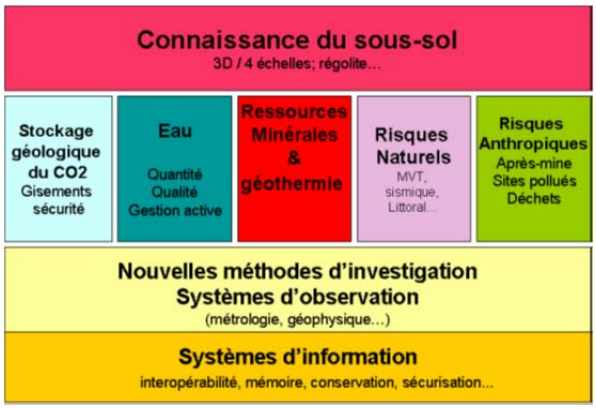


Figure 4 *Cartographie des 8 axes thématiques du BRGM pour 2009-2020(Varet, 2008).*

L'organisation en 8 axes présentée par le BRGM (Figure4) ne correspond pas tout à fait à celle en 6 filières donnée par l'Union Française des Géologues (UFG). Les domaines du BRGM semblent mieux préciser les différentes situations de travail et les missions associées ;

néanmoins, au niveau des intitulés des métiers on retrouve au BRGM les appellations officielles trouvées dans les fiches UFG.
Le site web du BRGM (http://www.brgm.fr/) présente en effet les missions des 10 domaines, mais ne fournit pas un descriptif détaillé des compétences nécessaires à la réalisation de telles missions : pour cela il faudra pouvoir obtenir des fiches de poste ou consulter les offres d'emploi.

Une différence remarquable dans les profils métiers des deux structures (UFG et BRGM) réside dans la définition des Systèmes d'Information comme d'un domaine à part entière au sein du BRGM, avec des missions bien identifiées (architecture, conception, développement et administration de bases de données, InfoTerre portail d'accès aux informations du sous-sol, Interopérabilité et Réalité virtuelle) et des applications de plus en plus transversales. Au sein de l'UFG, les SI sont supposés exister mais ils ne sont jamais explicités, sauf dans le cadre d'un seul métier, dans la filière Environnement, le concepteur et gestionnaire de BD et de SIG ; cette fiche métier décrit les tâches générales que un sigiste est tenu à assumer.

La présence d'un domaine consacré aux SIG au BRGM se justifie par l'importante politique d'appui aux services publics et à la collectivité, que le BRGM assure en recueillant, exploitant et diffusant les informations sur le sol et le sous-sol auprès des collectivités, des aménageurs, des décideurs, de la communauté scientifique et du grand public.

2.3. Les offres d'emploi

A travers l'analyse des descriptifs des entreprises et de leurs offres d'emploi, nous estimons pouvoir reconnaître et cataloguer les profils de poste présentant des connaissances/compétences en SIG. Deux pistes d'investigation ont été mises en œuvre : une analyse de toutes les offres affichées sur les trois plus importants sites d'emplois des métiers environnementaux français, ce qui nous a permis d'observer un grand nombre de demandes issues d'entreprise de tailles différentes; une analyse des offres des quelques unes des plus grandes sociétés françaises, représentatives des différents secteurs d'activités à partir de leurs sites web. Les sociétés et compagnies analysées sont affichées dans le volet Partenaires du site de l'UFG. Aucune des entreprises de moyenne et petite taille observées[9], n'affiche l'apport

des SIG dans la réalisation de leurs missions. Certaines sociétés (telle que SOGREAH) présentent les moyens informatiques dont elles disposent, mais dans la grande majorité des cas, il s'agit de logiciels de modélisation spécifiques au champ d'activité et il ne s'agit pas de SIG. La multinationale TOTAL consacre un domaine à part entière aux Systèmes d'Information Géographique, indiqués comme « métiers transversaux ».

Les offres ont été consultées pendant la période du 1/11/10 au 30/12/10, dans les sites :
Sites d'emploi :
- Revue Géologues en ligne
- Envirojob
- Emploi-environnement
- Réseau-tee

Sites d'entreprise :
- Burgeap
- ANTEA
- Sogreah

Burgeap, ANTEA, Sogreah, sont représentatives des grands bureaux d'études en ingénierie de l'environnement
AREVA représentative des secteurs de l'extraction minière et de l'énergie nucléaire
TOTAL, représentative de l'industrie des hydrocarbures
BRGM, représentatif de l'instance publique en géosciences en France.
A partir des quatre sites d'emploi « environnement », seulement 15 offres ont été retenues pour les demandes clairement géomantiques qu'elles affichent. Une synthèse de l'analyse est donnée dans le tableau 4 : seules les compétences relevant des SIG sont indiquées ; le tableau complet est disponible en Annexe I.

Section	**Nombre d'offres**	**Tâches générales**	**Pré-requis**
Génie civil	1	Pas de précisions	Diplôme dessinateur et connaissances en SIG
Aménagement du territoire/ Environnement	5	-Acquisition et/ou validation des données -Intégration dans des BD (ACCESS) - Restitution cartographique - Synthèse des cartes réalisées	Bonne maîtrise des outils informatiques en bureautique base de données et SIG (Mapinfo). Connaissances générales en cartographie, urbanisme/aménagement et environnement, recherche documentaire
Hydrogéologie	5	-Bibliographie, investigations de terrain - Gestion BD - Synthèse et interprétation des données via une cartographie SIG; - Cartographie SIG ; - Calculs hydrauliques et modélisation numérique - Réalisation de plans	Maîtrise des techniques de production/valorisation des données sur l'eau et des outils de synthèse pour la production de cartes thématiques
Géologie/ géotechnique	4	- Recueillir et à organiser les informations - Compiler les données dans une base de données - Contribuer à l'analyse critique des données - Réaliser la carte de synthèse	Bonne maîtrise des SIG et des outils terrain (GPS) - Géoréférencement, - Création de données, - Mises à jour de données, - Production cartographique. - Reprise de projet cartographique - Interpolation

Tableau 5 *Synthèse des informations issues des offres d'emploi*

Pour la période observée, les sites emploi des sociétés Burgeap et AREVA ne présentent pas l'offre de postes avec des compétences SIG ; ANTEA recherche un poste de technicien des sites polluées avec des connaissances en SIG ; SOGREAH, dans son volet gestion de l'eau, recherche deux postes relevant de compétences en SIG, dont 1 pour ingénieur en hydraulique fluviale ; TOTAL, dans son volet SI et Telecom, propose plusieurs stages où les SIG sont impliqués : les profils des candidats relèvent des écoles d'ingénieur et grandes écoles (en

informatique et/ou en géosciences) ; les offres relatives aux géophysiciens juniors ne semblent pas insister sur des connaissances en SIG ; en revanche, toutes les sociétés de service spécialisées en acquisition et traitement de données géophysiques (diagraphies, Full Wave Sonic log..), sous-traitantes souvent des grandes industries pétrolières, présentent des applications SIG (vectorisation, géoreferencement) et demandent de telles compétences pour les jeunes géophysiciens recrutés. Contrairement aux précédentes structures, le BRGM demande presque systématiquement dans toutes ses offres de stage des applications SIG, particulièrement en géologie, reconnaissance du sol et sous-sol et en hydrogéologie. A l'issue de cette première observation des offres d'emploi, on peut remarquer que trois principaux secteurs semblent nécessiter des compétences SIG :

- l'aménagement du territoire,
- l'hydrogéologie,
- la géologie.

Ces secteurs présentent des besoins communs (gestion des flux des données, traitements et cartographie), mais des éléments d'analyse bien différents. Nous pouvons trouver dans le Rapport « Stratégie du BRGM pour 2020 », un appui à notre identification des domaines : en effet, le rapport montre (voir Tableau 6) que les sociétés d'études en eau, environnement et géotechnique constituent le secteur avec le plus haut nombre d'emplois ; par rapport au Tableau 5, indiquant les caractéristiques des offres d'emploi observées, on remarque que ces mêmes secteurs sont ceux où la demande en SIG est la plus forte. La demande en emploi et la demande en applications SIG vont probablement *di pari passo*, si l'on considère que les SIG s'imposeront dans les années à venir, dans le monde du travail, au même titre que toute autre nouvelle technologie (Varet, 2008).

Répartition globale des géologues (UFG, Décembre 2006 actualisé)		
Secteur	**Nombre**	**Pourcentage**
Enseignement universitaire public et privé	900	14,8
Écoles Ingénieurs	170	2,8
CNRS ST	600	9,9
IRD, IFREMER, MNHN	140	2,3
BRGM	310	5,1
TOTAL Enseignement supérieur – recherche	**2 120**	**34,9**
Sociétés d'études et travaux : eau, environnement, géotechnique	1 500	24,8
Hydrocarbures (dont IFP)	1 400	23,1
Equipement	140	2,3
Organismes divers (ANDRA, CEA, IRSN, SNCF…)	150	2,5
Mines, Carrières et TP	300	5,0
Hydrogéologues Fonction publique et Agences Eau	100	1,6
Parcs, Maisons, Musées, CCSTI, etc.	150	2,5
Divers	200	3,3
TOTAL général	**6 060**	**100**
Enseignement secondaire	**2 800**	

Tableau 6 *Répartition globale des géologues par catégories d'employeurs en France (source UFG, 2006, actualisé)*

Un autre élément qui conforte notre sélection est la position de l'UNICEM (Union Nationale des Industries des Carrières et des Matériaux de Construction), qui dans le même rapport, souligne que « bien qu'il ne soit pas possible de fournir un chiffrage précis de la demande dans les métiers des géosciences, on peut affirmer que celle-ci ne faiblira pas et restera soutenue sur la période. Les profils qui seront le plus recherchés sont les suivants :

- géologue pour la recherche de sites propices (stockage de déchets et production de l'industrie minérale) et pour la connaissance des supports des travaux de fondations, d'implantation (par exemple d'éoliennes), et de portances des sols et du sous-sol (par exemple retrait-gonflement sols argileux) ;

- hydrogéologues pour l'élaboration du diagnostic et l'évaluation des nappes phréatiques, notamment en lien avec les travaux de prévention des crues ; ces missions sont conduites en lien avec les hydrologues, pour l'étude des bassins versants et des bassins d'expansion (ruissellement, infiltration, confluences, vitesse d'écoulement, modélisation des ondes de crues…).

Parmi les développements attendus, sont cités, outre la géothermie, le stockage du CO2 et généralement les métiers de la mesure (de terrain et de laboratoire), de calcul (simulation, modélisation, représentation…) et de traitement numérique des données satellitaires (interprétation, cartographie, superposition et fusion de données multi-sources…) notamment dans l'optique de développer des modèles prédictifs » (Varet, 2008).

2.4. Bilan sur les profils métiers

En vue de tous les éléments (voir Annexe I) analysés, nous retenons que :

- l'analyses des fiches métier de l'UFG nous a permis d'identifier des situations professionnelles, des modes opératoires propres à un domaine d'activité. Les appellations des postes sont très précises et balisées, mais les descriptifs mélangent souvent missions et tâches.

- l'analyse des profils métier du BRGM et de son orientation stratégique pour 2020, nous a permis de mieux cerner quels domaines thématiques seront développés dans l'avenir proche, et par conséquent, quels métiers seront les plus demandés sur le marché du travail. Aussi, à travers le BRGM nous avons eu confirmation du rôle indiscutable de la géomatique au sein des activités géo scientifiques : les Systèmes d'Information Géographique constituent un axe thématique à part entière et en même temps une couche commune et transversale, qui peut intervenir dans les différentes branches. Les appellations des postes proposés par le BRGM ne correspondent pas précisément aux appellations des fiches UFG : les premiers sont plus génériques et indiquent plutôt un domaine (filière).
- L'analyse des offres d'emploi nous a permis d'identifier essentiellement trois secteurs d'activités dans lesquels émergent des tâches géomatiques et de les catégoriser par secteur. L'analyse du rapport sur les stratégies du BRGM en vue du 2020, nous a permis d'apercevoir une correspondance entre les trois secteurs retenus et les principaux secteurs prévus en expansion.

Compte tenu de tous les éléments considérés plus haut, il nous parait important de poser les considérations suivantes :

1. le secteur de la géophysique appliquée (terre solide), ne constitue pas une véritable filière, mais plutôt un métier- « outil » appliqué à différents domaines. Il concerne

toute action d'exploration et de reconnaissance du sous-sol et comporte des applications SIG très pertinentes qu'il s'agit d'exploration de surface ou profonde. En effet, l'exploration comprend plusieurs phases en chaine : l'analyse documentaire à priori, l'acquisition de données de nature différente, la gestion des flux des données, les traitements (interpolations..), l'utilisation incontournable des logiciels 3D modeleurs et leur couplage avec les logiciels 2D, l'analyse des résultats par cartographie. Aussi, ce domaine est suffisamment transversal pour couvrir différents métiers et plusieurs missions et il se prête à la réalisation d'études de faisabilité et de potentialité, assurées par l'application de méthodologie d'analyse spatiale offerte par les SIG. Il est intéressant de remarquer l'aspect transversal que le BRGM, en vue des ses axes d'intervention pour l'horizon 2020, attribue parallèlement à la connaissance du sous-sol, aux nouvelles mélodes d'investigation et aux systèmes d'information (géographique).

2. le secteur de l'hydrogéologie est sans doute plus « social » et connu du précédent, pour ses problématiques notamment liées aux questions de risques naturels. On reconnaît des phases importantes de gestion et d'acquisition des données, des phases de traitements moins explicitées, de simulation avec la même incontournable exploitation de logiciels spécifiques de modélisation 3D, et d'analyse. Mais ici l'aspect cartographique lié à la vulnérabilité du territoire est surement plus présent qu'en géophysique appliquée. En revanche, il semblerait que les analyses de potentialité/faisabilité soient moins développées.
3. le secteur de la gestion de l'environnement ne présente pas des modes opératoires précis, mais est celui qui, dans les offres d'emploi, explicite au mieux la nécessité de réaliser des tâches SIG et par conséquent, de maitriser des connaissances géomatiques. Il est important de souligner que les candidats aux emplois liés à l'environnement ne sont pas exclusivement des géoscientifiques, très souvent, il s'agit de géographes.

A l'issue de cette phase nous avons répertorié une dizaine de compétences SIG requises dans les métiers des Géosciences. En nous basant sur les Référentiels Géomatiques ces compétences relèvent en partie du niveau « Elémentaire et en partie du niveau Confirmé » (en référence à la nomenclature ESRI). Nous avons également circonscrit ces compétences à trois secteurs d'application préférentiels.

Les offres d'emploi ont été observées sur une courte période (2 mois environ) : il serait plus

pertinent de pouvoir les observer sur une année entière.
A ce stade de l'analyse, il est intéressant et nécessaire de discuter avec des acteurs des secteurs retenus, pour aller plus loin dans la compréhension et perception des actions SIG.

2.5 Les entretiens avec les professionnels

Ces considérations nous amènent à chercher des informations plus précises auprès des professionnels sur le déroulement de projets hydrogéologiques, géologiques et en aménagement du territoire ; dans ces projets, nous essayons de comprendre à quels stades les SIG sont impliqués et utilisés pour répondre à certaines problématiques de projet. Pour cela, nous avons envisagé d'interviewer des professionnels pour saisir leur façon d'œuvrer dans un projet/ chantier et sur leurs usages des SIG dans ce contexte.

L'objectif des entretiens est de faire ressortir le type de projet (problématique et taille) et les phases du projet dans lequel les applications SIG interviennent. Nous avons mené quatre interviews individuelles dirigées auprès de professionnels provenant d'un bureau d'étude en géotechnique, une société de gestion de l'eau et un laboratoire de recherche en problématiques médiales et territoriales de montagne, enregistrées et guidées par une grille d'entretien. L'analyse thématique des transcriptions des interviews, montre que les applications géomatiques répondent à des problématiques de structuration de données de différente nature, de géo référencement, de mise en relation spatiale des données et de localisation d'objet (par ex. en Géologie, d'une grotte) ; les applications techniques comportent pour la plupart des opérations de conversion de format, des requêtes, des calcul de proximité et la vectorisation d'objets géographiques existants.

Les entretiens avec les professionnels n'ont pas permis de recueillir des informations de qualité. En effet, très peu de professionnels ont répondu à notre demande. Pour cette raison, nous avons décidé de chercher l'information dans d'autres sources. Les mémoires de stages de fin d'étude des Master 2 Professionnels (M2P), nous ont paru être un panier pertinent et complet pour identifier les typologies de projets traités avec les SIG. Ces mémoires offrent une palette intéressante de types de missions traitées.

3. L'analyse des rapports de stage des formations professionnalisantes#

L'objectif de cette analyse est de reconnaitre quels types de projets géologiques font appels aux connaissances SIG et via quelles applications. Pour cela, nous avons analysé les rapports de stage des années 2008-2010 du Master 2 en Sciences du Territoire et de l'Environnement de l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble (Université Joseph Fourier), mentions « Géologie, Exploration et Risque » (GER) et « Eaux Souterraines »(ES). L'analyse des rapports s'est faite à partir de la lecture des manuscrits et l'extraction des segments textuels relatifs aux démarches et méthodes SIG appliquées dans le contexte du stage. A fin de formaliser l'information, une grille d'analyse a été conçue indiquant le nom du stagiaire, l'entreprise, la dominante thématique, l'intitulé du stage, les démarches et les fonctionnalités SIG déployées. Une synthèse de l'analyse est présentée dans le Tableau 7.

Année académique	**Nombre rapports par spécialité**	**Rapports utilisant SIG**	**Dominante du projet**	**Type de tâche associée à la dominante**
2009-2010	16 GER	7	Géologie	Cartographie du sol et sous-sol (cartographie thématique) Numérisation des formes et objets Transformations des données Inventaire de données
	19 ES	2	Risque	Cartes de vulnérabilité
2008-2009	12 GER	3	Risques	Cartographie géologique Cartes de susceptibilité, d'analyse et synthèse
	19 ES	...0.		

Tableau 7 *Synthèse de l'analyse des rapports de stage M2 Pro*

On observe que l'année 2009-2010 marque une nette augmentation du nombre de stages qui nécessitent l'utilisation des SIG et dont les projets concernent des applications méthodologiques d'identification de sites (zones) avec des fonctionnalités propres aux méthodes d'analyse spatiale multicritère. Le Tableau 8 résume les typologies des projets par mention, les applications méthodologiques et les applications techniques mobilisées dans les stages.

Type de projet	**Pour répondre à … (applications méthodologiques)**	**…avec ces fonctionnalités (applications techniques)**
GER cartographie	Constitution d'atlas, inventaires, cartes géologiques	Vectorisation, rastérisation
GER susceptibilité	Identification de zones à risques, ou susceptible à un phénomène, par sélection de paramètres	Création de classes, choix de paramètres, attribution des poids, reclassification, somme
ES vulnérabilité	Identification de zones à risques, ou susceptible à un phénomène, par sélection de paramètres	Création de classes, reclassification, choix de paramètres, somme

Tableau 8 *Synthèses des tâches identifiées dans les rapports de stage M2*

Le bilan des tâches SIG demandées lors des missions de stage pour des jeunes futures géologues, met en évidence le besoin de compétences en:

- modélisation des données spatiales de nature différente (vectorisation et rastérisation) ;
- structuration des données dans les géodatabases, gestion des formats, création de cartes thématiques ;
- spatialisation d'objets géographiques sur des cartes;
- géo-traitements en analyse spatiale ;
- discrétisation, classement et pondération de données ;
- interprétation des cartes ;
- réalisation de documents cartographiques.

Notre répertoire des compétences trouve appui dans la littérature de la didactique des géosciences (Workshop 2002, NSF and JF), qui, reconnait trois domaines de connaissance : le temps géologique, le système complexe de la Terre, la visualisation des formes et des objets. Dans la conception de situations d'apprentissage il faut considérer que ces 3 processus se mélangent et se construisent à travers :

- l'observation de terrain et l'acquisition de données in-situ ;
- la manipulation de données (souvent multi source) ;
- l'organisation des données ;
- la création de données dérivant de modèles et simulations ;
- le traitement ;
- la visualisation et la représentation de données (2D et 3D, graphes..) ;

- l'usage des technologies numériques de représentation et traitement de données.

Cette phase d'analyse des stages lors des formations professionnalisantes, nous a permis d'identifier la géologie comme étant le principal secteur d'usage des SIG, la numérisation cartographique (carte géologique, structurale..) et la cartographie de susceptibilité/vulnérabilité comme étant les principales tâches demandées par le monde du travail aux jeunes géologues et l'analyse spatiale multicritère comme étant une des principales méthodes d'analyse pour la création de cartes de susceptibilité. Nous présentons dans le paragraphe suivant les caractéristiques générales de cette cartographie.

4. La production cartographique en Géosciences

Ce paragraphe ne constitue pas une dissertation sur la cartographie en Géosciences, car cette approche constituerait une thèse en elle-même. Nous présentons ici quelques considérations sur l'évolution des pratiques de la cartographie numérique an sein du métier du géologue, en abordant la carte géologique et la carte de susceptibilité. Le Chapitre III présentera une étude des savoirs liés à la cartographie de susceptibilité réalisée avec des méthodes d'analyse spatiale multicritères.

Le rôle dévolu à la cartographie géologique a profondément changé depuis le XIX° siècle, avec l'apparition de nouveaux besoins liés à l'évolution de notre société, des modes de vie et des contraintes planétaires. Elle reste le document de référence qui synthétise au mieux l'état des connaissances du sous-sol depuis la couche superficielle jusqu'aux roches sous-jacentes. La conception d'une carte géologique implique en préalable la sélection des données disponibles et un choix de représentation : par sa nature même toute carte géologique impose une démarche sélective, donc réductrice. Depuis une vingtaine d'années, la cartographie géologique a l'opportunité de stocker et ordonner l'ensemble des données collectées, dans des systèmes d'information géographique. Dans un SIG, tous les points, lignes ou surfaces constituant les cartes deviennent autant de composants numériques auxquels on peut associer tous les attributs descriptifs ou analytiques dont on dispose. L'avantage de ces bases de données cartographiques est de pouvoir décliner des cartes « thématiques » plus adaptées aux besoins spécifiques de chaque utilisateur. Le développement technologique considérable de ces dernières années (images satellitaires, cartes géophysiques) a contribué à introduire plus de rapidité, de cohérence et de précision dans l'élaboration des cartes géologiques. Il n'en

reste pas moins que la cartographie géologique restera une science de l'observation, nécessitant en amont une culture scientifique qui fait appel à l'intuition, la déduction et à la curiosité (Baudin et Al., 2010).

Si la carte géologique est le modèle de représentation des terrains affleurant à la surface de la Terre, qui reste le document de référence pour tous les utilisateurs de l'information géoscientifique, la carte prédictive, de susceptibilité ou vulnérabilité, qui analyse et répond à une problématique d'impact environnemental est aujourd'hui un des outils à disposition du géologique.

« Comment évaluer l'impact du développement d'une zone industrielle sur la protection d'une ressource naturelle? Comment estimer les conséquences de la construction d'un pont ou d'un tunnel transfrontalier sur les besoins en matériaux ? Les contraintes environnementales de gestion et de protection de la ressource en eau souterraine, de prévention des risques naturels et d'aménagement exercent une pression de plus en plus forte sur la gestion de l'espace souterrain et donc sur l'exercice des géosciences. Le géologue est ainsi confronté à la double exigence de bâtir son modèle et de mettre sa connaissance à la portée des non spécialistes […]. Répondre aux besoins des utilisateurs conduit le géologue à intégrer dans les SIG de nouvelles sources de données et à les traiter différentes méthodes analytiques […].

Dans le cas des études liées à l'évaluation ou à la protection d'une ressource naturelle, les données géologiques sont amenées à être croisées avec des données environnementales et socio-économiques. Cette évolution impose aussi au géologue de s'ouvrir à des nouvelles compétences en Systèmes d'Information Géographique, permettant :

> la génération d'informations nouvelles résultant du croisement et de la modélisation de données et informations de sources diverses et indépendantes ;

> la réduction de l'incertitude géologique, notamment liée au gain de précision apporté par le référencement spatial ;

> la mise à disposition d'un référentiel géologique numérique et géographique « haute résolution » pour la réalisation de modélisations plus fiables et la définition de scénarios ;

> l'accès à des moyens d'analyse de la donnée et de traitement de l'information de plus en plus performants, mettant en œuvre des puissances de calcul et de combinaison inégalables par les méthodes analogiques, et inconcevables il y a encore quelques année » (Ledru, 2007).

De l'acquisition de la donnée sur le terrain et en laboratoire à la prise de décision par les instances compétentes, les différentes phases d'analyse et de modélisation propres au processus de traitement de l'information géo-scientifique peuvent être conceptualisées (Ledru,

2007). Le traitement de la connaissance géologique, une fois standardisée et intégrée dans des systèmes d'information, converge vers la prise de décision : cette dernière phase devient, dans la plupart des problématiques de terrain, l'objectif final du processus (Ledru, 2007).

La cartographie et les analyses de susceptibilité (Malczewski, 2004) constituent une des applications SIG la plus exploitée pour la planification et l'aménagement du territoire. Largement décrite, l'analyse de susceptibilité du sol vise l'identification du modèle spatial le plus approprié pour l'utilisation du sol selon les contraintes, les conditions et les prescriptions propres à une activité. Au cours des dix dernières années, les problématiques de susceptibilité du sol ont été conceptualisées en termes de méthodes d'évaluation multicritères fondées sur les SIG (Malczewski, 2006, Traduction libre).

Malczewski (2006) met l'accent sur une des plus remarquables caractéristiques des approches multicritères pour la susceptibilité du sol, qui est le large panel de situations/problèmes décisionnels où elle peut intervenir : gestion territoriale de l'environnement, transport, planification urbaine, gestion des déchets, hydrologie et ressources en eau, agriculture et forêt, géologie – géomorphologie et cartographie. Dans son article *« GIS-based multicriteria decision analysis : a survey of the literature», IJGIS, 2006,* Malcewski précise que :

72,4% des applications se trouvent dans les domaines :

- de la gestion territoriale et environnementale
- du transport
- de la planification urbaine
- de la gestion des déchets
- de l'hydrologie et des ressources en eau
- de l'agriculture et la forêt

27,6% restant concerne les domaines :

- de la géologie et la géomorphologie
- de la cartographie
-

Les problèmes décisionnels traités concernent :

- 30% l'analyse de susceptibilité/ faisabilité
- 15,4% l'évaluation de scénarios
- 14, 5% la sélection de sites propices
- 11% la localisation de ressources

La Figure 5 illustre le tableau complet de l'auteur.

		Decision/evaluation problems									
		Land suitability	Plan/scenario evaluation	Site search/ selection	Resources allocation	Transportation/ vehicle routing/ scheduling	Impact assessment	Location-allocation	Miscellaneous	Total	%
Application domains	Environment/ Ecology	19	8	3	10	0	5	0	10	55	17.2
	Transportation	3	2	0	0	13	2	0	9	34	10.7
	Urban/Regional planning	4	8	5	10	1	0	3	6	32	10.0
	Waste management	11	2	5	0	7	0	1	0	29	9.1
	Hydrology/Water resource	4	11	4	2	0	1	0	6	28	8.8
	Agriculture	8	3	4	7	0	2	0	2	27	8.5
	Forestry	12	2	8	3	3	0	0	2	26	8.2
	Natural hazard	9	4	0	0	1	0	0	1	15	4.7
	Recreation/Tourism	3	2	6	0	0	0	0	3	14	4.4
	Housing/Real estate	4	3	2	1	0	0	0	2	12	3.8
	Geology/ Geomorphology	3	0	0	0	0	1	0	5	9	2.8
	Manufacturing	3	0	4	0	0	0	0	0	7	2.2
	Cartography	0	0	0	0	0	0	0	5	5	1.6
	Miscellaneous	8	4	5	2	0	0	3	4	26	8.2
	Total	91	49	46	35	25	11	7	55	319	100.0
	%	28.5	15.4	14.5	11.0	7.8	3.4	2.2	17.2	100.0	

J. Malczewski

Figure 5 *J.Malzczewski : « GIS-based multicriteria decision analysis : a survey of the literature», IJGIS,2006*

La maitrise de méthodes d'analyse multicritères et de cartographie de susceptibilité sont donc un atout indispensable au géologue car les problématiques décisionnelles sont typiquement traitées dans des projets professionnels et de recherche en sciences de la terre et de l'environnement.

Du point de vue de la recherche appliquée, une augmentation de l'intérêt des chercheurs en géosciences vers l'analyse spatiale multicritères peut être remarquée en analysant les quelques principales revues scientifiques internationales et en essayant de tracer l'évolution des articles traitant la susceptibilité, la faisabilité du sol et/ou l'analyse multicritères. En reprenant la méthode déployée par J.Malczewski (2006) pour la classification des articles scientifiques, nous pouvons focaliser la recherche dans des revues exclusivement liées aux géosciences, issues de la bibliothèque numérique « Science Direct » dans les sujets Earth and Planetary Sciences, Environmental Sciences. Les requêtes (R) permettent de repérer les articles contenant le mot-clé suivant : 1. « GIS », 2. « multi criteria decision analysis », 3. « land suitability » .

Deux revues importantes, combinant nouvelles technologies et géosciences ont été privilégiées : *Computers & Geoscience (C&G)* et *International Journal of Applied Earth*

Observation and Geoinformation, (IJAEG) La Figure 6 illustre l'évolution de la production scientifique combinant AMC et SIG entre 1999 et 2011.

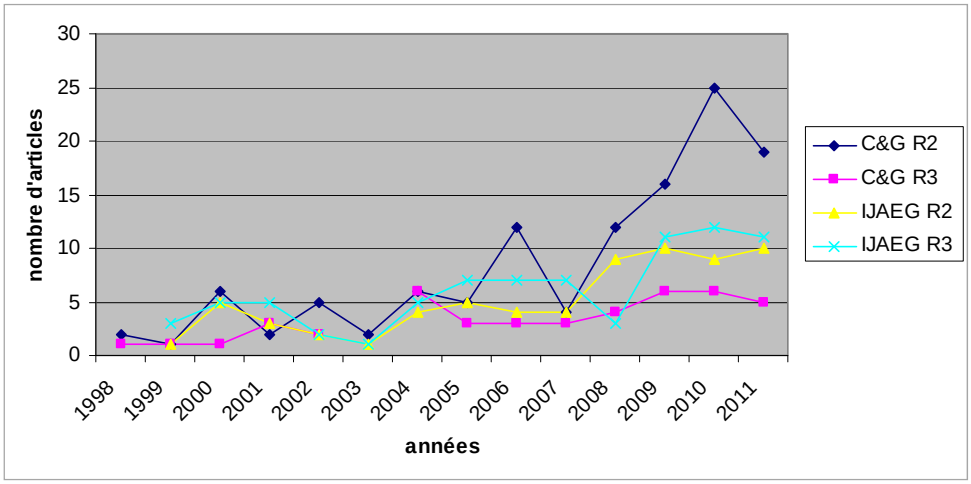


Figure 6 *Graphique sur l'évolution de la production internationale géo scientifique traitant des méthodes SIG-AMC (Balzarini, 2011)*

Nous observons également dans la littérature, une « mondialisation » des méthodes multicritères pour la cartographie de susceptibilité, pour de cas d'études conduits sur des problématiques géo-scientifiques différentes, qu'il s'agit des ressources en minéraux préciéux, en eaux souterraines, de risques d'inondations ou volcaniques : le Tableau 9, montre quelques exemples des types des problématiques traitées :

Sujet de l'étude	**Références bibliographiques**	**Pays**
Identification de sites de stockage de déchets pollués par hydrocarbures	Caractérisation de zones favorables à l'implantation de sites potentiels de stockage dans le cadre du plan POLMAR-TERRE en Vendée Rapport final BRGM/RP 53489-FR Novembre 2004	France
Identification d'aquifères dans un terrain cristallin.	Groundwater favorability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, Sa˜o Paulo State, Brazil (V. Madrucci, F. Taioli, C.C . de Arau´jo, 2008)	Bresil
Identification de zones aptes à la présence d'or.	Multi-criteria analysis in GIS environment for natural resource development - A case study on gold exploration (N. R. Sahoo, P.Jothimani and G. K. Tripathy Tata Infotech Ltd, SEEPZ, Mumbai, 400 096)	Inde

Sujet de l'étude	Références bibliographiques	Pays
Identifier les caractéristiques des aquifères des roches cristallines dans une zone semi-aride.	Impacts of Climate, Topograpy and Weathearing profile on Hydrogeology and Water Resources Assesment in SemiArid Terrain. Using Earth Observation 1 ALI, ASTERDEM and GIS techniques (G. Balamurugan, Dr. S. Rajendran , V.Tirukumaran, 2010)	Inde
Identification des zones potentiellement propices à la présence de ressources géothermales.	GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan (Y. Noorollahi_, Ryuichi I. H. Fujii, T.Tanaka, 2006)	Japon
Création d'une carte des conflits d'intérêts sur l'exploitation du sol pour des ressources lithologiques.	Sustainable land-use decision making from the geological point of view: an example for the use of geo-resources in a metropolitan area (O.Marinoni, S. Lang, C. Lerch , A.Hoppe).	Allemagne
Bilan des priorités sur les ressources naturelles, à l'échelle nationale, supporté d'un système géographique d'aide à la décision.	The Application of a Simple Spatial Multi- Criteria Analysis Shell to Natural Resource Management Decision Making (R.G. Lesslie, M. J. Hill, Patricia Hill, H. P Cresswell and S. Dawson1, 2008)	Australie
Identification des zones vulnérables aux inondations.	Multicriteria Analysis for Flood Vulnerable Areas in Hadejia-JamAare River Basin, Nigeria (S.Yahaya, N. Ahmad, R. F.Abdalla, 2010)	Nigeria
Carte de susceptibilité du risque volcanique	Automatic GIS-based system for volcanic hazard assessment (A.Felpeto, J.Marti, R.Ortiz, 2007)	Espagne

Tableau 9 *Exemples de cas d'étude qui utilisent des méthodes d'analyse spatiale multicritère dans différents domaines des Géosciences et dans différents pays*

5. Conclusions

L'objectif du Chapitre II a été d'apporter un éclairage d'une part sur les secteurs d'activité des Géosciences Appliquées dans lesquels la maitrise des compétences SIG est la plus pertinent, et d'autre part sur la typologie des tâches et des compétences géomatiques propres à ces

secteurs. Nous avons poursuivi cet objectif à travers l'analyse documentaire de plusieurs ressources, chacune avec des fins différents et complémentaires. Nous avons examiné :

- les référentiels géomatiques internationaux pour désigner les compétences recherchées ;
- les profils métiers pour extraire les informations relatives aux spécialités des secteurs professionnels ;
- les stages de formations professionnalisant pour identifier les missions et les pratiques courantes des entreprises.

Nous avons effectué une analyse thématique des expressions indiquant une relation avec les appellations géomatiques. Ensuite nous avons extrait et comparé ces expressions pour constituer des familles (patterns) de compétences SIG. Nous présentons en Figure 7 et dans le Tableau 10 une synthèse de notre analyse.

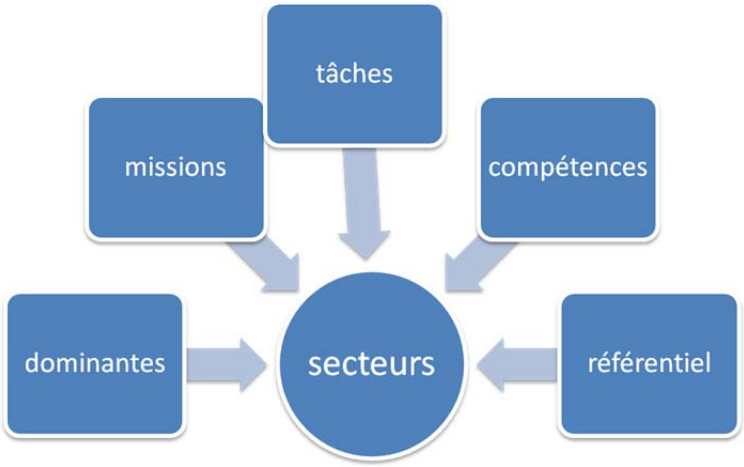


Figure 7 *Schéma récapitulatif des composantes de l'analyse documentaire*

Secteur	Dominante	Mission	Tâche	Compétence	Domaines du Réf BOK
Géophysisque	Géologie	Cartographie d'inventaire thématique = géologique	- représentation des données spatiales de nature différente - gestion des formats - création d'inventaires d'atlas - spatialisation d'objets géographiques - analyse spatiale - discrétisation, classement et pondération de données - identification des zones aptes à répondre à une problématique - réalisation cartographique	- structurer les données et l'information - gérer les données - synthétiser et spatialiser les analyses sur les données - appliquer des choix multicritères pour la potentialité d'un site - évaluer des risques - élaborer et traiter de MNT - modéliser la surface - traiter l'imagerie selon les techniques et les procédés SIG - réaliser une carte thématique ou d'analyse - éditer de rapports, des cartes	DM et GD AM
Hydrogéologie	Risque	Cartographie de synthèse = susceptibilité/ vulnérabilité			AM AM et GD
Environnement	Etudes d'impact	Cartographie de synthèse = susceptibilité/ vulnérabilité			CF CV

Tableau 10 *Synthèse des tâches et des compétences SIG par secteurs d'activité*

En géologie, comme pour toutes les sciences, les pratiques évoluent en fonction des avancées conceptuelles et des progrès technologiques. Les évolutions principales observées et attendues sont contraintes tout d'abord par l'acquisition de nouvelles connaissances et de nouveaux savoir-faire techniques, notamment dans la description de modèles de données, l'analyse spatiale et l'aide à la prise de décision. L'enseignement doit à la fois garantir la formation des étudiants à la maîtrise des outils de gestion de l'information, et les conduire à bâtir leurs analyses en prenant en compte l'ensemble de l'information disponible (La Rédaction, Géosciences, 2007).

Dans la perspective d'observer les stratégies des étudiants novices en SIG, dans une activité qui soit le plus proche possible des problématiques professionnelles, nous décidons de concevoir une situation-problème autour d'une de mission de cartographie de susceptibilité, réalisée avec des méthodes d'analyse spatiale multicritère pour sa pertinence et sa complexité didactique. Nous partons donc de l'hypothèse que cette approche permettra aux novices de s'approprier graduellement des notions et concepts fondamentaux à la maitrise des SIG, de s'initier aux méthodes d'analyse spatiale et de construire un raisonnement global de projet.

Ces choix nous amènent à analyser les caractéristiques et les spécificités de la cartographie de susceptibilité.

.

CHAPITRE II : CARTOGRAPHIE DE SUSCEPTIBILITÉ : DES DÉFINITIONS

1. Définition de la cartographie de susceptibilité avec des méthodes d'ASMC

Ce chapitre traite des définitions de cartographie de susceptibilité et des méthodes d'analyse spatiale et multicritère que nous avons adoptées. Cette entrée épistémologique s'appuie sur une synthèse des travaux de Salem Chakhar, (2006) et de Jacek Malzcewski (2004, 2006). Nous abordons, dans l'ordre, des notions générales d'analyse spatiale et de problèmes spatiaux, les définitions d'analyse multicritère et les spécificités cartographiques.

1.1 L'analyse 'spatiale' et les problèmes 'spatiaux' : généralités

« L'analyse spatiale met en évidence des structures et des formes d'organisation spatiale récurrentes (D. Pumain, 1997). Elle analyse des processus qui sont à l'origine de ces structures, à travers des concepts comme ceux de distance, d'interaction, de portée spatiale, de polarisation, de centralité, de stratégie ou choix spatial, de territorialité... Des lois de la spatialité relient ces formes et ces processus, et sont intégrées dans des théories et des modèles du fonctionnement et de l'évolution des systèmes» (D. Pumain, 1997). « Schématiquement, par rapport à la problématique de la géographie classique qui analysait les relations " verticales " entre des milieux naturels et des sociétés, l'analyse spatiale s'intéresse principalement aux interactions " horizontales " entre les lieux. S'appuyant sur des méthodes statistiques et des modèles mathématiques, utilisant les cartes, les systèmes d'information géographique et divers outils de simulation, tout en intégrant les résultats d'enquêtes sur les comportements dans l'espace et ses représentations, l'analyse spatiale est employée par bien d'autres disciplines que la géographie, en économie spatiale (ou science régionale), histoire, agronomie, archéologie, sciences de l'environnement, etc. »[10] (D. Pumain,1997).

Dans les SIG, l'analyse spatiale, tout en s'appuyant sur les concepts géographiques, se matérialise à travers des applications informatiques qui permettent l'estimation, la prédiction, l'interprétation et la compréhension des phénomènes du monde réel : il s'agit de différentes

[10] Extrait du site HypérGéo , http://www.hypergeo.eu/spip.php?article86 publié en 2004.

méthodes, permettant de modéliser des problèmes spatiaux. En termes généraux, « un modèle est une représentation simplifiée de la réalité en vue de la comprendre et de la faire comprendre » (P. Haggett 1965, in L.Sanders 2001). Parmi les différentes catégories de modèles, nous en retiendrons deux:

- les modèles de représentation : formalisent les objets géographiques. Il est important de distinguer entre les termes "entité géographique" et "objet géographique". Selon Malczewski (1999), le terme *entité géographique* est utilisé pour désigner un élément du monde réel, i.e., les entités sont contenues dans l'espace géographique. Le terme *objet géographique* est une représentation dans le SIG d'une entité géographique ; (S.Chakhar, 2006). Ces modèles essaient de formaliser les caractéristiques géométriques et de capturer les relations spatiales entre les objets (rélations de proximité entre deux objets géographiques, d'intersection, de voisinage ...). Les modèles de représentation sont : 1) le mode raster (ou matriciel) qui divise l'ensemble de l'espace étudié selon une grille régulière de cellules (maille ou pixel) pour former une image (matrice) constituée de lignes et de colonnes. Chaque pixel contient une seule valeur pouvant être un code typologique ou un identifiant.et est référence avec un système de coordonéées (x,y,z). 2) Le mode vecteur qui utilise les concepts géométriques de points, de lignes et de polygones pour décrire les objets spatiaux (route, cours d'eau, limite de commune ...) à l'aide d'un système de coordonnées (x,y,z). Ce format maintient explicitement la notion d'objet dont il décrit les contours ou les enveloppes et les caractéristiques thématiques.

- les modèles de géo-traitement: représentent l'ensemble des traitements/opérations mathématiques ou informatiques qui s'appliquent aux objets géographiques et aux interactions entre les objets, décrits dans le modèle de représentation. Les relations sont modélisées à l'aide des méthodes d'analyse spatiale.

De nombreux types de modèles de géo-traitement peuvent permettre de résoudre divers problèmes, notamment :

- Problèmes d'aptitude. (i.e.) Quel est l'emplacement optimal pour un site, comme une nouvelle école, une décharge d'ordures ou un parking ?
- Problèmes de distance. Quels sont les habitats protégés les plus proches pour une espèce en danger ?

- Problèmes de surface. Quel est le taux de pollution dans différents endroits d'un canton ?
- Problèmes d'hydrologie. Dans quelle direction l'écoulement des eaux de surface s'effectue t-il?

Les problèmes spatiaux, dont la complexité est liée à l'hétérogénéité des données et des concepts à mobiliser, ont souvent une nature multicritère et un caractère décisionnel : ils sont de (i) de nature multidimensionnelle, interdisciplinaires et difficilement formalisables, (ii) impliquent plusieurs personnes et institutions, ayant généralement des préférences et des objectifs divergeants , (iii) nécessitent la définition de plusieurs critères conflictuels dont l'importance n'est pas la même, et (iv) demandent une quantité considérable de données quantitatives et qualitatives : c'est le champ d'application de l'analyse multicritère (S. Chakhar, 2006).

1.2 Définition de la méthodologie générale de l'AMC combinée aux concepts de spatialité

A l'origine, l'analyse multicritères a été développée dans le cadre des mathématiques, des sciences économiques et du génie industriel. Egalement nommée " aide multicritère à la décision", cette discipline connaît un développement très important depuis la deuxième moitié des années 1970 et peut être désormais considérée comme un outil scientifique à part entière. (Commission Européenne, 2005). L'analyse multicritère ou évaluation multicritère (AMC-EMC) pour la résolution de problèmes spatiaux est bien antérieure à l'utilisation des Systèmes d'Information Géographique : cas d'implantation d'infrastructures, calcul du plus court chemin, planification urbaine et régionale, zonage, environnement (Lahdelma et *al*., 2000, in Chakhar, 2006) agriculture (Janssen et Rietveld, 1990, in Malczewski, 2006), gestion et conservation des ressources en eau (Raju et Pillai, 1999a, in Chakhar, 2006), planification du transport (Jankowski, 1995). Si d'un côté, les logiciels d'AMC n'ont pas disposé des capacités nécessaires pour la gestion des données à référence spatiale et ont manqué d'outils nécessaires à la représentation cartographique des résultats (Kêdowidé, 2010), de leur coté les SIG, initialement dépourvus des fonctionnalités multicritères, ont toujours considéré la cartographie comme étant leur cœur de métier. Il va de soi que le couplage entre les deux systèmes a constitué une véritable solution vers la création d'outils d'aide à la décision. Le champ de l'ASMC est donc le résultat de la conjonction de différents domaines disciplinaires : les mathématiques, l'analyse spatiale et la géomatique.

En toute généralité, lorsqu'on pose un problème multicritère, il s'agit d'en trouver la "solution la plus adéquate", compte tenu d'un certain ensemble de critères, cette solution pouvant prendre diverses formes (choix, affectation, classement). On peut alors opérer en quatre grandes étapes (Ben Bena,, 2000) :

1. Dresser la liste des actions potentielles
2. Dresser la liste des critères à prendre en considération
3. Établir le tableau des performances
4. Agréger les performances

Afin de préciser le sens donné aux principaux éléments linguistiques qui caractérisent les étapes, nous présentons ci dessous une brève explication des notions employées par les différents auteurs.

a. Notion d' « action »

[Bernard Roy (1985) définit ainsi la notion d'action : *Une action est la représentation d'une éventuelle contribution à la décision globale susceptible d'être envisagée de façon autonome et de servir de point d'application à l'aide à la décision (Résultat)].* En analyse multicritère, et notamment au sein de l'école francophone, le terme "action" est utilisé dans le sens de proposition et non dans son sens traditionnel de réalisation (Laaribi, 2000). Les auteurs anglophones utilisent assez souvent le terme "alternative" pour désigner des solutions possibles, des variantes, ou des actions potentielles [..] Lorsque l'action à prendre est définie par sa localisation géographique, sa forme et/ou ses relations spatiales, on parlera d'*action spatiale.* [..]Une action spatiale est définie à travers au moins deux éléments: (i) l'*action* elle même (quoi faire ?) et (ii) la *localisation géographique* (où faire ?) (Malczewski, 1999) .

b. Notion de « critère »

Selon Chakhar, (2006, p. 64), un critère est un facteur de jugement sur la base duquel on mesure et on évalue une action ; il diffère de la notion de variable dans la mesure où un critère est relié aux préférences du décideur alors qu'une variable ne l'est pas nécessairement (S.Chakhar, 2006, p.. 68). Dans les méthodes multicritères du critère unique de synthèse, les critères d'évaluation sont souvent modélisés en termes d'objectifs et d'attributs.

Un *objectif* est une direction traduisant une perspective de changement concernant l'état futur souhaité par le décideur.

Un *attribut* est un moyen pour mesurer l'achèvement d'un objectif.

La relation entre objectifs et attributs peut être représentée par une structure hiérarchique ayant à son premier niveau l'objectif global qui est "éclaté" en sous-objectifs qui sont à leur tour "éclatés" en sous-sous-objectifs jusqu'à ce que l'on atteigne un niveau mesurable que l'on qualifie d'attributs. Par exemple, dans le cas, emprunté de Malczewski (1999), d'un problème de gestion de forêt dans une zone montagneuse, l'objectif principal consiste à « améliorer la gestion de la forêt », et les sous-objectifs consistent à « maximiser la production du bois, minimiser les fluctuations de la rivière, maximiser la conservation du sol…». Chacun d'entre eux est caractérisé par des attributs mesurables : le sol et l'élévation pour la production du bois, le sol, l'élévation et la géologie pour la fluctuation du sol… La Figure 8 donne un exemple, relatif à un problème de gestion de forêt dans une zone montagneuse au Japon (Malczewski, 1999).

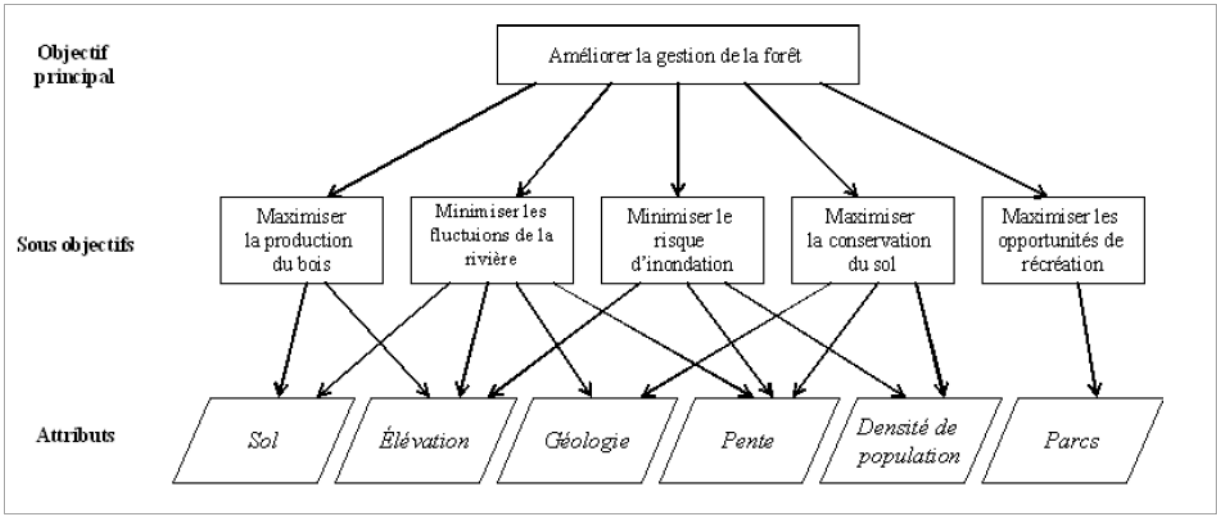


Figure 8 *Schéma de la structure du problème multicritère dans un cas de gestion forestière. Malczewski, 1999 in Chakhar, 2006)*

Plusieurs auteurs, notamment nord-américains, semblent accorder la même signification aux termes critères et attributs. Pomerol et Barba-Romero (1993, in Chakhar, 2006) apportent un éclairage intéressant sur la différence subtile entre la notion d'attribut et celle de critère : un attribut est une caractéristique de l'action, ce sera par exemple, le coût d'implémentation, la qualité de paysage, etc. ; si on ajoute à ces attributs un minimum d'information relative aux préférences du décideur, les attributs deviennent alors des critères (Chakhar, 2006).

Une *contrainte* (appelée aussi *critère d'admissibilité*) est un facteur permettant de circonscrire et de limiter les actions prises en considération (e.g. le site d'implantation d'une usine doit être à 500 mètres d'une autoroute).
Selon Godard (2007) « les critères sont de deux types, les *contraintes* et les *facteurs.* Les contraintes sont les critères booléens qui limitent notre analyse à des régions particulières. Par opposition, les facteurs sont des critères qui définissent un certain degré d'aptitude pour toutes les régions. Ils définissent des zones d'aptitude, ou de solutions alternatives, qui sont exprimées par des valeurs continues. Le score des facteurs individuels peut soit améliorer (avec des résultats élevés) soit réduire (avec des résultats faibles) l'aptitude d'une solution alternative (le degré auquel cela se produit dépend de la méthode d'agrégation utilisée). Les facteurs peuvent être standardisés d'un certain nombre de façons selon les critères individuels et la forme d'agrégation choisie finalement ». (Godard, 2007).

c. Notion de « tableau des performances »

Selon Chakhar (2006), un tableau des performances « … également appelé *matrice d'évaluation* ou *matrice de jugements* ou encore *matrice de décision* est une matrice [*gj*(*ai*)] de dimension *n £m* où *n* est le nombre des actions et *m* le nombre de critères. Chaque ligne *i* exprime les performances de l'action *ai* relativement aux *n* critères considérés. Chaque colonne *j* exprime les évaluations de toutes les actions relativement au critère *gj* ». (Roy, 1985).

d. Notion d' « agrégation »

Selon (Roy, 1985), cité dans (S.Ben Mena, 2000), on peut distinguer trois approches opérationnelles

L'agrégation complète qui correspond à la possibilité d'inclure toutes les performances dans ce qu'on appellerait en mathématique une fonction d'utilité ou d'agrégation (Roy, 1985), en leur attribuant d'éventuels poids. Cela suppose que tous les jugements sont commensurables alors qu'une des justifications de l'approche multicritère est la non commensurabilité de ces jugements.

L'agrégation partielle. Une seconde attitude est de respecter l'incomparabilité et l'intransitivité… au prix de la clarté des résultats. En effet, cette technique ne permet pas

d'obtenir un résultat indiscutable comme on s'y attend en général, pour tout ce qui est à base de mathématique (Schärlig, 1985, in Chakhar, 2006). Ici, on cède donc sur la clarté.

L'agrégation locale. Les deux types de méthodes d'agrégation qui précèdent supposent que A (action) soit de dimensions raisonnables. Or A peut être très grand, voire infini lorsque les actions varient en continu. La technique est alors de partir d'une solution de départ (aussi bonne que possible) et de voir "autour" de cette solution s'il n'y en a pas de meilleure. On pratique donc une exploration locale et répétitive de A. D'où son nom de technique d'"agrégation locale itérative" (Schärlig, 1985, in Chakhar, 2006).

Le Tableau 11 résume les méthodes SIG-AMC:

Méthodes Discrètes : impliquent un ensemble fini (ou dénombrable) d'actions. Les actions sont représentées en forme vectorielle ou raster discrétisé. 1. Critère unique de synthèse		
1. A Principe Le principe général est que le décideur a pour but de maximiser une fonction d'utilité en agrégeant les évaluations partielles de chaque Action en une évaluation globale. (Chakhar, 2006) Agrégation complète On cherche à agréger les *n* critères afin de les réduire en un critère unique. On suppose que les jugements sont transitifs. (Lehoux, .Vallée, 04)	1.B Cadre conceptuel Ecole américaine "Top – down » Pour Keeney (92) consiste à construire une structure hiérarchique ayant à son premier niveau l'objectif global qui est "éclaté" en sous-objectifs qui sont à leur tour "éclatés" en sous-sous-objectifs jusqu'à ce que l'on atteigne un niveau mesurable que l'on qualifie d'attribut	1.C Méthodes Analytic Hierarchy Process AHP (Saaty, 1976) Weight Sum (WLC) (Eastman, et Al., 1995) Ordered Weighted Average OWA (Jang et Eastman, 2000) Multi Attribute Utility Theory MAUT (Keeney et Raffia, 1976)

2. Surclassement de synthèse		
2.A Principe Les critères sont agrégés en utilisant une relation binaire partielle *S*, tel que *aSb*veut dire "*a* est au moins aussi bonne que *b*". La relation binaire *S* est appelée *relation de surclassement* (Chakhar). Agrégation partielle. On cherche à comparer des classements les uns aux autres et à établir entre ces éléments des relations de surclassement. (Lehoux, Vallée, 04,)	2.B Cadre conceptuel Ecole française Bottom – up B. Roy(85) consiste à identifier toutes les conséquences pouvant résulter de la mise en œuvre des actions, que l'on structure en dimensions puis en axes de signification autour desquels sont construits les critères.	2.C Méthodes (techniques) Electre I, II, III, IV (B. Roy, 1968 et +) Prométhée I et II (J.-P. Brans, 1980) Melchior (J. P. Leclerc, 1984) Qualifex (J. Paelinck, 1976) Oreste (M. Reubens, 1979) Regim (P. Nijkamp et P. Rietveld, 1983 Naiade (G. Munda, 1995)

Méthodes Continues : évoquent un nombre très grands d'actions, voir infini. Les actions sont représentées en forme matricielle (avec des valeurs continues).		
1 A. Principe Approche d'agrégation : Locale et itérative. Les algorithmes de résolution dans le cas des méthodes continues exigent que les préférences du décideur soient exprimées *progressivement* durant le processus de résolution. L'algorithme de résolution s'arrête lorsque le décideur accepte la solution proposée par la procédure/l'ordinateur. On cherche en premier lieu une solution de départ. Par la suite, on procède à une recherche itérative pour trouver une meilleure solution. (Lehoux, Vallée, 04,).	1.B. Cadre conceptuel Gardiner et Steuer, 1994a/b.	1.C. Méthodes : Interactive Goal Programming (Dyer, 1972) STEM (Benayoun et al. 1971) PRIAM (Lévine et Pomerol, 1986)

Tableau 11 *Synthèse des méthodes multicritères*

Formalisées pour être intégrées aux SIG, ces notions et ces principes permettent la modélisation de géo-traitements pour la résolution de problèmes spatiaux et particulièrement pour les problèmes d'aptitude.

1.3 Transition lexicale interdisciplinaire

Dans le cadre de l'approche thématique, une transition entre l'appellation « carte de susceptibilité/vulnérabilité » utilisée dans les Sciences de l'Environnement ou les Géosciences et l'appellation « carte de potentialité ou d'aptitude » utilisée par les Sciences de l'Information Géographique, s'impose. Le terme « susceptibilité » est couramment adopté par le domaine des Géosciences, notamment au sein d'une nomenclature officielle du BRGM traitant des problématiques environnementales telles que les aléas de mouvements de versant, ou de retrait-gonflement d'argiles, ou le choix de sites de stockage ; la susceptibilité désigne la prédisposition d'un terrain à répondre à un besoin ou à un phénomène. Les Géosciences adoptent aussi le terme de « carte de vulnérabilité qui s'intéresse généralement à certaines composantes du système territorial prises isolément, comme par exemple, le système d'approvisionnement en eau d'une ville. Les cartes de risques croisent aléas et vulnérabilité pour chercher à identifier les éléments et espaces susceptibles d'être plus ou moins durement affectés par un phénomène dommageable »#(D'Ercole et Metzger., 2009)

Les Sciences de l'Information Géographique et les SIG ont largement employé le terme « carte de potentialité ou d'aptitude », traduction du terme anglophone «suitability map » (Collins English French ElectronicDictionary © HarperCollinsPublishers 2005,) pour designer les patterns spatiaux les plus appropriés à répondre à des questions d'aménagement du territoire, de planification régionale, d'agriculture, de géologie, d'écologie et d'impact environnemental (Malczewski, 2004). Si la définition géomatique semble couvrir un panel plus large de domaines d'investigation, la démarche analytique et les outils déployés restent les mêmes sous les deux différents labels. Aussi, d'un point de vue cartographique les deux appellations concordent à designer une cartographie de synthèse (Kraak, 2010) dont les modalités de représentation visuelle reposent sur l'usage de conventions sémiotiques propres à la cartographie thématique. Nous aborderons plus loin les aspects de sémiologie. Les Figures 9 et 10 illustrent des exemples de cartographie de susceptibilité en Géosciences. Nous adoptons à partir d'ici la terminologie géomatique de cartographie *d'aptitude*.

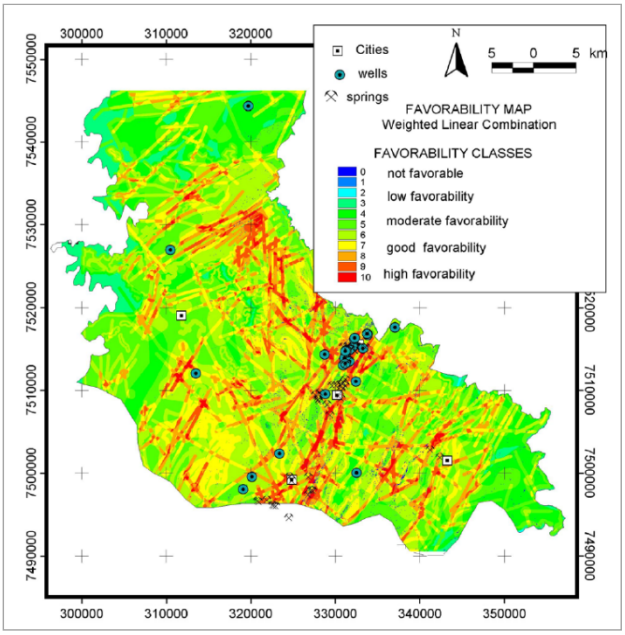


Figure 9 *Cartographie de susceptibilité des eaux souterraines dans l'Est de l'Etat de San Paolo au Bresil. (Madrucci, Taioli, de Araujo, 2008)*

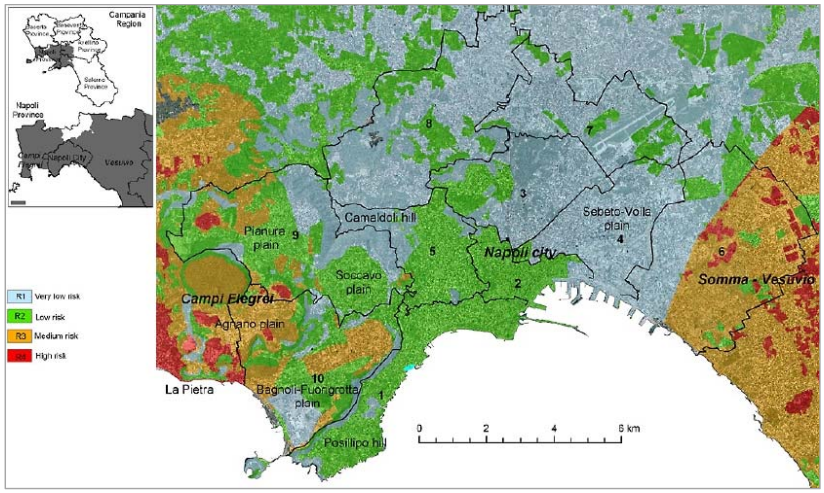


Figure 10 *Carte de susceptibilité aux risques volcaniques à Naples. (Alberico, Petrosino, Lirer, 2011)*

1.4 Définition et procédure générale pour la cartographie d'aptitude

Dans le contexte de l'analyse d'aptitude, il est nécessaire de faire une distinction entre deux cas d'étude typiquement traités : la sélection de site et la recherche de site (Malczewski, 2004).

L'objectif de la sélection de site est d'identifier le meilleur site pour une activité spécifique parmi un ensemble des sites potentiellement reconnus. Dans ce type d'analyse, toutes les caractéristiques (telles que la localisation, la taille, les attributs, ect..) sont connues. Le problème consiste à évaluer les caractéristiques et à attribuer un rang à tous les sites candidats de façon à déterminer celui ayant le score le plus important. Lorsqu'il n'y a pas un ensemble de sites prédéterminés, il s'agit d'un problème de recherche de site, dont les limites doivent être définies.

L'objectif du deuxième type d'analyse est d'identifier explicitement les limites du meilleur emplacement. Cette analyse est basée sur la délimitation d'un territoire d'étude qui peut être subdivisée en un ensemble d'unités observables. L'analyse d'aptitude demande le classement et l'agrégation des unités observables selon leur potentialité par rapport à un objectif spécifique ; elle fournit les caractéristiques spatiales des unités selon les critères de recherche. (Diamond et Wright, 1988). Les approches SIG aux problématiques d'analyse d'aptitude trouvent leurs origines dans les techniques de superposition effectuées au moyen de calques, utilisées initialement par les paysagistes américains au début du 20eme siècle (Steinitz et al., 1976; Collins et Al., 2001). L'introduction de la modélisation spatiale et des techniques d'algèbre des cartes dans la cartographie assistée par ordinateur, a été un avancement fondamental dans les méthodes d'analyse d'aptitude (Tomlin, 1999). Elément central de l'algèbre des cartes pour la résolution de problèmes de potentialité a été l'analyse de superposition. L'idée de base de Tomlin est que les rasters peuvent être soumis à des opérations de type algébrique dont les résultats seront aussi des rasters. Son algèbre décrit des opérations arithmétiques sur des cellules, des groupes de cellules, ou des classes d'objets dans l'ensemble des cellules (portée locale, focale, zonale ou globale).

En général, il existe deux méthodes d'analyse de superposition :

- la superposition d'entités (superposition de points, lignes ou polygones).
- la superposition de rasters. Dans la superposition de rasters, chaque cellule de chaque couche référence le même emplacement géographique. En conséquence, elle permet l'association des caractéristiques de nombreuses couches dans une seule couche. Habituellement, les valeurs numériques sont attribuées à chaque caractéristique, ce qui permet l'association mathématique des couches et l'attribution d'une nouvelle valeur à chaque cellule dans la couche en sortie.

Certains types d'analyse de superposition se prêtent à l'une ou l'autre de ces méthodes. L'analyse de superposition pour trouver des endroits répondant à certains critères est souvent plus efficace si elle fait appel à la superposition de rasters (*source ESRI*).

La superposition de couches matricielles (raster) a été formalisée à travers deux types d'opérations : les opérateurs Booléens, d'intersection (AND) et d'union(OR) et la combinaison linéaire pondérée (weighed linear combination) (WLC).

Dans la combinaison des cellules de deux couches matricielles, avec l'opérateur AND, si les deux valeurs en entrée sont vraies (différentes de zéro), la valeur en sortie est égale à 1 ; si l'une des deux entrées, ou les deux, est fausse (égale à zéro), la sortie est égale à 0. Avec l'opérateur OR si l'une des valeurs en entrée, ou les deux, sont vraies (différentes de zéro), la valeur en sortie est égale à 1 ; si les deux valeurs en entrée sont fausses (zéro), la sortie est égale à 0.

Contrairement aux opérations Booléennes, la WLC est une méthode compensatoire (à critère unique de synthèse, selon l'école américaine –Keeney, 92-) : elle demande la standardisation des couches raster représentant les critères d'analyse, l'attribution d'importances relatives à ces couches avec des poids (coefficients multiplicatifs) et ensuite la combinaison (addition) des couches pour obtenir un score final d'aptitude pour chaque cellule (pixel). La cellule avec le résultat algébrique le plus haut indique le meilleur emplacement. Dans ce sens, la WLC permet de compenser, sur une même cellule, une valeur faible, induite par un critère, par une valeur plus forte, induite par un autre critère. La Figure 11 illustre schématiquement le principe de la WLC.

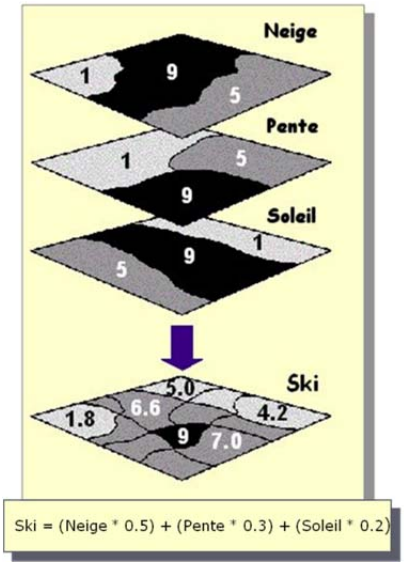


Figure 11 *Schéma d'agrégation de couches par méthodes WLC. (sources : ESRI support, 2009)*

Ces deux opérations ont été pendant longtemps les techniques les plus simples et les plus adoptées. La première raison de leur popularité réside dans la facilité de leur implémentation dans les environnements SIG avec les modules de l'algèbre des cartes. Aussi, ces techniques sont relativement compréhensibles et intuitives pour des utilisateurs non spécialistes.

Néanmoins, plusieurs aspects critiques affectent leur application. D'un point de vue méthodologique, la critique majeure concerne la simplification de la complexité du processus décisionnel, due à l'attention portée aux faits-caractéristiques- (qui peuvent être concrètement représentés dans les SIG) plutôt qu'à la combinaison des faits et des jugements (ce qui est plus difficilement représentable dans les SIG). Cette carence a été compensée par l'intégration des méthodes de décision multicritères dans les SIG. Parmi ces derniers, on considère les nombreuses variantes de la WLC, telles que les méthodes du point idéal (Jankowski, 1995), de l'analyse des concordances (Joerin, 2001), le processus d'analyse hiérarchique (Banai, 1993) et surtout les moyennes des poids ordonnés (Ordered Weighted Avearging, OWA, Jiang and Eastman , 2000) qui, grâce à un ensemble d'opérateurs, permettent de développer une variété de stratégies allant de la prise de risque la plus faible, ou pessimiste, (basé sur la combinaison AND) à la plus optimiste (basée sur la combinaison OR) en passant par un palier intermédiaire de risque (la WLC). Malgré les efforts méthodologiques menés pour améliorer la résolution de problèmes spatiaux multicritères, d'un point de vue cognitif la mise en œuvre de ces méthodes d'analyse est affectée par plusieurs difficultés.

1. La première est liée à la nature imprécise et ambigüe de la donnée d'entrée des procédures spatiales multicritères : or, en dépit de cet acquis, la procédure assume que les données sont précises et très peu d'alertes sur la propagation des erreurs (Hevelink, 1989) sont donnés à l'utilisateur. L'écueil est sur la maitrise de la qualité de la donnée géographique à traiter.
2. La deuxième difficulté est liée à la normalisation des couches-critères selon une échelle d'évaluation commune (par exemple : de valeurs de 1 à 9) à toutes les couches : le choix de cette échelle de valeur se fait grâce à la connaissance des méthodes de transformation de représentations géographiques (Beguin et Pumain, 2007). La plus connue et la plus utilisée est la méthode linéaire, même si sa popularité n'est pas justifiée par des arguments théoriques ou empiriques (Jiang and Eastman, 2000). L'écueil est sur la connaissance des méthodes de classification et de normalisation de la donnée géographique.
3. La troisième difficulté est apportée par la grande variété de méthodes et de règles qui caractérisent les stratégies décisionnelles et par les champs de validité de ces règles.

Notamment, parmi les règles d'attribution des poids aux critères il n'y en a pas une qui soit unanime et prépondérante. La modélisation des situations décisionnelles qui aiderait dans le choix des méthodes, n'est pas effective, sauf dans quelques prototypes de cartographie décisionnelle (Chakhar, 2005). L'écueil est ici stratégique et la littérature montre (Malczewski, 2004) que très peu d'utilisateurs opèrent leurs choix en connaissance de cause.

Ces difficultés d'appropriation des méthodes et techniques de l'analyse spatiale multicritère sont soulignées également par Malczewski(2006) : nous présentons une synthèse de son article ci –après.

1.5 Synthèse des approches SIG - AMC selon la littérature

Malczewski (2006) trace un panorama complet des travaux scientifiques qui traitent ou qui s'appuient sur l'utilisation du couplage SIG –AMC (en ang. GIS-MCDA), à travers l'analyse de 319 articles, publiés dans 135 revues de 1990 à 2004 (voir Chapitre I) La sélection des articles s'est basée sur de moteurs de recherche scientifique sur le Web, sur des base de données et des librairies numériques, en indiquant une requête Booléenne qui contenait les termes suivants : GIS and multicriteria (or multiobjective or multiattribute). Une recherche manuelle supplémentaire a complété le travail électronique.
L'auteur montre le développement des articles référenciés SIG-AMC dans la période étudiée (voir Figure12). On remarque que ce développement a été relativement modeste dans la première moitié des années '90 : en effet, seulement 26 articles (8.2% du total) ont été publiés à ce sujet avant 1995. A partir de 1995 jusqu'à 2000 on remarque une nette accélération des publications, qui passent de 9 en 1995 à 40 en 2000. Mais 70% des 319 articles répertoriés apparait dans les dernières 5 années. Cette rapide augmentation du volume de la recherche en SIG – AMC peut être expliquée par trois facteurs : (i) une large reconnaissance de la communauté scientifique envers les apports de l'AMC à la géomatique ; (ii) la disponibilité croissante de logiciels d'AMC, grâce à leurs coûts abordables et leur prise en main facile ; (iii) la disponibilité et la relative facilité d'exploitation de modules d'AMC intégrés au logiciel IDRISI ou TNT-GIS.

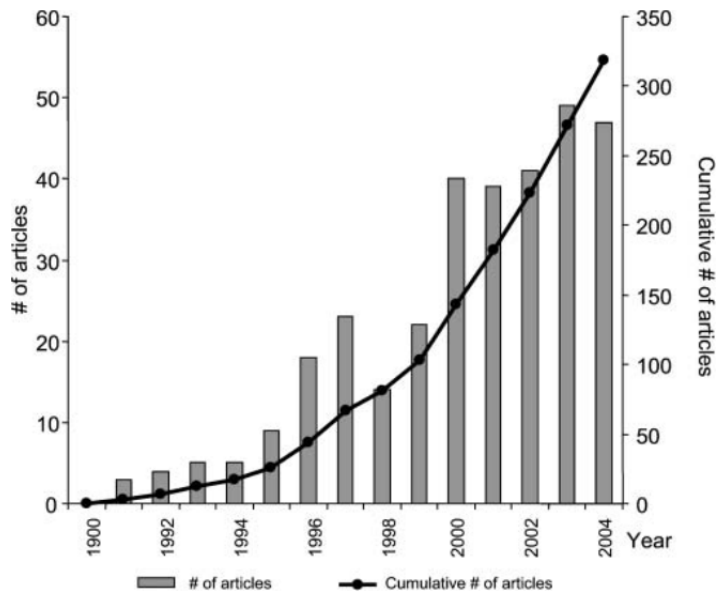


Figure 12 *Nombre total des articles SIG – AMC par année pour la période 1990 -2004 Malczewski (2006)*

L'auteur précise que :

(i) 47,6% des articles concerne la recherche sur des données matricielles, contre 47% des articles sur des données vectorielles;

(ii) Une décision-solution est constituée de 2 éléments : l'action (ou alternative, quoi faire ?) et la localisation (où le faire ?). La localisation de sites potentiels ou d'usage du sol, sont des exemples de solutions explicites, tandis que les implicites sont des solutions qui subissent les conséquences (pas immédiatement directe) d'une décision, tels que minimiser les risques d'inondations sur une zone qui peut créer des risques ailleurs. Sur les 152 articles basés sur des données matricielles, 37,5% traitent de solutions explicites et 27% traitent de solutions implicites ; sur les 150 articles basés sur des données vectorielles 38,7% traitent de solutions explicites et 32, 7% traitent de solutions implicites ;

(iii) La Somme pondérée (Weighted Summation WS) et ses procédures associées, sont les approches les plus utilisées. Très souvent la WS est utilisée en conjonction avec les opérations Booléennes (Eastman et Al.1995, Pettit&Pullar 1999, Perez et Al. 2003) et la OrderedWeightedAveraging (OWA) (Jiang and Eastman 2000), Rinner and Malczewski 2002, Makropoulos et Al. 2003, Rashed and Weeks 2003) est une extension récurrente et une généralisation des deux précédentes. La large prédominance de la WS est due au fait qu'elle est relativement facile à implémenter

dans un environnement SIG en utilisant des opérations d'algèbre des cartes (mapalgebra) et de la modélisation cartographique; aussi cette approche est facile à comprendre par les utilisateurs et les décideurs. Or, certains auteurs (Hobbs, 80, Lai & Hopkins, 89, Heywood, 95 et Malczewski, 00) soulignent que les implémentations des procédures de WS sont souvent faites sans une compréhension profonde des hypothèses sous-jacentes, et aussi que l'application de la méthode se fait sans une compréhension complète de deux concepts fondamentaux de la WS : l'attribution des poids aux facteurs et les calculs pour obtenir les cartes d'analyse correspondantes.

1.6 Bilan

Chakhar (2006) souligne que le grand éventail de méthodes offertes par le couplage SIG-AMC a permis d'étendre le champ d'application des méthodes multicritères, mais en même temps a généré un autre problème : celui du choix de la méthode à appliquer dans un problème spécifique. L'importance du problème du choix de la méthode multicritère a été soulevée par différents auteurs et démontrée dans plusieurs cas pratiques (e.g. Guitouni et *al*., 1999b ; Laaribi, 2000). Les méthodes de prise de décision à objectifs multiples sont utilisées essentiellement dans un cadre académique : le nombre réduit des décideurs effectifs qui utilisent ces méthodes (Angehrn et Jelassi, 1994), revient aux différents modèles mathématiques qui compliquent, pour des utilisateurs souvent non familiarisés avec ces méthodes, le choix à appliquer.

2. Aspects sémiologiques de la cartographie d'aptitude

La carte résultant des sommes pondérées des critères est une carte thématique de synthèse. La cartographie thématique est une cartographie de travail, d'expression, d'interprétation, de recherche ; c'est pour le géographe, le mode principal de transmission des connaissances. Elle représente, sur un fond repère, des phénomènes qualitatifs ou quantitatifs concrets ou abstraits circonscrits et limités par le choix d'un ou plusieurs sujets particuliers (Weger, 1999). Elle est également dite de synthèse, « essentiellement conçue dans un but explicatif, représentant un phénomène dans son ensemble par ses relations internes » (CFC, 1970, i, Cauvin et Al., 2007). Ce type de carte implique un haut degré de lecture, car elle présente des analyses et des traitements de données complexes aboutissant à la schématisation de plusieurs composantes.

Cette synthèse est destinée à mettre en valeur les trais dominants des phénomènes pour permettre au spécialiste ou dirigeant de préparer des éléments de décision (Weger, 1999).

La conception et réalisation d'une carte ne sont pas des opérations neutres : en effet la carte thématique est la traduction d'un choix autant conceptuelle que graphique. Des règles régissent les trois champs incontournables de la construction cartographique : les données (choix et traitements), la conception (contraintes techniques et théoriques) et la réalisation (visualisation et organisation des choix graphiques). La maitrise de ces trois points permet au cartographe de communiquer avec la plus grande rigueur son message géographique (Zanin et Trémélo, 2003). Le respect des ces règles se déploie dans le processus de réalisation, piloté par six étapes fondamentales (Zanin et Trémélo, 2003) par lesquelles nous pouvons caractériser la cartographie d'aptitude. Il s'agit de :

1. Définir l'objectif de la carte : le thème majeur de la carte doit s'appréhender du premier coup d'œil, ce qui demande de travailler sur la qualité du message à transmettre ;
2. Définir l'information à cartographier : les données à retenir pour répondre à la problématique posée et les traitements à effectuer pour dégager et traduire sous une forme facile à lire et à retenir, les correspondances et les relations qui peuvent exister. L'information géographique s'identifie selon 4 types de données :
    a. qualitatives ordinales : les relations différentielles et ordonnées sont traduites ;
    b. qualitatives nominales : seule la relation différentielle est à mettre en avant, aucune quantité doit être graphiquement traduite ;
    c. quantitatives absolues : les relations quantitatives et ordonnées doivent être représentées ;
    d. quantitatives relatives : comme pour les données ordinales, les relations doivent être mises en évidence, les valeurs numériques sont ici souvent groupées en classes.
3. Identifier le mode d'implantation : c'est faire le lien entre le phénomène à transmettre et les caractéristiques de sa répartition spatiale. Il existe trois modes d'implantation : ponctuelle, linéaire et zonale.
4. Identifier le fond de carte : c'est déterminer l'enveloppe géographique du message à transmettre. C'est une carte servant de repère pour un report en surcharge de phénomènes localisables déterminés (définition CFC, dans Zanin et Trémélo, 2003).
5. Identifier la figuration graphique de l'information, choisir le langage cartographique. Ce langage, qui est visuel et universel, utilise son alphabet propre (les signes élémentaires)

son vocabulaire (les variables visuelles) et sa grammaire (les règles de perception visuelle). Les variables visuelles sont les moyens graphiques qui permettent de différencier les données présentées dans le plan de la carte. Elles permettent des variations de forme, de dimension, de valeur, d'orientation et de couleur et sont dépendantes du type d'information géographique et de leurs modes d'implantation. Chacune d'entre elles possède ses propres caractéristiques et sera plus ou moins adaptée à la représentation des caractères qualitatifs ou quantitatifs.

La Figure13 présente une synthèse des variables visuelles et de leur attribution selon le type de donné.

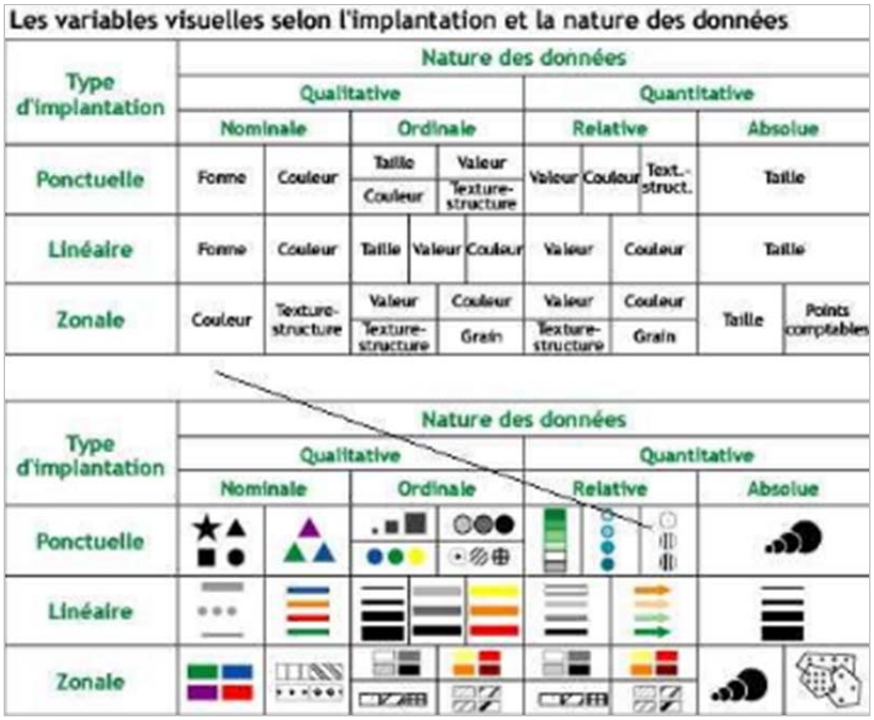


Figure 13 *Synthèse des variables visuelles et de leur attribution selon le type de donné, selon Zanin et Trémélo (2003)*

6. Identifier le(s) traitement(s) de la donnée : création ou calcul d'une nouvelle donnée, regroupement de l'information qualitative ou discrétisation de l'information quantitative.
7. Organiser le langage graphique : la carte est composée de l'image, définie par le fond de carte et la représentation d'un ou plusieurs phénomènes localisés et de son habillage, défini par la légende, le titre, l'échelle, la date et la source des données.

Pour que la carte soit efficace, il faut que l'unité de perception visuelle immédiate (l'image) soit la plus courte possible (Bertin, 1967) ; pour cela il faut que son image et son habillage soient organisés de façon économique, séparative et hiérarchique (Zanin et Trémélo, 2003).

En termes de conception cartographique, le Tableau 12 résume les propriétés de la carte d'aptitude selon les points listés ci-dessus.

1. L'objectif de la carte est de permettre la localisation d'un site et la possibilité de prendre une décision sur une question d'aptitude.
2. La nature de l'information géographique est quantitative relative parce que chaque cellule de la grille matricielle (raster) a obtenu un score, une valeur numérique, et des classes de valeurs sont ensuite définies.
3. Le mode d'implantation est zonale car des patterns de valeurs sont définis en classes, constituant des zones (surfaces).
4. Le mode de représentation est essentiellement le ton (de la couleur) ce qui induit un sens de valeur.
5. Les traitements des données concernent pour la plupart des requêtes, des méthodes de discrétisation et d'agrégation des critères.
6. Les fonds de cartes utilisés sont souvent des Modèles Numériques de Terrain, traité avec des effets d'ombrage, mais des drapages de carte d'aptitude sur des globes virtuels ou des ortho photos sont possibles.

La légende est qualitative dans la mesure où elle indique des attributs à l'aptitude : par ex. zones optimales, moyennes, inadéquates.

1. Objectif	*2. Nature de l'information géographique*	*3. Mode d'implantation*	*4. Mode de représentation*	*5. Traitements des données*	*6. Fond de carte*	*7. Habillage (Légende)*
Localisation d'un site et prise de décision	Quantitative relative	Zonale	Couleur - Ton	Requêtes Méthodes de discrétisation Méthodes d'agrégation	MNT Ombrage Globe virtuel Ortho photo Image satellitaire	Qualitative

Tableau 12 *Propriétés de la carte d'aptitude*

La Figure 14 présente un exemple de cartographie d'aptitude : ici la problématique est d'implémentation de stations de ski.

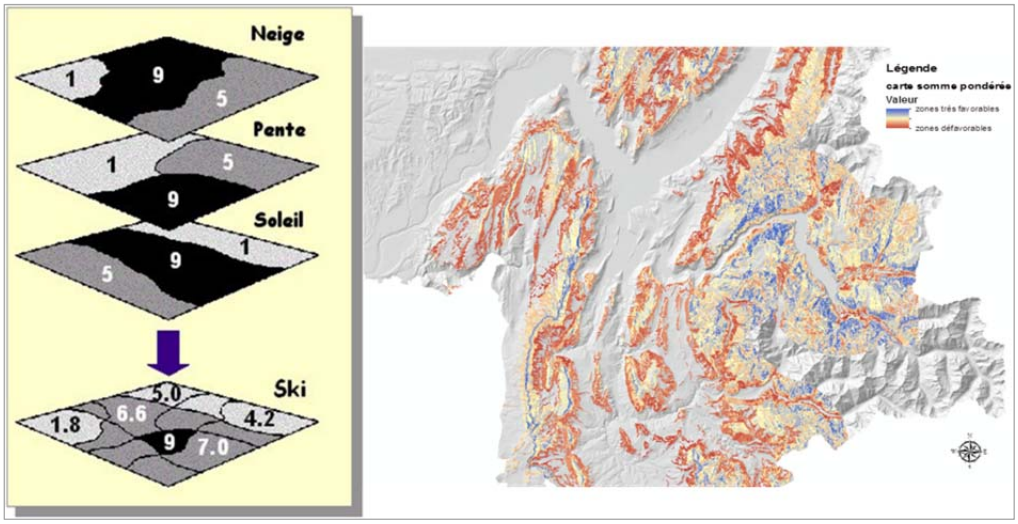


Figure 14 *Schéma de la cartographie d'aptitude pour un problème d'implémentation de station de ski*

Tous les géo-traitements qui caractérisent le processus de cartographie d'aptitude s'effectuent sur un format matriciel : la carte d'aptitude est en effet une grille, autrement dit, une matrice. La grille est constituée de lignes et de colonnes qui présentent l'information thématique. Les cellules (ou pixels) sont définies par les composantes spatiales [X, Y] qui en donnent les caractéristiques (calage, forme, taille) et par les attributs [Z] qui indiquent l'affectation des valeurs (niveau de mesure et type de formalisation). Le degré de finesse de la grille, c'est-à-dire, son niveau de résolution, dépend de l'échelle de la donnée initiale (par ex. un Modèle Numérique de Terrain) ou de la nature des phénomènes représentés ; les dimensions de la cellule, le pas, peuvent aller de quelques kilomètres à 50 cm, dans le cas de la carte présentée en Figure 11 le pas est de 50 m. En termes de transformations cartographiques et de modes de représentation, la carte d'aptitude appartient donc aux familles des cartes surfaciques discrètes régulières, un niveau de mesure ordinal ou quantitatif, une formalisation de type quantitatif et comme variable visuelle, la couleur et le ton, essentiellement (Cauvin et Al., 2007, transformations cartographiques : schéma décisionnel, page 185).

Deux remarques importantes sont à ajouter à cette description sémiologique de la cartographie d'aptitude.

Premièrement, la figuration graphique de l'information sur ce type de carte (scores des sommes pondérées des critères) concerne la **couleur et le ton**. La couleur joue ici un rôle déterminant. Elle est une variable forte, immédiatement perceptible ce qui lui donne un fort pouvoir de différentiation. Elle est ordonnée sous certaines conditions : la couleur seule ne suffit pas pour traduire un ordre, il faut lui ajouter la saturation. Chaque couleur est éclaircie ou foncée par ajout de blanc ou de noir ; on parle alors de dégradé de couleur ou *camaïeu* (saturation). Lorsque dans le spectre des couleurs, un ordre est établi en fonction de l'accroissement de l'intensité, on parle de *gradations harmoniques.* Elles existent pour les tons chauds (jaune-orange-rouge) et pour les tons froids (vert-bleu-violet) (Zanin et Trémélo, 2003). Celles-ci sont moins efficaces que le camaïeu : elles sont plus difficiles à exécuter car il faut toujours que la couleur suivante soit plus foncée. La couleur est utilisée dans toutes les implantations mais elle trouve son efficacité maximale en implantation zonale. En effet, les différences de couleurs sont autant plus sensibles que la surface colorée est grande : pour établir une différenciation sélective, on utilisera 4 ou 5 couleurs différentes ; pour percevoir un ordre en implantation ponctuelle ou linéaire on se contentera de 5 paliers alors qu'en implantation zonale on peut atteindre 10 paliers (Zanin et Trémélo, 2003). Ces indications préconisent l'importance que nous attribuerons à l'usage de la couleur soit d'un point de vue pédagogique - comment les étudiants s'approprient cette compétence -, soit d'un point de vue cognitif -comment les étudiants raisonnent avec et grâce à la couleur-.

Deuxièmement, l'intérêt du fond de carte est, dans le cadre de la cartographie d'aptitude, un élément décisif pour le contrôle et la vérification des informations représentées ; la validité de la carte est subordonnée à la corrélation avec la représentation de la réalité du terrain. Grâce aux technologies SIG, les résultats obtenus lors de la construction de cartes de susceptibilité sont souvent drapées sur des fonds de carte, que ce soit des cartes d'infrastructures, des modèles numériques de terrain représentant le relief, des globes virtuels, des images satellitaires, des orthophotos ou tout simplement des cartes comportant des limites administratives. Nous nous intéressons plus particulièrement aux superpositions des cartes d'aptitude sur des couches réalisées dans les SIG avec des effets de relief sur le MNT, tels que l'ombrage.

L'interprétation des couches avec des **effets de relief**, liée à la perception de la profondeur sur

une scène 2D ou 3D, a été largement explorée en littérature : nous nous appuyions sur la taxonomie des signaux ou indices de profondeur établie par Kraak (1988). L'auteur distingue deux types fondamentaux d'indices, les physiologiques et les « picturaux ». Les premières relèvent des processus physiques de la vision, tels que l'accommodation, la convergence et la disparité rétinale. Les deuxièmes dépendent de la structure de l'objet et de l'effet visuel que l'on veut produire ; ils sont créés par des techniques de perspective, comme la projection oblique, la perspective linéaire ou la taille de l'image rétinale (plus les objets sont petits, plus ils apparaissent loin dans la scène) ou par des techniques non-perspectives, comme l'idée de mouvement, l'interposition, l'ombre (shadow : un indice d'obstruction où un objet bloque l'arrivée de la lumière sur un autre objet), l'ombrage (shading : le gradient d'illumination qui indique la forme et l'orientation d'une surface), les effets stéréoscopiques de la couleur (la différence des longueurs d'onde des couleurs donne l'apparence de distances différentes, par exemple, le rouge apparait plus proche que le bleu) (Kraak, 1988). Beaucoup d'intérêt a été apporté aux procédures de représentation du relief selon des approches non-perspectives de l'ombrage et la couleur (Imhof 1982 in MacEachren, 1995). La vision humaine est sensible à la texture et à la valeur de la luminosité : l'œil humain peut immédiatement faire la différence entre une luminosité qui est reproduite à partir des valeurs de pente et d'orientation et une luminosité qui est réelle. Les surfaces réelles ne reflètent pas la lumière aussi parfaitement qu'une surface virtuelle : l'environnement réel a des interactions complexes entre lumière directe et reflétée que le système visuel humain s'attend de perçoir. Pour reproduire une luminosité réelle, il faut considérer les variations de reflets qui ont lieu dans l'environnement réel : un des points sur lequel les nombreuse recherches menées sur ce sujet s'accordent, est que la source de la lumière simulée doit provenir d'au-dessus de la scène et préférablement de la gauche. Cela s'explique par le phénomène naturel de la lumière qui arrive du haut et que, dans l'hémisphère nord, elle arrive de nord-ouest (MacEacrhen, 1995). Aujourd'hui, beaucoup de cartographes créent des représentations planes du relief qui reproduisent des effets de profondeur avec une approche « sans-perspective », grâce aux techniques de nuances de couleurs ou d'ombrage offertes par les SIG. Dans le SIG ArcGIS 10.0, l'outil 'Ombrage', permet d'obtenir l'éclairage hypothétique d'une surface en déterminant les valeurs d'éclairage de chaque cellule d'un raster. Cette fonction définit la position d'une source lumineuse hypothétique et calcule les valeurs d'éclairage de chaque cellule par rapport aux cellules voisines. L'ombrage améliore nettement la visualisation d'une surface lors de l'affichage d'analyses ou de diagrammes, en particulier si la transparence est utilisée. Par défaut, l'ombre et la lumière sont des nuances de gris associées à des entiers de 0 à 255 (du noir au blanc).

Comme la vision humaine est adaptée à un monde tridimensionnel, l'interprétation de la profondeur dans une scène visuelle est un processus complexe qui peut être facilité par la combinaison de signaux interdépendants, tels ceux décrits par la taxonomie de Kraak (MacEachren, 1995). La perception 3D est donc un atout indispensable dans la cartographie d'aptitude, notamment lorsqu'il s'agit de traiter des problématiques environnementales liée la morphologie du sol : par ex., évaluer la stabilité des versants ou l'exposition… ou encore, comme dans le cas d'une analyse multicritère, évaluer la conformité entre les surfaces retenues comme favorables et la réalité du terrain. L'usage des effets de relief est un des principaux paramètres de notre analyse des processus cognitifs des sujets, car il apporte (ou pas) un aide essentiel au raisonnement visuel.

3. Conclusions

A l'issue de ce tour d'horizon épistémologique sur la cartographie d'aptitude, nous rappelons que notre problématique spatiale concerne la recherche de site, que nous abordons sa résolution avec des méthodes de superposition matricielle, multi-attribues, formalisées par des opérations booléenne et combinatoires linéaires pondérées (WLC). De façon générale, une approche multicritère dans un SIG peut se schématiser à travers des phases « d'input » de données, de traitements et « d'output »: la Figure 15 illustre clairement cette approche sur une problématique de localisation de sites aptes à l'agriculture urbaine à Ouagadougou (Kêdowidé, 2010).

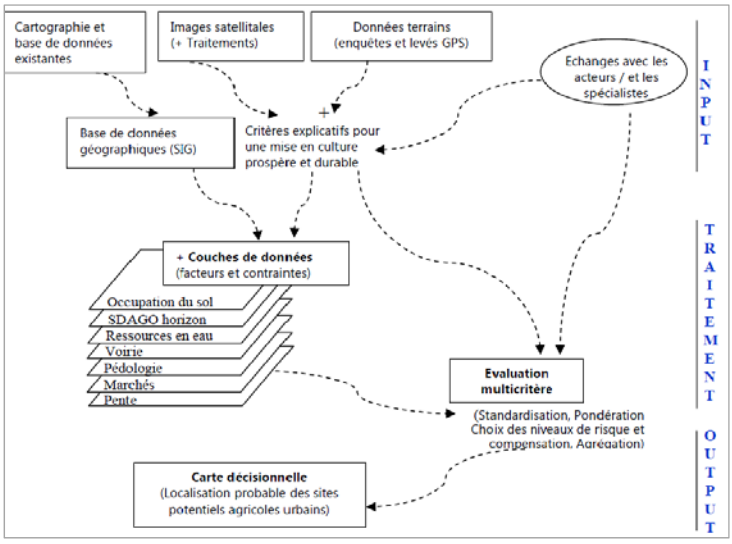


Figure 15 *Schéma procédurale d'ASMC sur un problème de recherche de site agricoles. Kêdowidé, 2010).*

Cette schématisation de démarche globale, l'ensemble d'éléments notionnels et procéduraux que nous avons retenus de la lecture épistémologique de la cartographie d'aptitude, ainsi que les principaux écueils soulignés par la littérature, nous apportent un cadre notionnel et technique de mise en œuvre de l'activité sur lequel on s'appuiera pour analyser les actions des utilisateurs.

Ainsi nous proposons un scénario de processus de résolution d'un problème de localisation de site. La Figure 16 présente la procédure de cartographie d'aptitude.

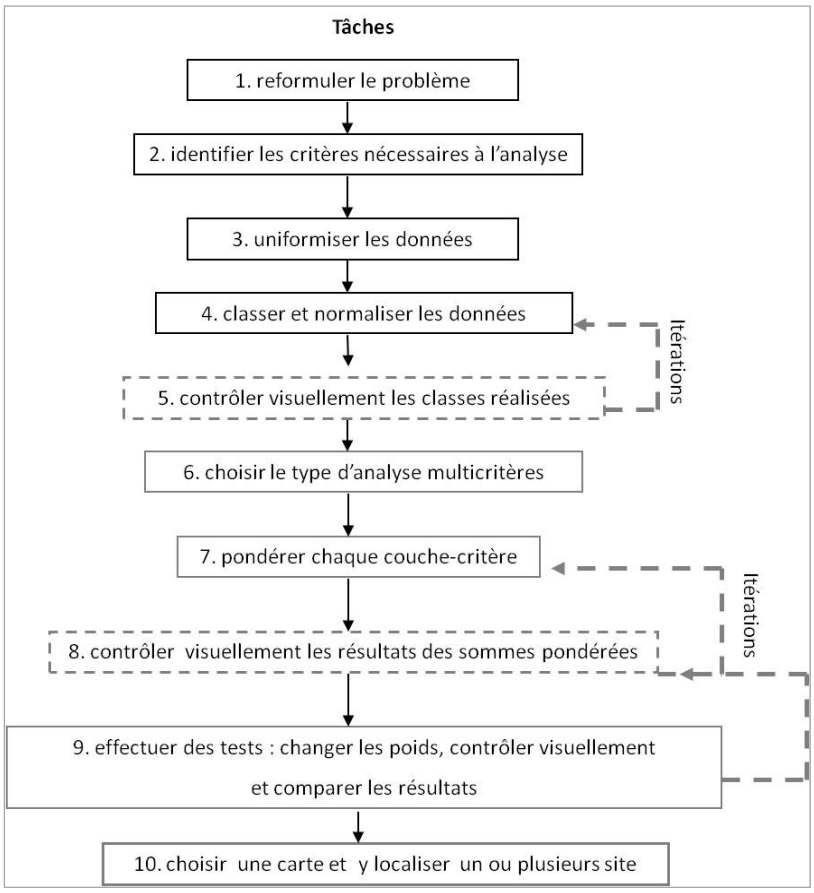


Figure 16 *Schéma générale de cartographie de susceptibilité avec des méthodes de Combinaison Linéaire Pondérée (Somme Pondérées)*

Ce scénario est analysé à travers des « études préliminaires » qui l'examinent d'un point de vue technique (comment concrètement il se déroule dans un SIG), conceptuel (quels concepts sont appelés pour pouvoir le réaliser) et opérationnel (comment des étudiants l'appréhendent). L'analyse du scénario fait l'objet du Chapitre III, ce qui constitue le commencement du

processus itératif de tests, réglages et validations propres à la Design Based Resarch (voir Introduction).

CHAPITRE III : LES ANALYSES PRÉLIMINAIRES

Ce chapitre présente les analyses dites « préliminaires » en ce sens qu'elles sont intervenues avant la définition de questions de recherche précises et la mise en œuvre d'une situation d'apprentissage pour le recueil de données permettant de répondre à ces questions. Ces analyses ont pour but de commencer à explorer une thématique peu étudiée, à savoir l'apprentissage des SIG par l'analyse multicritère. Dans une démarche de Design-Based Research (Ruthven et Al., 2009), ce sont des analyses qui s'effectuent avant une phase de conception, et qui comprennent le plus souvent : l'analyse épistémologique des contenus visés par l'enseignement, l'analyse de l'enseignement usuel et de ses effets, l'analyse des conceptions des élèves, des difficultés et obstacles qui marquent leur évolution, l'analyse du champ des contraintes dans lequel va se situer la réalisation didactique effective.
Dans le cadre de notre problématique de cartographie, les analyses préliminaires ont été conduites sous différentes approches :

- une approche thématique qui permet de décrire, selon le cadre épistémologique de référence (Malzcewski, 2004) (voir Chapitre II), les procédures et les propriétés de l'activité ;
- une approche fonctionnelle qui permet d'examiner la représentation des connaissances de l'activité et leur utilisabilité dans les environnements SIG (Meng et Malzcewski, 2009), notamment dans ArcGIS et IDRISI ;
- une approche didactico-professionnelle qui permet de décrire l'activité selon les modèles d'organisation des connaissances, les schèmes d'activité (Vergnaud, 1990) ;
- une approche exploratoire sur le terrain qui observe l'activité d'un groupe d'étudiants, entant que groupe pilote, lors d'une tâche de cartographie de susceptibilité, et permet de relever les principales difficultés de résolution.

Les objectifs des analyses préliminaires sont multiples : l'approche fonctionnelle éclaire sur l'efficacité des ergonomies des outils de résolution ; l'approche par les champs conceptuels permet de formaliser les concepts, les actions et justifications des actions utilisées pour la résolution du problème ; l'approche exploratoire sur le terrain fournit un aperçu des difficultés rencontrées par les utilisateurs et suscite, par conséquent, la formulation d'hypothèses. A l'issue de ce tour d'horizon sur l'ensemble des caractéristiques de l'activité

de cartographie de susceptibilité en tant qu'activité pragmatique, les hypothèses, les questions de recherche et les fondements du protocole expérimental peuvent être posés.

1. L'approche fonctionnelle : les méthodes ASMC dans les SIG

En tant qu'utilisateur de SIG, nous avons à notre disposition une série d'outils pour la mise en pratique des méthodes d'analyse multicritère. Selon leur ergonomie et la démarche méthodologique qu'ils appréhendent, ces outils sont présentées dans des environnements plus ou moins « user-friendly ». Frank (1993) souligne que "le rôle de l'interface dans les interactions efficaces du système appelle à des moyens formels d'évaluation de l'utilisabilité. L'interface doit inclure des conditions conceptuelless de l'utilisateur afin de faciliter la résolution de problèmes, et ces exigences doivent être prises en compte lors du processus de conception, et non après qu'un système ait été mis en place » (Traduction libre, Franck, 1993)
Ce paragraphe présente un succinct tour d'horizon des techniques de couplage SIG-AMC et un focus sur les spécificités de cette intégration dans deux logiciels de référence : ArcGIS 10.0 et IDRISI. Nous nous intéressons d'une part à ArcGIS Desktop V.10 parce que nous utilisons ce SIG dans le cadre de cette recherche CIFRE-ANRT, dont le partenaire industriel est ESRI France (cf Avant Propos) ; et d'autre part à IDRISI (Clarks Labs and University) car il constitue la première tentative d'intégration SIG-AMC (Eastman, 1993), notamment pour les procédures de prise de décision Multi- Critères et Multi-Objectifs qui ont été développées.
Ce paragraphe ne présente pas une évaluation d'usabilité des logiciels observés; pour cela se référer à l'article :*Usability evaluation for a web-based public participatory GIS: A case study in Canmore, Alberta* (Meng et Malczcewski, 2009).

1.1. Les modes d'intégration SIG – AMC

Selon. Chakhar, (2006) de nombreux arguments identifiés dans la littérature (Laaribi, 2000 ; Chakhar et Martel, 2003, 2004 ; Malczewski, 2004) jouent en faveur d'un couplage entre SIG et AMC, qui permette de combler leurs lacunes respectives : d'une part la difficulté pour les SIG à prendre en compte la dimension multicritère inhérente des problèmes à caractère décisionnel, d'autre part les limites de l'AMC lorsqu'il s'agit de représenter la dimension spatiale des problèmes. Les chercheurs et les spécialistes s'accordent sur l'intérêt de conjuguer les potentialités des deux outils pour créer des systèmes d'aide à la décision

spatiale plus poussés. L'intégration SIG-AMC constitue une voie privilégiée pour faire évoluer les SIG vers de véritables systèmes d'aide à la décision (Laaribi 2000 ; Joerin 1997 ; Paegelow, 2004 ; in Chakhar 2006).

Selon Chakhar (2006, p. 40-42), trois types d'intégration des approches informatiques et spatiales sont possibles : l'intégration indirecte, l'intégration encastrée et l'intégration complète.

1. Dans l'intégration indirecte, les deux outils, un SIG et un logiciel d'AMC, restent indépendants et le dialogue entre eux se fait à travers un *système intermédiaire.* Ce dernier permet de re-formuler et re-structurer les données obtenues suite à l'opération de superposition dans le SIG en une forme convenable pour le logiciel d'AMC. Les résultats de l'analyse (complètement effectuée par le logiciel d'AMC) peuvent être visualisés par le logiciel d'AMC ou exportés, via le système intermédiaire, vers le SIG pour les visualiser ou les stocker (début des années 90).
2. Dans l'intégration encastrée, les deux logiciels restent indépendants mais une seule interface (le plus souvent celle du SIG) est utilisée. Le dialogue entre les deux systèmes se fait toujours via un système intermédiaire mais pour l'utilisateur l'intégration est apparemment réalisée puisque les échanges de données lui sont transparents (fin '90) .
3. Dans l'intégration complète, on obtient un système SIG-AMC intégré possédant une interface unique et une base de données commune. Dans ce mode, les fonctionnalités de l'analyse multicritère sont activées directement comme toute autre fonction de base du SIG. La base de données du SIG est renforcée afin qu'elle supporte aussi bien les données à référence spatiale que les paramètres nécessaires à l'application des techniques d'analyse multicritère.

La plupart de travaux d'intégration SIG-AMC (Chakhar, 2006) ont opté soit pour l'intégration indirecte (33.2%) soit pour l'intégration encastrée (29.8%). L'intégration complète n'est utilisée que dans 11.0%. La plupart des travaux d'intégration proposent l'incorporation d'une seule ou d'un nombre limité de(s) méthode(s) d'AMC dans le SIG. Les problèmes de décision spatiale sont très différents et il n'est pas possible qu'une seule méthode puisse être appliquée avec succès à tous ces problèmes. Par ailleurs, la "démocratisation" de l'utilisation du SIG a élargi son champ d'application mais a fait naître en même temps la nécessité de diversifier les techniques d'analyse et de modélisation disponibles dans les SIG y compris celles de l'AMC.

Selon les chiffres reportés par Malczewski (2006), 71.3% d'articles ou rapports de recherche sur les travaux d'intégration SIG-AMC concernent des *méthodes discrètes* et 28.7% concernent des *méthodes continues*.

Malgré certaines lacunes qui concernent essentiellement le support dans le choix des méthodes et des procédures, les potentialités d'intégration entre SIG et AMC, illustrée par le nombre croissant de travaux publiés depuis 1990, sont aujourd'hui de plus en plus explorées.

1.2 Les fonctionnalités d'ASMC dans ARCGIS V.10

Dans ARCGIS ARCINFO V. 10 l'intégration SIG-ASMC est de type complet. Les méthodes d'analyse spatiale multicritère interviennent essentiellement dans les fonctionnalités de *Superposition (Overlay*) et d'*Algèbre Spatiale*, utilisées pour la modélisation d'aptitude. Les outils qui permettent de lancer ces fonctionnalités sont localisés dans la *Toolbox, boite Spatial Analyst, caisse Superposition, outils Appartenance Floue, Somme Pondérée, Somme Floue, Superposition Pondérée.* Les outils « pondérés », tout en présentant quelques différences fonctionnelles, font appel à l'algorithme Weighted Linear Combination (WLC) un des plus employés pour résoudre des problèmes multicritères, notamment la sélection de sites et de modèles d'aptitude. La principale difficulté d'application des méthodes d'analyse multicritère sur ARCGIS, réside dans l'organisation alphabétique et non conceptuelle des fonctionnalités dans la boite à outils. La procédure déroulée plus haut, ne trouve pas une traduction ni ergonomique, ni logique et un utilisateur novice n'est pas accompagné dans son choix d'étapes et de méthodes. Une confusion supplémentaire est générée par les outils de superposition vectorielles qui présentent la même terminologie (et en partie les mêmes principes d'analyse multicritères, mais qui ne sont pas explicitées). La Figure 17 illustre l'environnement de Superposition dans Spatial Analyst d'ArcGIS.

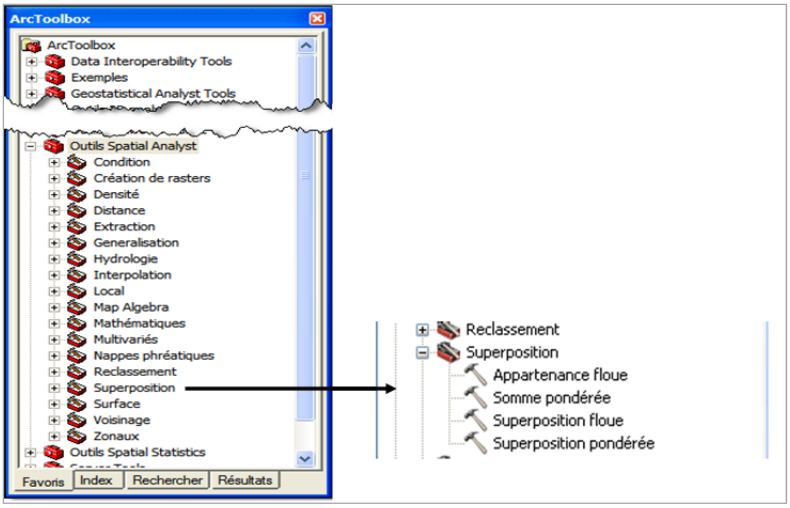
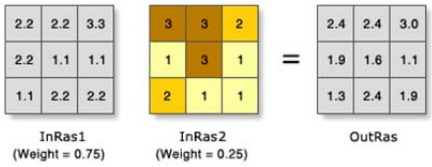
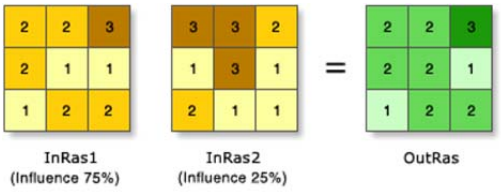


Figure 17 *Capture d'écran sur les outils d'Analyse Spatiale de la Toolbox, détail de la boite Superposition*

Un tableau récapitulatif (Tableau 13) est donné ci-dessous afin d'illustrer les principales différences entre les approches de Somme Pondérée et Superposition Pondérée. A destination des usagers, ce tableau a la seule ambition de synthétiser et de clarifier les opérations souvent très similaires qui caractérisant les deux fonctionnalités

Typologie	**Somme Pondérée**	**Superposition Pondérée**
Données	Toutes les valeurs décimales et les entiers.	Toutes les valeurs entières et discrètes ; un raster en décimales doit d'abord être converti en raster d'entiers (classé en discrètes) avant de pouvoir être utilisé.
Classes	Le reclassement des valeurs à l'intérieur de chaque couche est nécessaire : la combinaison de plusieurs couches de données continues avec des plages différentes n'est pas toujours significative.	Les classes sont indispensables.
Poids/ Pondérations	Les valeurs de pondération peuvent être toute valeur décimale positive ou négative, qui n'est pas restreinte à un pourcentage relatif ou égale à 1.0.	La pondération est un pourcentage relatif, et la somme des pondérations des pourcentages d'influence doit être égale à 100.

Typologie	**Somme Pondérée**	**Superposition Pondérée**
Echelle d'évaluation	N'existe pas	Les couches ont toutes le même nombre de classes, ce qui constitue une mise à l'échelle obligatoire (échelle définie, graduée par défaut de 1 à 9).Les valeurs de préférence attribuées à l'échelle doivent avoir une signification identique d'une couche à l'autre.
Calcul	 Les valeurs des cellules sont multipliées par leur facteur de pondération, puis les résultats sont cumulés pour créer le raster en sortie. Ex. Les valeurs pour les deux entrées deviennent (2,2 * 0,75) = 1,65 et (3 * 0,25) = 0,75. La somme de 1,5 et de 0,75 est 2,4.	 Les deux rasters en entrée ont été reclassés selon une échelle de mesure commune de 1 à 3. Chaque raster se voit affecter un pourcentage d'influence/importance. Les valeurs des cellules sont multipliées par leur pourcentage d'influence, puis les résultats sont cumulés pour créer le raster en sortie. Les valeurs pour les deux entrées deviennent (2 * 0,75) = 1,5 et (3 * 0,25) = 0,75. La somme de 1,5 et de 0,75 est 2,25. Puisque le raster en sortie généré est de type entier, la valeur finale est arrondie à 2.
Exclusion des données	Pas d'exclusion de données	L'option 'Restreint' (dans l'échelle d'évaluation/des préférences) attribue une valeur à la cellule qui correspond à la valeur minimum de l'échelle d'évaluation, moins 1.
Résultat	Raster continu avec les valeurs « élevées » étant les plus favorables.	Raster discrétisé avec les classes plus hautes étant les plus favorables.
Arrondi	Pas nécessaire. Si on veut classer la couche résultat on peut utiliser la méthode mathématique (comme en SupP) ou les méthodes de classements statistiques.	On peut avoir des résultats avec virgule, mais la fonctionnalité effectue un arrondi mathématique (ex. pour 4 classes : <= 1,5 = 1 ; < 1,5 et 2,5 > = 2 ; <2,5 et 3,5= «3 ; <3,5 et 4 > = 4. Cette dernière est plus serrée.)

Utilisation	Pour conserver la résolution d'un modèle ou lorsqu'une sortie en virgule flottante ou des pondérations décimales sont nécessaires.	Pour la modélisation d'aptitude et doit être utilisé pour garantir le suivi des méthodologies appropriées.

Tableau 13 *Comparaison des opérations Somme Pondérées et Superposition Pondérée dans ArcGIS 10.0*

1.3 Les fonctionnalités d'ASMC dans IDRISI

Au début des années 90, associé au *United Nations Institute for Training and Research* (UNITAR), le Clark Labs a développé une suite d'outils logiciels pour l'attribution de ressources qui ont été proposées pour la première fois avec la version MS-DOS d'IDRISI 4.1. Ils se concentraient sur les procédures de prise de décision Multi-Critères et Multi-Objectifs - un domaine qui peut être regroupé sous l'appellation "Analyse de la stratégie décisionnelle" (*DecisionStrategyAnalysis*).

Pour effectuer les procédures de prise de décision, IDRISI propose dans un même environnement un outil dédiés : l'assistant *Multi-Criteria/Multi-ObjectiveDecisionWizard* dans le menu *GIS Analysis/Decision Support/DecisionWizard.*Deux procédures sont présentées dans l'évaluation multi-critère :

- la première procédure implique une superposition booléenne (*Boolean overlay*) avec des opérateurs d'intersection (ET, *AND*) ou d'union (OU, *OR*) qui jouent le rôle de contraintes. L'évaluation booléenne offre une forme extrême de prise de décision. Si les critères sont combinés avec un AND logique (l'opérateur d'intersection), il faut qu'un lieu réponde positivement à chaque critère pour qu'il soit retenu comme apte. Si un seul critère n'arrive pas à être atteint, le lieu sera exclu. Un tel procédé est "anti risque", il choisit des zones basées sur la stratégie la plus prudente possible. D'autre part, si un OU logique (union) est employé, c'est l'inverse qui se produit - pour qu'un pixel soit inclus dans la zone d'aptitude, il suffit qu'un seul critère satisfasse à la requête.

- la deuxième procédure, la combinaison linéaire pondérée (WLC, *weighted linear combination*), qui joue le rôle de facteur, comporte des coefficients de pondération compris entre 0 et 255 (habituellement). Une faible valeur de l'un des facteurs pour n'importe quel emplacement peut être compensée par une forte valeur d'aptitude d'un autre facteur. La façon

dont les facteurs se compensent sera déterminée par un ensemble de pondérations (*Factor Weights*) indiquant l'importance relative de chaque facteur Cet opérateur n'est ni un AND ni un OU - il se trouve quelque part entre ces deux extrémités. Pour les raisons qui sont liées à leur mise en application, la stratégie booléenne domine les approches vecteurs en MCE, alors que WLC domine les solutions en mode raster. Cependant, ni l'une ni l'autre ne s'impose - elles représentent simplement deux visions très différentes du processus de décision. Le résultat est une carte d'aptitudes avec des zones masquées par des contraintes booléennes et finalement classée pour permettre la décision finale.

IDRISI inclut également une troisième option pour l'évaluation multicritère, connue sous le nom de "moyenne par pondération contrôlée" (*ordered weighted average* OWA, *cf*. Eastman et Jiang, 1996). Cette méthode offre un éventail complet de stratégies de décision basées sur la recherche de compromis entre différents degrés de risque (Godard, 2010). Le Figures. 18 et 19 présentent l'environnement de l'Assistant.

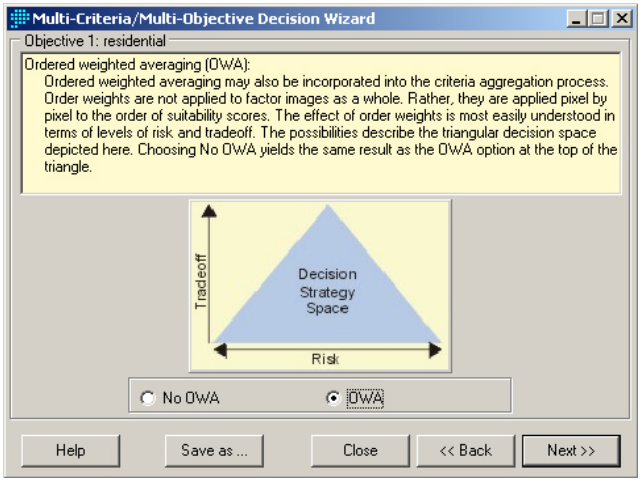


Figure 18 *Copie d'écran de l'Assistant MCE*

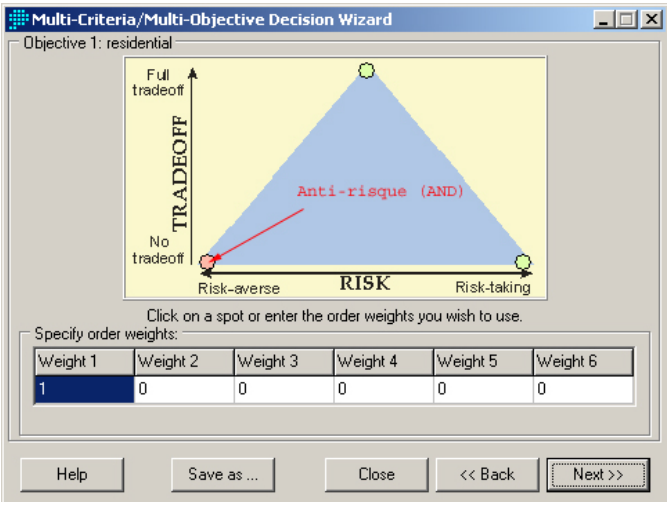


Figure 19 *Niveau de risque et compensation nul*

1.4 Bilan

Dans les systèmes d'information à intégration complète des méthodes d'analyse spatiale multicritère, tels que ArcGIS et IDRISI, des environnements d'analyse présentant différentes démarches sont identifiés. Chez ArcGIS, on dénote une approche « outils » : toutes les fonctionnalités d'agrégation des critères et de pondérations sont organisées selon un principe d'ordre alphabétique et thématique. Chez IDRISI, on dénote une approche « logique » : l'accent est mis sur les méthodes d'analyse qui sont présentées dans leur ensemble, selon une logique de stratégie et de choix, la fenêtre de l'Assistant permettant à l'utilisateur de manipuler et visualiser son propre choix. Les deux approches impliquent des connaissances différentes de la part de l'utilisateur. Avec ArcGIS, en plus de la maitrise des techniques de superposition raster, des connaissances procédurales spécifiques (classement, conversions de format) dont les fonctionnalités ne sont pas uniquement localisées dans l'environnement de superposition, sont requises. L'utilisateur doit bien connaitre les étapes de la procédure de solution de son problème d'aptitude et les fonctionnalités correspondantes pour mener à bien l'analyse multicritères. Avec l'Assistant de Décision d'IDRISI, l'utilisateur peut aborder l'analyse en saisissant les tenants et aboutissants des concepts sous-jacents les méthodologies proposées et s'approprier dans un deuxième temps des aspects techniques.

Dans le cadre de notre recherche le SIG utilisé est ArcGIS 10.0. Le caractère « non logique » de son architecture est à prendre en compte : les utilisateurs que nous allons observer sur une

problématique de cartographie d'aptitude, s'initient à l'usage d'ARCGIS, il faudra prévoir des aides notionnels et techniques pour les accompagner dans le choix des fonctionnalités.

Cette analyse technique des implémentations des fonctionnalités d'ASMC dans les SIG ArcGIS et IDRISI préconise l'analyse des concepts et des notions qui sous-tendent ces technologies. En effet, l'appropriation de compétences techniques, en l'occurrence les fonctionnalités de WLC ou Booléennes, demande à l'utilisateur d'activer des connaissances spécifiques. Le paragraphe suivant présente la prise en compte des connaissances et des concepts généraux nécessaires à la réalisation d'une carte d'aptitude avec les méthodes multicritères sur ArcGIS.

2. L'Approche cognitive : schème d'activité et champs conceptuels

Ce paragraphe présente le cadre théorique issu de la psychologie cognitive (Vergnaud, 1990) et adapté ensuite à la didactique professionnelle (Coulet et. Chauvigné, 2005) que nous adoptons pour notre démarche. Nous adoptons ce cadre pour deux raisons : d'une part, car notre problématique disciplinaire bien que s'inscrivant dans un contexte d'enseignement (supérieur), appartient à la famille des problématiques professionnelles ; d'autre part, car l'analyse des concepts sous-jacents à une activité est le noyau de notre recherche ; ce cadre théorique fourni une entrée didactique à cette étude.

2.1 La théorie des « Champs Conceptuels »

L'analyse, que ce soit de l'activité ou de la pratique doit être structurée, opérationnelle et exploitable en formation ou en recherche. Afin d'analyser l'activité de cartographie d'aptitude selon une approche cognitive et didactique, nous nous appuyons sur la théorie des « champs conceptuels » de G. Vergnaud, (1990). La théorie des Champs Conceptuels est une « …théorie cognitive, qui vise à fournir un cadre cohérent et quelques principes de base pour l'étude du développement et de l'apprentissage des compétences complexes, notamment de celles qui relèvent des sciences et des techniques » (Vergnaud, 1996, p. 197). Afin d'expliciter la démarche d'analyse, quelques précisions doivent êtres apportées sur les notions d'activité, de schème et de concept que nous allons utiliser par la suite.

L'**activité** est définie comme un « ensemble d'actions et d'opérations humaines visant un but déterminé » (Vergnaud, 1990). L'attention est portée sur ce qui est réalisé, ou en train de se réaliser afin de donner un sens à la transformation en cours, aux procédés appliqués. L'activité englobe la conduite qui n'est que la partie visible de l'activité. Pour analyser les conduites, il faut s'interroger sur l'activité de représentation sous-jacente. Le schème d'activité est alors essentiel pour répondre à cette interrogation.

D'après les influences des théories de Piaget (1991) et de Vygotski (1934), Gérard Vergnaud défend que les schèmes sont au centre du développement cognitif. Il a défini le développement cognitif comme un développement d'un grand répertoire de schèmes, touchant différents aspects de l'activité humaine, cela en raison des expériences. C'est à travers l'expérience que l'individu s'adapte à des situations et l'organisation d'une activité évolue en s'adaptant. Ainsi, c'est à travers le développement des formes d'organisation d'une activité

(gestes, compétences, interactions, activités langagières, affectivité) que les schèmes sont construits et modifiés.
Un **schème** selon cet auteur, est une « organisation invariante de l'activité pour une classe de situations données » (Verganud, 2001, pag. 4). Plus précisément, le schème est :

- une entité cognitive qui génère l'activité du sujet : aussi bien l'activité comportementale (les gestes, les regards, les verbalisations, etc.) que l'activité cognitive qui lui est sous-jacente (la perception et la prise d'information, le raisonnement, l'adaptation, le contrôle méta-cognitif, etc.).
- une totalité cognitive structurée : il coordonne les différents registres et les différents types d'activité (gestes / verbalisations / raisonnement / prise d'information / etc.). Le schème a donc pour rôle d'agencer, de manière cohérente, l'activité.
- dynamique :il doit gérer un incessant ajustement à ces perturbations. Cette adaptation en situation se traduit par des « calculs inférentiels » (opérations de pensée consistant à analyser un « problème » pour en trouver une « solution ») et des réorganisations.
- relatif à une classe de situations : à chaque catégorie de tâches à réaliser ou d'action à conduire correspond un schème (voir plusieurs).

Un schème est formé de quatre composantes :

1. But, sous-but et anticipations : ce sont les attentes du sujet quant aux effets qu'il compte obtenir par la mise en œuvre des règles d'action.
2. Règles de l'action, prise d'information et contrôle (règle de type 'si… alors…) : elles représentent la partie effectrice du schème et produisent des effets sur la tâche et la situation traitées.
3. Invariantes opératoires (concepts en acte et théorème en acte) : ils désignent ce que le sujet tient pour vrai et tient pour pertinent au regard de la situation ou de la tâche.
4. Possibilités d'inférence en action (raisonnements pour 'calculer' les règles et anticipations) : ce sont les paramètres qui déterminent la stratégie, les choix de règles d'actions et de buts.

A partir de la façon dont Vergnaud (1997) définit le concept de schème, en introduisant des éléments à cette définition, il est possible de réaliser une analyse du développement conceptuel consécutif à l'adaptation des individus aux nouvelles situations : dans le cas d'un échec, l'individu modifie le schème utilisé ou même il change de schème. Un élève qui se trompe est souvent un élève qui n'a pas bien exécuté un schème. Soit il adapte mal un schème

à la particularité de la situation à traiter (problème d'inférence), soit il mobilise un schème inadapté à la situation à traiter (défaut de conceptualisation), soit il a élaboré un théorème-en-acte faux.

Par rapport au développement conceptuel, un **concept** est appris par les individus quand ils dominent trois ensembles de facteurs en relation avec ces concepts, à savoir:

1. un ensemble de représentations symboliques qui sont socialement utilisées pour véhiculer des idées sur le concept (signifiant). L'invariance du signifiant aide à l'identification du signifié et à sa transformation en objet de pensée ;
2. un ensemble d'invariants opérationnels ou de propriétés du concept (signifié) ;
3. un ensemble de situations qui donnent du sens aux concepts (Vergnaud, 2001).

Quand les individus commencent à dominer ces dimensions d'un concept, celui-ci commence à faire sens pour lui. Ainsi, un concept est progressivement appris quand les individus amplifient les formes possibles de représentation et les relations avec des situations diverses. Les concepts ne font pas sens lorsqu'ils sont isolés, mais ils coexistent dans un réseau de concepts, auquel Vergnaud donne le nom de champ conceptuel. Un champ conceptuel « est à la fois un ensemble de situations et un ensemble de concepts ; ensemble de situations dont la maîtrise progressive appelle une variété de concepts, de schèmes et de représentations symboliques en étroite connexion ; ensemble de concepts qui contribuent à la maîtrise de ces situations » (Vergnaud, 2007, p. 9). Nous pouvons dire alors qu'un concept se développe à partir de plusieurs situations et une situation peut être analysée à partir de plusieurs concepts (De Moura Braga, 2009).

2.2. Le schème d'activité pour la cartographie d'aptitude

Sur la base de ce cadre théorique, nous avons décrit l'activité de cartographie d'aptitude, selon les composants du schème d'activité afin d'identifier les invariants opératoires et les règles d'action qui la caractérisent. La cartographie d'aptitude répond à un problème de localisation de site pour l'implémentation d'une station de ski en Isère. Le niveau de description du schème correspond à la procédure de résolution du problème. Le contexte général du problème peut être décrit par deux composantes :

1. Invariants opératoires :

- connaissance des caractéristiques géologiques d'une région alpine avec ses incidences sur la morphologie du terrain (par la formation et l'expérience)
- connaissance des domaines skiables alpins et de leurs configurations (par la documentation et par l'expérience)
- connaissance de la méthode de superposition de couche smatricielles qui permet, dans un SIG, de calculer l'apport de chaque cellule pour un objectif fixé, prenant en compte toutes les caractéristiques qui interviennent sur la cellule
- connaissance d'autres méthodes d'analyse multicritères du SIG et possibilités de les comparer.

D'autres invariants pourraient être observés, à savoir ce que le sujet tient pour vrai ou pertinent pour résoudre la tâche en cours.

2. Inférences et stratégies :

Afin de concevoir une classe de problèmes d'analyse multicritère incluant une carte d'aptitude, nous faisons la liste des variables du problème. Nous indiquons également les différentes valeurs qu'une variable donnée peut prendre. Un problème est décrit par le choix d'une (ou plusieurs) valeur(s) pour chacune de ces variables:

- ✓ *Type d'analyse* : Multicritère, booléenne, statistique, requêtes..
- ✓ *Type d'expertise* : Géologique, ingénierie de montagne, direction et management des stations, collectivités.
- ✓ *Type de logiciel* : ArcGIs ,MapInfo, Idrisi, QuantumGIS..
- ✓ *Objectif* : Recherche de sites aptes à .. , à risque, observations, simulations
- ✓ *Exploitation des résultats* : Communication, prise de décision
- ✓ *Format des données* : Vecteurs, rasters, tableaux
- ✓ *Accessibilité aux données* : Disponibles en interne ou dans les institutions (IGN, BRGM),
- ✓ *Type de milieu* : Naturel composite (montagne, côtes), anthropique
- ✓ *Taille du milieu* : Très vaste, moyen, petit (évaluer en hectares ou en km de pistes)
- ✓ *Type de structure* : Remontées mécaniques, pistes, retenues d'eau, infrastructures, urbanisation..
- ✓ *Type de public* : Niveau des usagers (tous le monde, débutant, avancé, expert)

La procédure de résolution est décrite dans le Tableau 14 ci –après.

1. Règles d'action	**2. Invariants opératoires**	**3. Inférences et stratégies**	**4.Anticipations**	**5. Observables**
1. Reformuler le problème - appliquer une méthode d'analyse pour identifier des zones propices à implantation d'un domaine skiable. - aborde rle problème du côté du géologue, fournir une étude qui est rédigée et accompagnée par une (ou plusieurs) carte(s) d'analyse réalisées avec ArcGIS.	*Voir contexte général*	*Voir contexte général*	La reformulation permet de bien comprendre les objectifs du travail à faire	Liste des contraintes : - pistes raides - accessibilité d'une grande ville
2. Identifier les critères « théoriques » - se renseigner avec la documentation spécialisée - observer les installations, la morphologie, les conditions, comparer les caractéristiques - lister tous les critères « optimaux » nécessaires à l'implantation de la station - décliner chaque critère en plusieurs indicateurs - décider quels critères de nature géologique et environnementale sont prioritaires - connaitre les conditions géologiques nécessaires à un tracé de remontée ou de pistes de descente	Expertise et connaissances heuristiques du domaine	Déterminer des contraintes, car les caractéristiques géologique ont une incidence forte sur la morphologie (versants abrupts ou cimes arrondies)	Chaque critère constituera une carte/couche qui sera combinée avec les autres	Liste globale des critères et des indicateurs Liste précisée des critères retenus
3. Traduire les critères en données - lister les indicateurs et leurs mesures - récapituler les données et celles à acquérir - faire attention aux corrélations entre deux critères		Trouver corrélations entre critères	Possibilité de mesurer chaque sous-critère	Tableau récapitulatif des données nécessaires

1. Règles d'action	2. Invariants opératoires	3. Inférences et stratégies	4.Anticipations	5. Observables
4. Organiser les données - créer sur le disque dur un dossier global - organiser les données en couches	Structuration des SIG co*mme* des BD.	Type d'organisation des données (par thème, format, date..)	Gestion des données de façon claire	Les dossiers sur le disque dur et dans le catalogue du SIG
5. Uniformiser les données - convertir Les données polygones » en raster avec la f Toolbox : Outil de conversion - vérifier la taille, la résolution et le géo référencement des rasters - géo référencer (à la volée, transformation, calage) - examiner visuellement toutes les données	Principales fonctionnalités de préparation et intégration des données	Typologie et compatibilité des formats de la donnée géographique	Pour effectuer la combinaison des couches il faut que les données soient en format raster. La correspondance de taille de cellule et du système de géo référencement garantit la superposition calée des couches.	Les données dans leur format d'origine Les données cartographiées
6. Faire les classes - effectuer pour chaque indicateur de critère le reclassement de ses valeurs avec le f Toolbox Reclassement, Reclassification : 1. table de classification = modifie manuellement les valeurs d'origine en créant des nouvelles plages des valeurs et en leur affectant un ordre d'importance. 2. méthodes de classement = propose 6 méthodes (IE2, AE, SN, IG,ET) ; il faut choisir la plus appropriée à nos valeurs. - affecter des couleurs aux classes	Les 6 méthodes de classement statistiques de la donnée géographique Application des règles sémiotiques des cartes thématiques	Choix de la méthode selon la distribution des valeurs de la donné	La méthode Manuelle permet de créer des plages de valeurs ciblées aux besoins du problème. La méthode SN défini statistiquement les bornes des classes selon la répartition des valeurs.	La donnée classée = couche en n classes (par ex) allant de la moins apte à la plus apte (1 à 4). Cartes uni variées

1. Règles d'action	**2. Invariants opératoires**	**3. Inférences et stratégies**	**4.Anticipations**	**5. Observables**
7. Choisir la méthode de superposition - faire une analyse booléenne avec restriction sur un critère - faire une analyse multicritères avec les f Tolbox Superposition 1. superposition pondérée : on rentre les couches classées avec la même échelle d'évaluation et on ajoute les poids. 2. somme pondérée : on rentre les couches et on attribue des facteurs multiplicatifs d'importance. On n'a pas à se préoccuper d'une échelle d'évaluation Affecter une palette de couleurs aux classes d'aptitude	Les deux techniques (WLC) de superposition L'algèbre des cartes Application des règles sémiotiques des cartes thématiques	Choix de la méthode selon les typologies d'agrégation Choix de la palette en vue de l'objectif de la carte (sélectivité)	Restitution cartographique différentes, selon la méthode choisie (effets seuils) Dimensions des classes selon les pondérations attribuées	La carte de superposition pondérée La carte de somme pondérée
8. Evaluer/comparer la méthode -mobiliser des stratégies d'évaluation sur les cartes à comparer : dimensions des surfaces optimales, corrélation avec le terrain..	Evaluation, contrôle des résultats et anticipations		La comparaison des méthodes permet de contrôler l'impact sur le résultat cartographique.	

Tableau 14 *Description de l'activité de cartographie d'aptitude avec des méthodes ASMC selon le « schème d'activité »*

2.3 Bilan

L'analyse de l'activité selon l'approche des champs conceptuels et du schème de Vergnaud (1990) a permis de mettre en évidence les principaux concepts et les modes opératoires qui caractérisent l'activité de cartographie d'aptitude. Aussi le schème a fourni une vision cohérente et globale de l'agencement de l'activité. Ces résultats contribuent d'une part à concevoir une situation-problème expérimentale et d'autre part à canaliser la recherche sur l'observation des tâches critiques, déjà repérées dans la description du schéma. Par exemple, les tâches qui demandent la mobilisation de concepts liés aux méthodes de classement statistiques et des connaissances des courbes de distribution pour la donnée géographique, impliquent des invariants opératoires qui ne sont pas forcement familiers aux étudiants des premières années. L'identification des tâches les plus complexes, celles qui semblent poser les plus de difficultés d'ordre méthodologique ou conceptuel, a été supportée par une première observation de l'activité des étudiants sur une situation-problème pilote. Le paragraphe suivant présente les modalités et les informations issues de cette analyse exploratoire de l'activité.

3. L'approche exploratoire du terrain : l'observation de l'activité des étudiants

L'objectif principal de cette approche « exploratoire » a été double : premièrement, il s'agissait d'établir si les étudiants avaient des difficultés lors la réalisation d'une cartographie d'aptitude, le cas échéant pendant quelles phases de la procédure ; deuxièmement, il s'agissait de tester la situation-problème pour l'expérimentation à plus grande échelle que nous envisageons. Les deux objectifs ont été atteints avec des démarches différentes : une analyse thématique des données écrites et orales des étudiants pour le premier et une analyse pragmatique des modalités pédagogiques du module pour le second.
Ce paragraphe présente l'analyse des difficultés qui ont émergées de l'observation de l'activité des étudiants ; l'analyse des modalités pédagogiques sera largement présentée plus loin (voir Chapitre V), dans le cadre de la scénarisation du module.

3.1 Le Pilote

L'analyse de l'activité du groupe pilote d'étudiants pilote a pu se faire dans le cadre du module Atelier Tutoré du Master 1 en Sciences de la Terre et de l'Environnement de l'Université Joseph Fourier à Grenoble. Le module a eu lieu au Semestre II de l'année académique 2010-2011, il a eu une durée de 15 heures, distribuées par séances de 3 heures sur 5 semaines. Les étudiants étaient 6, répartis en deux groupes de 3. Le problème posé aux étudiants appartient à la famille de problèmes précédemment identifiée comme récurrente chez les professionnels, à savoir la cartographie d'aptitude pour la prise de décision. En l'occurrence, les étudiants devront mener une étude cartographique de susceptibilité du sol pour l'implémentation d'une station de ski dans le sud Isère. Pour cela, ils ont du effectuer une analyse spatiale multicritères sur des critères géomorphologiques, hydrogéologiques, climatiques et géographiques.

A l'issue du module, trois outils (voir Annexes III) ont permis de recueillir les informations :

1. Un test comprenant 6 exercices sur la symbologie de la donnée, la compatibilité des données, les calculs pour obtenir les données dérivées, la représentation des données dérivées, l'analyse visuelle de la couche résultat. Le test a servi pour évaluer le niveau d'acquisition des notions et techniques SIG sur la base de l'exactitude des réponses.
2. Un questionnaire de 13 questions ouvertes qui a servi à faire ressortir les perceptions des étudiants face aux tâches suivantes :
   - Contrôle et qualité des données
   - Manipulation et génération des données
   - Définition du type d'analyse spatiale effectuée
   - Principes et techniques de Reclassement
   - Principes et méthodes d'affectation des poids
3. Des entretiens avec grille d'interview (10 questions) qui a mis en évidence les perceptions des étudiants face à la procédure générale et à la résolution d'un problème spatiale.

La synthèse de l'analyse thématique conduite sur les réponses écrites et orales, ainsi que des réponses au test montre que les principales difficultés concernent :

- au niveau du concept de Reclassement : la définition du nombre des classes. Les étudiants ne comprennent pas l'intérêt de définir un nombre de classe; ce nombre est purement aléatoire, justifié par le « bon sens » et le besoin d'expliciter simplement et

linguistiquement les niveaux d'aptitude des classes (optimal, envisageable, non approprié..). Leurs choix sont justifiés que par des démarches empiriques.

- au niveau de la technique de Reclassement : le paramétrage de la fonction. Les étudiants trouvent que les manipulations dans les fenêtres de la fonction sont complexes et fastidieuses et, ne comprenant pas les opérations sous-jacentes, ils anticipent incorrectement les résultats.
- au niveau du concept d'attribution des poids : le choix des importances relatives. Les étudiants attribuent des poids (coefficient multiplicatifs) aux critères sur la base du « bon sens » et de ce qu'ils connaissent en terrain, mais ils n'évoquent aucune des méthodes mathématiques spécifiques; les algorithmes des outils de superposition étant inconnus, les étudiants ne savent pas quels calculs sont opérés et ne maitrisent pas l'impact des changements des paramètres sur le résultat cartographique final.
- au niveau de l'expression cartographique des données: la différence entre les représentations en catégories et en quantités (valeurs uniques et classées). Pour les étudiants l'attribution à une couche d'une symbologie pertinente est source de confusion, l'interprétation de la légende n'est pas facile.
- au niveau de la gestion des traitements : la définition des paramètres d'entrée (input data) dans les fenêtres d'outils, ainsi que dans le choix du champ du traitement (value, count..). Face à l'erreur, qu'elle soit signalée lors du paramétrage de l'algorithme ou qu'elle ressorte dans le résultat, les étudiants s'appuient très rarement sur les aides tutoriels du SIG.

3.2 La validation de l'expert

Les observations sur le groupe pilote ont été soutenues et complétées par la validation d'un expert. Un enseignant-chercheur en géographie et spécialiste d'analyse spatiale, a été interrogé sur les difficultés repérées au cours de ses expériences d'enseignement sur la cartographie d'aptitude.

Tout en confirmant les points critiques listés plus haut, l'expert a fourni des pistes précises sur les indicateurs de difficultés : par exemple, observer les blocages sur certaines tâches, le manque d'originalité dans les critères énoncés, le manque d'appui littéraire/documentaire pour baliser les critères, la vision plutôt linéaire et non hiérarchisée du problème, le choix par

défaut de la méthode de classement des données, l'incapacité à interpréter les seuils des classes et par conséquent, l'incapacité à corréler leur analyse avec la réalité du terrain.

3.3 Bilan

L'analyse du groupe pilote a constitué une étape importante de cette recherche. Elle a permis de concrétiser la procédure de résolution via l'exécution des tâches et la production des résultats cartographiques. Cette analyse a été d'autant plus intéressante qu'elle a permis de repérer de nombreuses d'impasses qu'ils soient sur le plan disciplinaire, avec des difficultés de transmission-acquisition des principales notions et techniques d'analyse spatiale, ou sur le plan pédagogique avec des difficultés organisationnelles et d'agencement des contenus. Le focus sur les impasses est à ce stade très constructif car il nous amène à réfléchir aux hypothèses de recherche, à l'environnement (milieu) et aux outils de mesure pour mettre à l'épreuve les hypothèses.

4. Conclusions

Les analyses préliminaires se sont déroulées selon trois approches différentes et complémentaires. A l'issue de ces analyses les spécificités techniques et conceptuelles et de la procédure de cartographie d'aptitude ont été établies. Trois types de résultat ressortent prioritairement : l'identification de la procédure séquentielle, l'identification globale des principaux concepts (invariants opératoires) mobilisées dans la procédure et nécessaires à la résolution du problème de localisation et l'identification des principales difficultés qui impactent cette résolution, qu'elles soient en termes d'invariants opératoires, de règles d'actions ou d'anticipations. La littérature (Chakhar, 2006)) comme les observations de terrain concordent en alertant que, de toute la procédure de résolution, les difficultés semblent se concentrer dans 3 phases :

- Le reclassement des données
- L'attribution des poids aux critères
- L'analyse visuelle des cartes réalisées

Nous nous appuyons sur ces indications pour restreindre l'intérêt de notre recherche à ces trois phases. Les hypothèses et les questions de recherche formulées à l'égard de l'analyse

préliminaire, vont donc s'intéresser entre autre aux concepts mobilisées, de façon appropriée ou pas, pendant ces trois phases.

CHAPITRE IV : LES CADRES THÉORIQUES ET LES QUESTIONS DE RECHERCHE

L'issue des analyses préliminaires épistémologiques nous indique les points critiques de la procédure de réalisation d'une carte d'aptitude ainsi que les principales difficultés des étudiants. En adéquation avec les objectifs de la recherche (cf. Introduction) nous avons formulé l'hypothèse de travail suivante:

Pour fournir des aides didactiques ciblant les difficultés des étudiants et faciliter l'appropriation des méthodes d'analyse multicritère des experts pour l'activité de cartographie d'aptitude, il est nécessaire d'étudier comment ces deux types d'utilisateurs raisonnent pendant l'activité. Nous supposons qu'ils n'utilisent pas les mêmes raisonnements pour résoudre le problème de cartographie d'aptitude. L'identification des différences permet de concevoir des aides adaptées.

Pour positionner cette hypothèse de travail, il faut définir les domaines des mécanismes cognitifs qui sous-tendent les raisonnements spatial et visuel.

L'objectif du chapitre est de fournir un éclairage sur les différentes approches scientifiques qui ont permis de soutenir cette recherche exploratoire, située à l'intersection de plusieurs domaines. Pour sa complexité et sa nature interdisciplinaire, cette recherche aurait peu être conduite sous des angles très différents : le choix d'un positionnement par rapport à la multitude des cadres théoriques appartenant aux domaines de la psychologie cognitive, de la géo-cognition, de la géo-visualisation, des sciences de l'Information Géographiques et des SIG a été l'enjeu le plus délicat de cet étude.

Le fil conducteur de cette recherche a été l'intérêt vers les processus qui caractérisent le raisonnement spatial et la construction de la connaissance dans un contexte de cartographie décisionnelle ; le terme 'raisonnement' est ici entendu comme le processus cognitif permettant d'inférer une conclusion à partir des arguments ou des principes énoncés (Alleydog, 2005) Dans la perspective de lecture et interprétation d'une scène visuelle, représentée, dans notre étude, par la carte d'aptitude, nous abordons dans l'ordre les différentes étapes d'acquisition, du traitement et de l'élaboration de(s) l'information(s). L'acquisition est définie par les cadres théoriques relatifs aux mécanismes du système visuo-

spatial qui nous permettent de mieux comprendre les fonctionnements perceptuel humain, lors de l'observation d'une carte. Le traitement est défini par les cadres théoriques relatifs aux schémas et modèles mentaux : ils nous permettent de saisir les structures mentales qui sont activées et engagées pendant l'observation d'une carte. Les définitions théoriques relatives aux raisonnements (spatial et visuel) nous permettent de comprendre comment le processus d'élaboration de l'information amène à la connaissance.

Enfin, dans la perspective d'une comparaison des mécanismes cognitifs novices et experts, des définitions de l'expertise dans le contexte cartographique sont aussi présentées.

1. Mécanismes du système visuo-spatial

La capacité humaine à interpréter une image, dans notre cas une carte, est liée à la vision et au fonctionnement perceptuel. La vision est le sens propre à la perception visuelle du monde à l'aide de la partie *visible* du rayonnement électromagnétique soit, pour l'œil humain, les longueurs d'onde comprises environ entre 400 et 800 nm. Pour Piaget (1991), la vision est chez l'enfant une mise à jour visuelle permanente de la représentation mentale du monde réel de l'individu.

La vision recouvre l'ensemble des mécanismes physiologiques et psychologiques par lesquels la lumière émise ou réfléchie par l'environnement détermine les détails des représentations sensorielles, comme les formes, les couleurs, les textures, le mouvement, la distance et le relief. Ces mécanismes font intervenir l'œil, organe récepteur de la vue, mais aussi des processus cognitifs complexes mis en œuvre par des zones spécialisées du cerveau (le cortex visuel). L'image fournie par la rétine au cerveau est de très mauvaise qualité. Or ce que nous percevons est parfaitement net. Le flux d'information en provenance de l'extérieur détecté par la rétine de l'œil n'est pas le seul facteur rentrant en compte dans le mécanisme de la vision. Les illusions optiques en sont la preuve la plus élémentaire : elles montrent que la façon dont le système visuel, et en particulier le cortex visuel du cerveau, traite cette information est aussi importante dans la construction de l'image perçue, consciemment ou non. Le cerveau cherche à mettre du sens partout, même là ou il n'y en pas. Alors il en fait trop, amplifiant les contrastes, créant contours, perspectives, reliefs en fonction de ce qu'il connaît (voir Figure 20) (Bear, et Al., 2002).

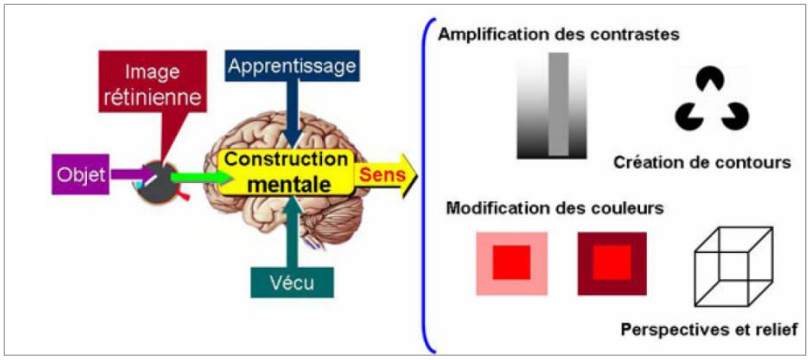


Figure 20 *Perception et réalité. Source : Physiologie Sensorielle : Le système visuel. (J.Valat, 2012)*

La vision n'est ni instantanée ni fluide, mais elle se fait de manière ponctuelle et rapide (de l'ordre du 1/40 de seconde). Le train d'informations visuelles passe depuis la rétine par les nerfs optiques pour être acheminé vers les aires corticales de la vision à l'arrière du cerveau, dont deux voies traitent l'information visuelle. Sur un plan analytique, le système visuel adopte une stratégie de division du travail. Le traitement des caractéristiques comme la couleur, la forme et le mouvement font l'objet d'un traitement par des voies nerveuses distinctes. L'aire V5 (voir Figure21) contribue de façon prépondérante à la perception du mouvement, (« où » se situe ce qui est perçu) tandis que l'aire V4 est impliquée dans la reconnaissance des formes et des couleurs (de « quoi » il s'agit).

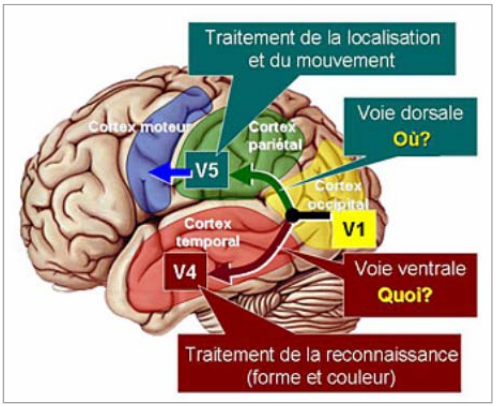


Figure 21 *L'unité de conscience. Source : Physiologie Sensorielle : Le système visuel. (J.Valat, 2012)*

La façon dont le cerveau traite ces informations fait l'objet de nombreuses études en neurosciences cognitives, notamment depuis les travaux des Prix Nobel Hubel et Wiesel (1981).

1.1 La perception visuelle

La perception visuelle se caractérise par deux processus : (1) des traitements dirigés par les données (*bottomup processes*) et (2) des traitements dirigés par les concepts (*top-down processes*) (Figure 2.5). La perception est constamment influencée par ces deux processus et l'un influence immanquablement le comportement de l'autre. (Ware, 2008; MacEachren, 1995).

1.1.1 Early vision

La premier processus « *bottom-up »,* vise à extraire les informations de la scène visuelle. Il se nomme la vision pré-attentive ou « *early-vision* » (Ware, 2000).

Les travaux du psychologue anglais David Marr (1970-1980) posèrent les fondements de la recherche cognitive sur le fonctionnement du système visuel. Marr conçoit le cerveau comme un ordinateur très complexe ; c'est de cette analogie qu'il explique le fonctionnement du système visuel à travers une modélisation computationnelle de la reconnaissance visuelle des objets. Il liste trois étapes fondamentales : une ébauche primaire (*primal sketch*) de traitement, où les informations visuelles élaborées sont celles relatives aux variations locales de l'intensité lumineuse. La couleur n'est pas encore explicite, quatre éléments sont localisés : bords, barres, terminaisons et tâches ; cette étape permet de dire si deux zones appartiennent ou non au même objet. Dans une seconde étape (*l'esquisse 2D ½),* la disparité binoculaire permet de relever les profondeurs locales et les orientations de surface. Cette représentation inclut aussi les textures et les tonalités. Lors de la dernière étape (3D), toutes les informations visuelles sont combinées et une perception de la troisième dimension peut émerger. La représentation est précise : les objets sont parfaitement situés, selon leur volume, leur distance et leur forme, indépendamment de la position de l'observateur. La théorie de Marr, propose donc une représentation qui est centrée sur l'objet : elle est enrichie par d'autres nombreuses recherches.

Selon la théorie de l'intégration Feature Integration Theory, FIT) des traits (Treisman, 1988), la vision précoce consisterait à extraire de l'image des traits, alors représentés sur des plans distincts (*feature maps*), en concordance avec la spécialisation des aires corticales impliquées

en vision. C'est pourquoi la recherche visuelle d'une cible à partir du critère d'un trait unique sur lequel repose sa différence avec des distracteurs (par exemple, la cible Q parmi des O) est facilement réalisée, grâce à un phénomène de 'pop-out': la cible est perçue immédiatement, sans effort et automatiquement, avec une même facilité quelle que soit la quantité de distracteurs. La détection immédiate de la cible est alors réalisée de manière pré-attentionnelle, grâce à un mécanisme de traitement en parallèle. Simultanément, les formes et les orientations, les contrastes rouge-vert et jaune-bleu, les mouvements et la profondeur sont extraits. Ce qui sera détecté dépend du contexte (Ware, 2000). Ceci est important puisque la couleur rouge ne garantit pas d'attirer l'œil si elle se situe dans un contexte similaire (ex. rose ou orange). De même, dans une scène visuelle, une rupture au niveau d'une dimension unique telle que la couleur ou la luminance permettrait de délimiter automatiquement une forme (par exemple, une vache brune sur le fond vert du pré). Les contrastes, les mouvements et la profondeur sont le résultat des différences avec leur voisin dans la scène visuelle. Ensuite, dans une étape intermédiaire, les caractéristiques extraites sont utilisées pour organiser l'image de façon a reconnaitre les contours, les formes, les structures qui s'y trouvent. Les objets se forment et sont ensuite maintenus dans la mémoire visuelle active. Les objets formés interpellent les concepts autrefois enregistres dans la mémoire à long terme qui leur sont pertinents. Le traitement parallèle des données permet d'extraire une grande quantité d'information simultanément et les relations pertinentes sont maintenues pour un court laps de temps en mémoire active pour permettre les associations. Des structures qui peuvent être perçues en un seul instant avec une image peuvent prendre des heures ou même ne jamais être trouvées avec un texte ou des chiffres. Ensuite, l'imagination et la créativité sont éveillées par le traitement de l'image. Ces caractéristiques propres à l'humain sont sollicitées et l'émergence d'associations nouvelles et inédites est davantage possible. C'est d'ailleurs dans des situations où l'on est forcé de penser non traditionnellement que les découvertes les plus créatives ont eu lieu (Finke et *al,* 1992 in Kraak, 2003). Cependant, très peu d'éléments peuvent être maintenus en mémoire visuelle active simultanément, soit un maximum de trois objets à la fois (Ware, 2008). Par contre, si la distinction de la cible nécessite la prise en compte d'une conjonction de traits relevant de dimensions différentes (*i.e.*., détecter une barre horizontale verte parmi des barres horizontales rouges et des barres verticales vertes), sa détection devient plus difficile et prend d'autant plus de temps que le nombre de distracteurs augmente. Selon la théorie de l'intégration des traits, il s'impose alors de prendre en compte des relations entre traits pour les intégrer (*binding*), ce qui impliquerait des opérations

coûteuses en temps et en énergie, réalisées en un second temps et impliquant des ressources attentionnelles (Treisman, 1988).

1.1.2 L'attention sélective

Le second processus de la perception est le traitement attentionnel ou dirigé par les concepts (*top-down)*.

Celui-ci trouve son origine dans l'attention sélective. L'attention cherche a tirer de la scène les informations utiles a un certain but. Il influence la perception en liant et reliant les informations visuelles de façon à tirer une information. Il influence aussi la vision pré-attentive en introduisant un biais sur une caractéristique particulière recherchée (Beaulieu, 2009).

L'attention spatiale serait donc nécessaire pour assembler les divers éléments de base de l'objet (Treisman & Gelade, 1980). Comme le champ visuel ne serait pas représenté sous forme d'objets dans le traitement pré-attentionnel, mais comme une collection de traits, l'attention ne serait pas dirigée par des objets (*object-based attention*), mais sélectionnerait plutôt des régions de l'espace (*space-based attention*) pour permettre seulement ensuite la construction mentale des objets. La théorie d'intégration des traits (Treisman (1988), a évolué vers le modèle de la recherche guidée (*guided search theory*, Cave & Wolfe, 1990), où la stricte distinction entre recherches en parallèle ou en séquentielle est abandonnée : pour rechercher une cible définie par une conjonction de traits, des processus visuels de bas niveau extrairaient les traits élémentaires en parallèle pour différentes dimensions, puis un mécanisme de guidance qualifié de 'pré-attentionnel' utiliserait cette information pour diriger l'attention sur les items possédant l'un et/ou l'autre trait pour décider s'il s'agit ou non de la cible.

Les modèles théoriques sur l'attention visuelle sélective ont caractérisé la recherche cognitive dans les années '80. Mais déjà un début du XX siècle la théorie de la Gestalt (1955) affirmait que « la reconnaissance de la forme en un tout perceptif organisé nécessite de distinguer la figure du fond et de grouper en une organisation perceptive, globale les différents éléments constituant l'objet » (Nicolas et Al., 2007). Cette théorie est caractérisée par 5 principes :

1. loi de bonne forme : un ensemble tend à être perçu comme une forme simple, symétrique et stable
2. loi de continuité : on continue un item même s'il s'arrête
3. loi de similarité : les éléments similaires sont regroupés ensemble
4. loi de proximité : on regroupe les éléments les plus proches
5. loi de destin commun : les éléments ayant la même trajectoire sont perçus comme faisant partie de la même forme

En s'appuyant sur ces théories, de nombreux travaux relevant de la psychologie, des sciences cognitives, de la neurophysiologie ont contribué considérablement à la compréhension de comment une carte est vue et comprise.

Steven Pinker (1990) a étendu la théorie de Marr sur la compréhension des graphiques. Le modèle de Pinker pose des questionnements fondamentaux pour la compréhension de la carte. Il conçoit une étape préliminaire, la « visual array », qui est une « image brute » de la réalité que la rétine transmet au cerveau, suivie par une « visual description » qui constitue alors l'output du mécanisme de la perception visuelle. Dans cette représentation, les différents aspects de la représentation tels que les différents éléments, leur taille, leur forme, leur couleur, leur localisation etc., sont séparés en différents symboles. Elle est une description structurée du graphique ou les « prédicats » spécifient les propriétés et les relations. Pour Pinker, les informations sont conservées dans la Mémoire à Long Terme sous forme de « schémas». Un « schéma » constitue un savoir dans un domaine donné et consiste en une description contenant des « blancs » (informations manquantes laissées en suspend) ou des paramètres inconnus qui sont complétés par des valeurs réelles lors d'une situation concrète.

A la fin des années 90, à l'aide d'une méthode d'eye-tracking, des recherches ont réussi à montrer le caractère cyclique du processus de compréhension graphique. Les études sur la fixation oculaire, grâce aux progrès techniques, ont pu voir le jour. L'eye-tracking permet de déterminer les mouvements des yeux et notamment les fixations (pauses pendant lesquelles l'œil encode une information, représentées par les cercles) et les saccades (rapides mouvements entre les fixations, représentées par les lignes). En étudiant les mouvements oculaires lors de l'exploration de scènes visuelles, on a révélé certaines propriétés des mouvements oculaires et les facteurs les influençant. Les sujets ont une tendance à regarder plus au centre qu'à la périphérie d'une image quelque soit la tache. Plusieurs études ont confirmé deux modes d'exploration : "ambiant" et "focal". Le mode "ambiant" correspond à

une exploration rapide dans un champ visuel large ; en revanche, le mode “focal” correspond à une exploration dans une petite zone en détail. Les expériences psychophysiques permettent de diviser en deux groupes les facteurs influençant les mouvements oculaires. Le premier groupe concerne des facteurs de bas niveau dans une scène comme la luminance, la couleur, l’orientation et le contraste. Ces facteurs arrivent tôt dans le traitement du système visuel. A titre d’exemple, une barre verticale parmi des barres horizontales attire l’attention et les yeux de même qu’un objet rouge sur un fond vert. Quand on étudie les caractéristiques de bas niveau sur les régions qui correspondent à des fixations, on observe qu’elles sont différentes de celles sur des régions choisies aléatoirement dans l’image. Cela supporte l’idée que les facteurs de bas niveau, associés aux stimuli visuels, peuvent contribuer à l’explication des mouvements oculaires. Le deuxième groupe comporte les facteurs de haut niveau comme la sémantique, la mémoire ou la tâche. Contrairement au premier groupe, ces facteurs arrivent plus tard dans le traitement du système visuel. Ce sont des facteurs dépendants des processus cognitifs, de la mémoire, de l’état émotionnel ou encore de la tâche, etc. Ces facteurs sont donc sujet-dépendants. Alors que plusieurs études ont montré le rôle important des facteurs de haut niveau dans les mouvements oculaires, ces facteurs sont difficiles à quantifier et à contrôler. Yarbus (1967, in Tien, 2010), remarque une forte relation entre les fixations et la tâche : il a montré qu’en fonction de la tâche, plus particulièrement de la question posée au sujet, les mouvements oculaires réalisés sont différents (Tien, 2010).

1.2 Mécanismes visu-cognitifs et cartographie

La vaste littérature dédiée aux mécanismes de perception visuelle, fournit un socle solide aux principes de conception cartographique. La compréhension de ces systèmes a permis de déterminer qu’en termes cartographiques, le contraste entre les composants de la carte, doit être l’élément déclencheur du niveau initial de la vision (MacEachren, 1995). L’extraction des composants de la carte sera d’autant plus facile, si le cartographe aura créé des contrastes qui seront immédiatement perçus par les lecteurs. D’un point de vue cartographique, l’objectif de la recherche sur les processus viso-cognitifs, est de comprendre comment les étapes des processus physio-conceptuels de représentations internes des cartes interagissent avec les représentions externes (variables sémiotiques). Au bas niveau du processus, un premier élément-clé de cette interaction est donnée par l’importance que l’on peut donner au contraste : une caractéristique déterminante du système visuel est sa capacité à amplifier le

contraste par rapport à l'illumination absolue et à amplifier l'acuité pour le ton d'un couleur (des centaines de différences sont discriminables) par rapport à la valeur d'une couleur (i.e. . dans un camaïeu, quelques dizaines de différences sont discriminables). Pour cette raison, la valeur et la saturation d'une couleur peuvent être ordonnées, tandis que le ton ne peut pas l'être. Un deuxième élément-clé est la capacité du système visuel-neurologique à grouper des éléments extraits de la scène visuelle en « objets », que les processus de plus haut niveau mettent en relation les représentations stockées dans la mémoire (MacEachren 1995). En cartographie, la vision est traitée comme un système complexe de traitement de l'information, qui génère une succession de représentations (MacEachren, 1995). La connaissance des systèmes d'organisation, de catégorisation et de jugement perceptuels sont à mettre en relation avec les principes de représentations cartographiques, notamment les variables visuelles fondamentales et fonctionnelles établies par Bertin (1960-1970).
Dans le cadre de cette thèse, les aspects de la représentation sémiotique sont abordés dans le chapitre consacré à l'analyse de l'activité de cartographie d'aptitude et ils constituent une approche pragmatique des cadres théoriques; l'intérêt est ici pour les mécanismes cognitifs qui, à partir de la perception visuelle, permettent de construire la connaissance.

2. Les schémas mentaux

Les schémas mentaux (ou cognitifs) sont des représentations mentales abstraites qui résument et organisent de façon structurée des événements, des objets, des situations ou des expériences semblables. Les schémas, stockés en mémoire à long terme (MLT), permettent d'analyser, de sélectionner, de structurer et d'interpréter des informations nouvelles. Ils servent donc en quelque sorte de modèle, de cadre pour traiter l'information et diriger les comportements. La perspective retenue est que le traitement de l'information issue de la scène visuelle en vue d'être transféré à la connaissance existante (mémoire à long terme), se fait selon trois types de schémas mentaux: déclaratif, analogique/image et procédural[11]. L'homme peut utiliser ces schémas mentaux grâce à sa capacité innée à catégoriser (MacEachren, 1995). Un important schéma est celui « d'objet », entrant dans des catégories, dotées de propriétés (Rosch et Al., 1976). Ce schéma très répandu s'applique aux plantes, aux animaux et aux humains ; le

[11] Vergnaud (1990) parle de prédicatif à la place du déclaratif, d'opératoire à la place de procédural et de représentation pour analogique/image.

langage –schéma déclaratif - le désigne généralement par des noms communs (« crayon », « maison », « oiseau », etc.).

Smith et Mark (1998) ont fourni une catégorisation des objets géographiques. Les catégories d'objets contiennent souvent des sous-catégories, avec des hiérarchies. Celles-ci sont des emboitements successifs de sous-catégories, contrastées et coordonnées, de la plus générale jusqu'à la plus spécifique. A côté du schéma d'objet et de catégories d'objet, il en existe un autre particulièrement important : c'est celui d' « événement » et d' « action ». 'Tomber' désigne une représentation qui entre dans les schémas d'événement et 'construire' dans celui des actions. D'autres schémas sont plus complexes. Les « scripts » constituent un type de schéma qui inclut une dimension temporelle : ils 'appliquent à des séquences d'événements successifs, liés par des 'en ensuite' (Natchine et Tiberghein, 2007). Lakoff (1987), avec son modèle cognitif idéalisé (ICMs) propose trois types de schémas : les concepts de niveau de base (les choses, les activités de notre expérience immédiate), les schémas imagés kinésiques et les concepts métaphoriques. Les schémas imagés jouent un rôle particulièrement important dans les mécanismes cognitifs de lecture d'une carte : il s'agit de structures relativement simples qui se reproduisent constamment dans notre expérience corporelle de tous les jours : par exemple les concepts de 'verticalité' et de 'contenant' (Collard, 2009). Ces schémas supportent la création des relations spatiales entre les objets. Lakoff (1987) détaille plusieurs types de schémas relevant de l'image : le 'partie-tout', le 'lien', le 'centre-périphérie', le 'source-chemin-but' et 'l'ordre linéaire'.

2.1 Les schémas en cartographie

MacEachren, (1995, p.460), dans son approche cognitif-sémiotique de la représentation cartographique) et en s'appuyant fortement sur la théorie de Lakoff[12], propose une adaptation du schéma imagé au raisonnement cartographique. Il présente un schéma cartographique qui dérive essentiellement des structures pré-conceptuelles de bas niveau et des schémas imagés kinésiques. Les bases physiologiques de ce schéma sont à retrouver dans les caractéristiques physiques de la vision : l'œil perçoit les longues ondes du rouge comme avançant vers l'observateur, tandis qu'il perçoit les courtes ondes de bleu comme reculant. Un schéma imagé « rouge= proche » et « bleu= loin » est alors créé. Dans le cas par exemple d'une carte

[12] Model cognitif idéalisé, 1987

d'élévation, 3 types de schémas imagés physiologiques peuvent être appliqués : une gamme de couleurs peut activer un schéma d'ordre linéaire ; une palette de couleur du rouge au bleue, peut activer un schéma « avant-arrière »; une gamme de valeurs peut activer à la fois un schéma d'ordre linéaire, que un schéma « plus=haut » (couleur plus foncés là où les valeurs d'élévation sont les plus hauts). MacEachren (1995,) défini deux niveaux de schéma cartographique : un général et un spécifique. Le schéma général comporte des principes qui, sont partagés par tous les adultes, indépendamment des cultures et des sociétés : la position sur une carte est liée à une position dans l'espace à travers un système de coordonnées ; l'espace de la carte représente un espace géographique avec une échelle de dimensionnement ; l'espace est décrit dans la carte comme dans le monde réel, avec les mêmes proportions et les mêmes contacts ; les objets du monde réel sont représentés par des points, des lignes et des surfaces. Le schéma spécifique permet d'identifier un objet d'intérêt et de modifier, élargir et compléter un schéma général. Il s'agit d'un schéma que peu d'adultes ont, excepté lorsqu'il s'agit de spécialistes ou d'experts d'un domaine. L'auteur souligne que ce schéma n'est pas inné, mais appris. Par conséquent, d'un point de vue strictement cartographique, MacEachren, affirme que « pour qu'une carte devienne compréhensible, il vaut mieux entrainer les potentiels lecteurs à développer les schémas cognitifs appropriés, plutôt que s'efforcer d'améliorer les cartes ». Chang et Al. (1985) ont examiné les différences de stratégies entre experts et novices dans l'interprétation de cartes topographiques : ils suggèrent que pour que les novices puissent identifier les formes et les patterns, il est nécessaire de les faire travailler au préalable sur des illustrations ou des images des formes géomorphologiques.

Le schéma mental (de n'importe quel type) fait partie d'un processus itératif de vision, d'organisation, d'interprétation et interrogation d'une scène (virtuelle ou réelle). Le nombre d'itérations requises pour extraire une information particulière d'une scène visuelle sera fonction à la fois de la représentation visuelle et de la complétude et de la pertinence du raisonnement visuel (MacEachren, 1995). L'auteur propose une synthèse des différents modèles (Margolis, Pinker et Ganther in MacEachren ,1995) dans le 'feature ID model' (voir Figure 22) dans lequel les étapes, itératives, du traitement de l'information visuelle sont identifiées. Les schémas mentaux ont ici une fonction de médiation : ils interrogent la description visuelle, dérivent du significat. Le significat peut résulter de la modification d'une connaissance existante ou de la création d'un nouveau schéma.

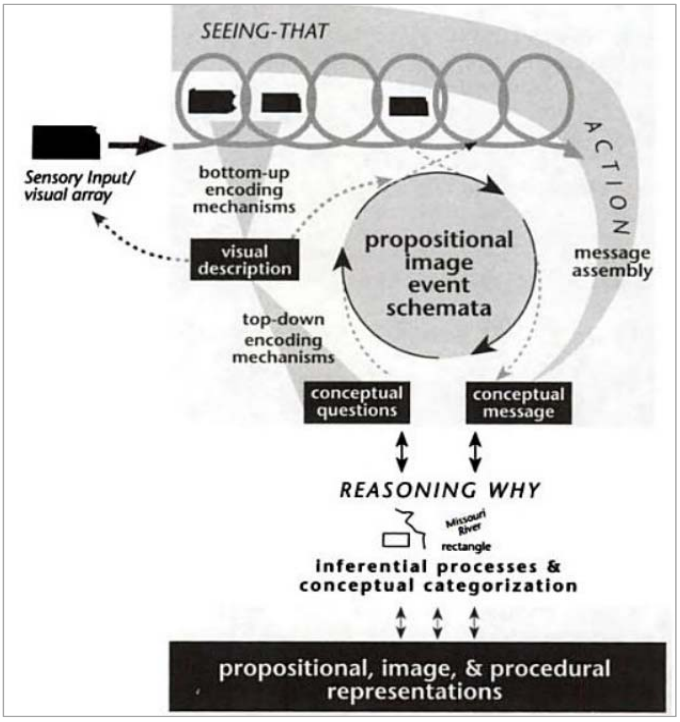


Figure 22 *Feature ID Model de MacEachren, 1995.*

Les humains prennent des décisions en cherchant des correspondances entre une situation présente et une collection de patterns représentant l'expérience passée et la connaissance. Les schémas mentaux complexes qui contiennent des schémas d'objet, d'images et de scripts, régissent le matching des patterns. Les schémas utilisés déterminent les paramètres pour juger d'un choix ou prendre une décision (MacEachren, 1995).

3. Les modèles mentaux

Les humains perçoivent, prennent des décisions et construisent des comportements dans des environnements variés selon les modèles mentaux qu'ils ont construits. Le concept de modèle mental a été introduit par Philip Johnson-Laird in *Mental models* (1983) et développé surtout dans le domaine de raisonnement spatial et formel (Johnson-Laird et Byrne, 1990). Les modèles mentaux peuvent être construits par la perception, mais aussi par l'imagination, leur fonction étant de rendre explicites les objets, leurs propositions et leurs relations de manière à ce qu'ils soient disponibles pour faire des inférences, pour prendre des décisions ou pour résoudre un problème. Dans la théorie des modèles mentaux développée par Johnson-Laird

(1983), le sujet construit, à partir des données, une représentation analogique d'une situation qui serait stockée temporairement dans la mémoire de travail, contrairement aux schémas qui seraient stockés dans la mémoire à long terme. (cf Figure 15). Les modèles mentaux mettent en évidence la phase de construction de la connaissance : ils sont une activation partielle de connaissances, une sélection que le système accomplie entre ce qui est relevant et ce qu'il ne l'est pas.

3.1 Les modèles mentaux selon une perspective didactique

Afin de préciser une typologie des modèles mentaux adaptables au domaine des Sciences de l'Information Géographique, nous nous appuyons sur les définitions issues de la didactique des sciences expérimentales, avec les travaux de Larkin (1983) et diSessa (1983). Si on considère les modèles cognitifs dans un contexte d'apprentissage des sciences, plusieurs disciplines apportent et combinent leurs contributions : les sciences cognitives, les sciences de l'éducation, la psychologie, la philosophie (Libarkin, et Al., 2003). Une synthèse des perspectives théoriques est proposée par Libarkin (2003), qui identifie quatre types de modèles :

- *Naifs :* il s'agit de modèles inconscients ou intuitifs utilisés pour interpréter une situation. Dans cette catégorie, deux domaines théoriques fusionnent : les représentations naïves d'un problème de Larkin, (1983), qui supportent l'idée que les apprenants naïfs utilisent des approches intuitives pour résoudre les problèmes, alors que les experts utilisent des modèles construits sur des structures plus détaillées avec des composants non-intuitifs, comme les lois (Larkin, 1983) ; les abstractions inconscients de diSessa (1983), aussi dites, les p-prims (phenomenological primitives), qui sont les blocs basiques du modèle, construits spontanément en réponse à une situation nouvelle (diSessa, 1983).
- *Instables :* il s'agit de modèles inexacts, incomplets ou incohérents que les apprenants modifient et adaptent aux nouvelles informations. Ces modèles sont facilement modifiables et sont systématiquement altérés par les expériences rencontrées et assimilées.
- *Stable :* il s'agit de représentations du monde suffisamment bien établies et organisées, que les apprenants (plus expérimentés) utilisent pour placer une nouvelle connaissance

dans ses limites. Contrairement aux modèles instables, ces modèles se modifient et évoluent seulement quand un conflit de connaissance est rencontré.

- *Conceptuels :* à la différence des trois premiers modèles, qui relèvent de modèles internes, individuels, les modèles conceptuels sont des représentations externes : elles sont développées et utilisées par la communauté scientifique pour expliquer un phénomène. Il s'agit donc de représentations précises, détaillées impliquant des formules mathématiques, des analogies et des modèles physiques. Ces modèles sont hautement stables et l'acceptation de nouveautés ou modifications peut demander à la communauté scientifique beaucoup de temps (un exemple classique est l'acceptation de la théorie de la Tectonique des Plaques, qui a pris énormément de temps).

diSessa (1983) argumente que la connaissance est fragmentée et que l'apprentissage est la réorganisation de cette connaissance dans un ordre plus cohérent. Pour l'auteur, l'acquisition de l'expertise se produit quand les p-prims sont réorganisés dans l'ordre le plus logique. Un autre point de vue est celui de Chi et Slotta (1993) qui argumentent que l'expertise scientifique est le fruit de la construction de modèle mental, pas seulement de la réorganisation de fragments de connaissance. Pour ces auteurs, les modèles mentaux sont basés sur les principes de l'ontologie qui permettent de catégoriser une information selon les caractéristiques du phénomène interprété (Libarkin, 2003). L'ontologie se réfère à la catégorisation d'objets ou phénomènes par rapport à leurs propriétés. Chi et Al. (1994), dans leur ontologie « Matter and Process », indiquent que « Matter » sont les objets, comme par exemple en géosciences les fossiles et les époques, et « Process » sont les phénomènes, tels que le transport sédimentaires. Les auteurs suggèrent qu'une des principales difficultés dans l'apprentissage de concepts scientifiques surgit quand un apprenant attribue un concept à une catégorie incorrecte.

Enfin, une autre dimension influence l'identification de processus mentaux : chaque personne crée ses modèles selon ce qu'elle/il a vécu, observé, acquis, par l'enseignement, la culture et les expériences de la vie (Libarkin, 2003). La typologie de Libarkin ouvre la discussion à la définition de l'expertise, qui est, selon une approche cognitiviste, l'organisation la plus performante d'une connaissance spécifique.

3.2 L'expertise : une synthèse de schémas et modèles

Les Sciences Cognitives ont une riche tradition de recherche sur l'expertise dans différents domaines. La capacité d'abstraction, de stockage et de rappel d'un large ensemble d'information, les stratégies de résolution de problèmes et la souplesse conceptuelle à l'intérieur d'un domaine de connaissance, illustrent ce que signifie être un expert (Petcovic et Libarkin, 2007).

MacEachren (1995) propose un modèle de structure mentale (*map schemata*) mobilisée lors de l'interprétation cartographique pour représenter et organiser les concepts cartographiques ; ce modèle permet de relier les processus cognitifs issus de l'information cartographique, les rôles de la connaissance, de l'expérience, de la pratique et de l'apprentissage des lecteurs de la carte. Les experts et les novices activent des structures mentales très différentes : l'utilisation de la structure appropriée à une situation donnée, demande de l'apprentissage et de la pratique.

Au fil du temps, comme explique Gobert (2005), les experts développent des compétences spécifiques au domaine, aptes à interpréter l'information visuelle : ces compétences, organisées en *schémas*, supportent des structures perceptives et cognitives pour diriger et contrôler le flux d'informations que l'expert traite dans la poursuite d'objectifs spécifiques. Grâce à la mobilisation de tels schémas, le traitement de l'information est facilité par l'identification précoce de patterns (ou configurations) communs et récurrents dans le domaine de connaissance. Chacun de ces patterns peut alors être traité comme une seule unité, bien qu'elle représente un ensemble de composants individuels (Kent et Chang, 2008). La Chunking theory (Chase et Simon, 1973) et son successeur, la Template theory, fournissent des résultats crédibles sur comment la mobilisation de schémas, contenant des patterns familiers, facilite le traitement de l'information chez des utilisateurs experts de cartes.

Dans une tâche de lecture d'une carte qui représente un paysage connu, un expert activera une structure mentale qui permet non seulement de « coder » tous les objets visuels dans différents patterns, mais aussi d'intégrer toutes les relations qui existent entre les objets. (Kent et Chang, 2008). Plus précisément, un expert est en condition de : (1) repérer les anomalies ; (2) identifier rapidement les procédés fondamentaux ; (3) vérifier la correspondance entre l'information géométrique ou symbolique fournie par la carte et les caractéristiques géographiques du terrain représenté (Chang et Al, 1985). Gilhooly et Al. (1988) ont prouvé que les étudiants expérimentés utilisent des 'schémas spécialistes' (par ex. l'emboitement

d'éperons rocheux ou autres descripteurs géologiques de haut niveau) pour donner du sens à des cartes topographiques, alors que les étudiants novices, utilisent des 'schémas de fond', des descripteurs simples comme collines, rivières et vallées (Clark et Al. 2007).

Les recherches de Rieber (1995) indiquent que le bagage de connaissance individuelle interagit avec les stimuli visuels pour créer des représentations mentales. D'après Lowe (1993), il y a fondamentalement deux types de connaissances : une connaissance générale du domaine et une connaissance spécifique. La première est acquise par la plupart des gens et est applicable à un large panel de situations visuelles ; la deuxième s'appuie sur l'expérience individuelle dans la matière du domaine et permet à la personne d'accéder à la signification scientifique approfondie figurant sur les cartes, diagrammes et autres éléments visuels. Dans le cas d'interprétation des cartes météorologiques en isolignes, Lowe (1993) fait la différence entre des stratégies de classification perceptuelles et sémantiques. Les stratégies de classification perceptuelles sont utilisées par des personnes qui ont un bagage de connaissances générales, afin de décrire les caractéristiques d'une carte avec une terminologie générique, comme les formes ou la position. Au contraire, les personnes avec un bagage de connaissances spécifiques, s'engagent dans des processus de classification sémantique pour développer des modèles fonctionnels et associatifs entre les caractéristiques présentées sur la carte et leur signification sous-jacente (Clark et Al., 2007). Gilhooly et Al. (1988) ont démontré que les lecteurs de cartes expérimentés utilisent leurs connaissances spécifiques du domaine pour coder et stocker les informations. Plus les sujets sont expérimentés plus ils sont en condition d'extraire, d'un stimulus, de larges ensembles d'informations (Clark et Al., 2007). Le lecteur de carte expérimenté exprimera les entités complexes et leurs relations avec un vocabulaire étendu et des labels (Edwards, in MacEachren, 1995). L'action de labéliser implique la capacité de décrire une catégorie et de la caractériser. Crampton (in MacEachren, 1995) confirme les recherches d'Edwards, en prouvant que des experts (comparés à des novices), soumis à un problème de meilleur chemin, ont l'habilité « d'extraire le terrain de la carte » et expriment un large panel de caractéristiques morphologiques. Aussi, ces experts, étaient adeptes d'une méthode, dites d''attacking' qui correspond à l'identification facile d'un lieu connu le plus proche de l'objectif final du problème posé. Aucun des novices n'a utilisé cette stratégie d''accrocahge' à des lieux connus. Enfin, une autre stratégie-expert, essentielle au processus de résolution de problème a été mise en évidence par Crampton (1992) : l'expert mobilise une auto-analyse de prévention d'erreurs, active et itérative, pour cibler la solution. L'expert aborde la résolution d'un problème spatial par la définition de sous-objectifs, pour

lesquels il considère les possibles solutions qu'il teste itérativement pour évaluer la plus pertinente (McGuiness in MacEachren, 1995).

Un exemple pratique d'analyse d'expertise a été présenté par Petcovic et Libarkin (2007) dans une recherche en Didactique des Sciences : The Expert-Novice Continuum. Les auteurs ont analysé l'expertise en géosciences et proposé des instructions didactiques qui aident les novices à se rapprocher de l'expertise. Pour les auteurs, l'expertise géologique est essentiellement caractérisée par :

- Des modèles conceptuels des processus complexes de la Terre : les géologues doivent être capables de comprendre les modèles complexes et abstraits qui décrivent comment la Terre fonctionne et change dans l'espace et dans le temps ;
- Des connaissances spécifiques du domaine, organisées au tour de grands concepts de la géologie : le paléontologue et le sismologue, partagent les mêmes connaissances fondamentales en minéraux, roches et systèmes de transfert, mais pas le même savoir sur la propagation des ondes sismiques ;
- La facilité de raisonnement spatial : toutes les habilités spatiales fondamentales (reconnaitre patterns et formes, comprendre les références horizontal et verticales, tourner mentalement les objets, manipuler mentalement une surface ou un volume, déterminer les relations spatiales d'un objet) ont un impact en géosciences ;
- L'habilité de visualiser et représenter des ensembles de données dans des modèles mentaux, physiques ou computationnels : les géo scientifiques experts souvent s'appuient sur leur capacité à d'analyse visuelle pour résoudre des problèmes ou des tâches complexes (Abel et Al., 2004). Les compétences d'analyse visuelle et les habilités spatiales sont souvent liées : des lecteurs expérimentés de cartes topographiques passent facilement de la représentation cartographiques au terrain, qu'il soit réel ou en image ;
- La facilité à maitriser des concepts à l'échelle spatiale et temporelle : les géo scientifiques traitent des problèmes à l'échelle atomique ou du système planétaire, des processus qui se réalisent en millièmes de secondes et d'autres qui durent des millions d'années.

L'expertise est le produit des interrelations qui se créent au niveau des connaissances et des compétences. Petcovic et Libarkin (2007) proposent un schéma qui illustre ces relations (voir Figure 23).

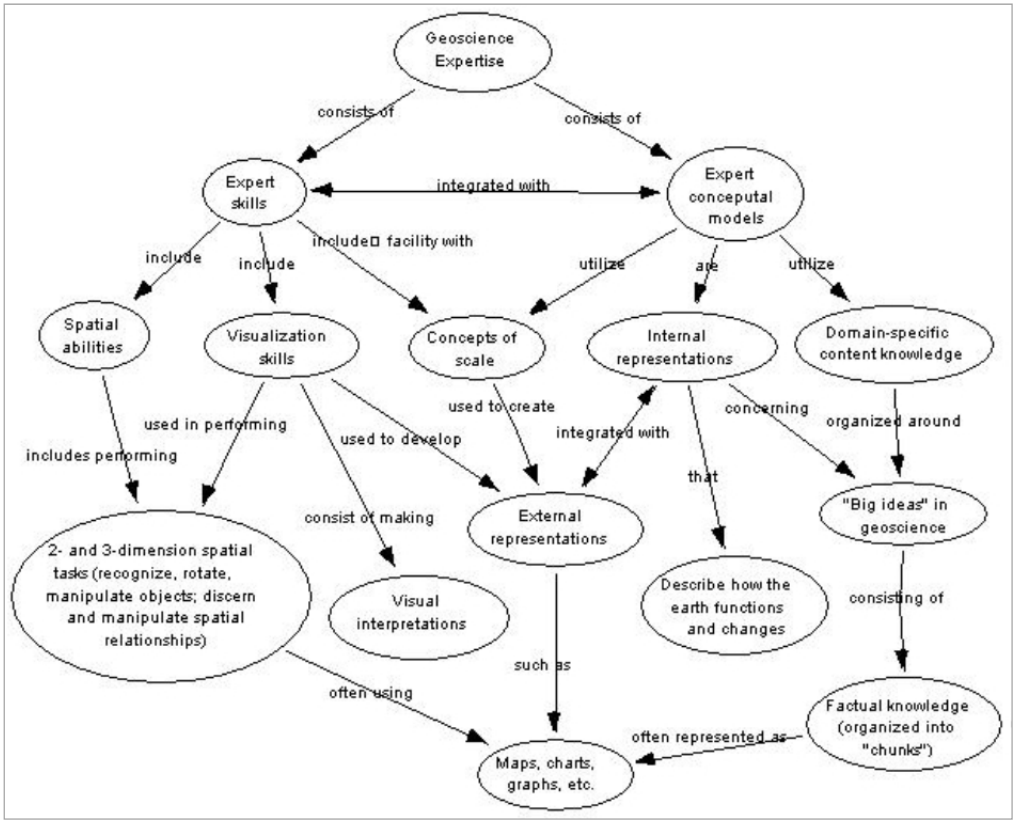


Figure 23 *Petcovic et Libarkin, The Expert-Novice Continuum. Journal of Science Education, (2007)*

Dans une perspective d'apprentissage, Larkin et Al. (1980) ont observé que les démarches des experts comportent, en règle générale, une analyse préliminaire qualitative du problème, l'usage d'une heuristique, la métacognition (l'évaluation en continu de la progression) et l'évaluation du résultat final. Les novices utilisent rarement ces stratégies et tendent plutôt à chercher directement les équations qui peuvent répondre au problème.

4. Le raisonnement

« C'est la manipulation d'un modèle mental, ou la construction de plusieurs modèles alternatifs qui permet d'arriver à une conclusion au cours d'un certain nombre de tâches de raisonnement » (Johnson-Laird, Byrne, 1991). Les modèles mentaux sont utilisés pour

simuler une situation et c'est cette simulation qui sert de base au raisonnement (Cavazza, 1993).

Le mot raisonnement désigne à la fois une action et le produit ou le résultat d'une action. C'est la raison pour laquelle on ne peut pas lui attribuer une définition unique. Néanmoins, on peut partir de la définition d'Aristote (350 AC) (proposée pour le syllogisme, c'est-à-dire à un raisonnement déductif). « *Un discours tel que, certaines choses étant posées, quelque autre chose en résulte nécessairement par cela seul que les premières sont posées* ». On distingue essentiellement deux types de raisonnement : le déductif qui applique une qualité à un cas précis en partant de généralités et l'inductif, qui, à partir d'un cas particulier, applique une qualité à un ensemble.

Les domaines de la Géographie, des Sciences de l'Information Géographique et de la Cartographie, ont manipulé, depuis toujours, un type de raisonnement propre à la dimension spatiale, qui a été défini surtout par la littérature anglo-saxonne, sous le terme *spatial thinking* : il a été largement adopté suite aux directives données par le National Research Council (NRC, 2006) dans la publication de référence *Learning to think spatially - GIS as a Support System in the K-12 Curriculum.*

Le NRC définit la *pensée spatiale* comme étant constituée de trois éléments :

1) *les concepts d'espace ou spatiaux*, par exemples, les relations entre les unités de mesure, les différents moyens de calculer une distance, les bases des systèmes de coordonnées, la nature des espaces (2 dimensions vs 3D) ;
2) *les représentations spatiales,* par exemples, les relations entre différentes views, les effets des projections ou les principes de la conception graphique (les règles de lisibilité, le contraste visuel);
3) *les processus de raisonnements*, par exemples, trouver la distance la plus courte, l'habilité à extrapoler et interpoler (estimer le pente d'une colline à partir d'isolignes) et à prendre des décisions.

La pensée spatiale dépend de la capacité de l'homme à comprendre l'espace et à utiliser ses propriétés comme vecteur pour structurer les problèmes, trouver des réponses et exprimer des solutions (NRC, 2006).

4.1 Concepts spatiaux : définitions

L'espace fournit les cadres conceptuels et analytiques dans lesquels les données peuvent être intégrées, corrélées et structurées dans un ensemble (NRC, 2006). Golledge et ses collaborateurs (1995, 2002) ont classé les concepts spatiaux en simples (primitives : identité, localisation, magnitude et temps) et complexe (dérivés). La Figure 24 présente l'arborescence des primitives.

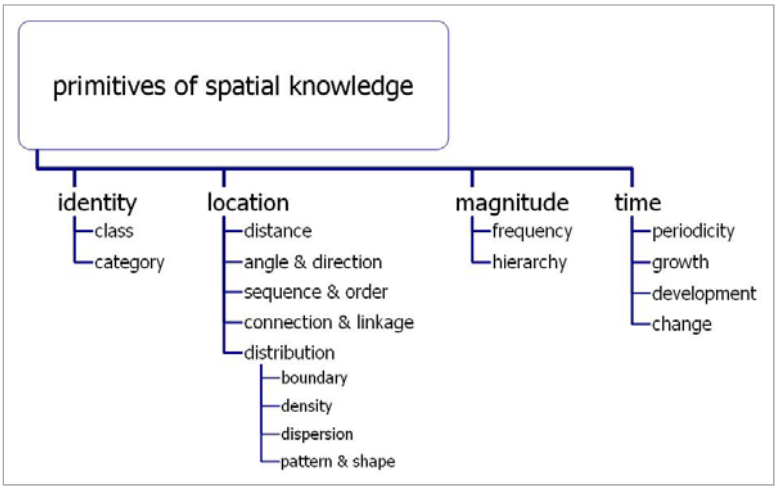


Figure 24 *Schéma des concepts primitifs de la connaissance spatiale selon Golledge, 1995.*

Janelle et Goodchild (2011), ont présenté une synthèse des concepts liés aux analyses des phénomènes géo-spatiales (représentés à une échelle géographique, comme dans les SIG). Ces concepts fondamentaux, dont la Figure 25 illustre l'arborescence, ont des concepts subsidiaires, indiqués ci-après :

Location [points, lignes, areas (e.g. polygones, rasters, et tessellations)]
Distance [distance, échelle]
Voisinage et Région [région fonctionnelle, territoire]
Réseaux [circuits, routes, chemins, graphs]
Overlays [intégration, unions, intersections]
Echelle[généralisation, fractales]
Hétérogénéité spatiale [first-order effects, non-stationarity, uncontrolled variance]
Dépendance Spatial [spatial clusters, régions,]
Objets and Champs [objets discrets versus phénomènes continus]

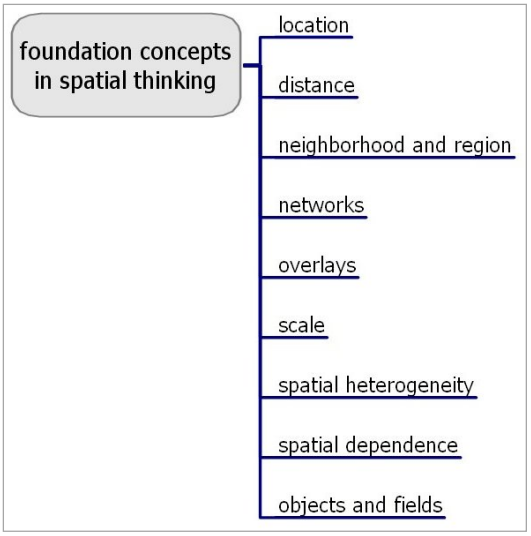


Figure 25 *Schéma des concepts primitifs de la connaissance spatiale selon Janelle et Goodchild (2011)*

Jo et Bednarz (2009), de leur côté, ont présenté une taxonomie où les concepts spatiaux sont organisés selon leur complexité (du plus simple au plus complexe), le type de mécanisme cognitif engagé (input, processing, output) et le type de représentation concernée (carte, diagramme, photo…). Concevoir une taxonomie signifie caractériser un phénomène, construire des catégories propres à ce phénomène et ensuite organiser ces catégories selon un ensemble cohérent de principes (Krathwohl, Bloom, and Masia 1964). Par conséquent, établir une taxonomie de pensée spatiale consiste à identifier les aspects clés de cette intelligence et de leur attribuer des rôles pertinents. Les trois premières catégories (en gras dans le schéma de la Figure 26) correspondent à la division établie par le NRC (2006) ; les sous-catégories sont issues de la littérature.

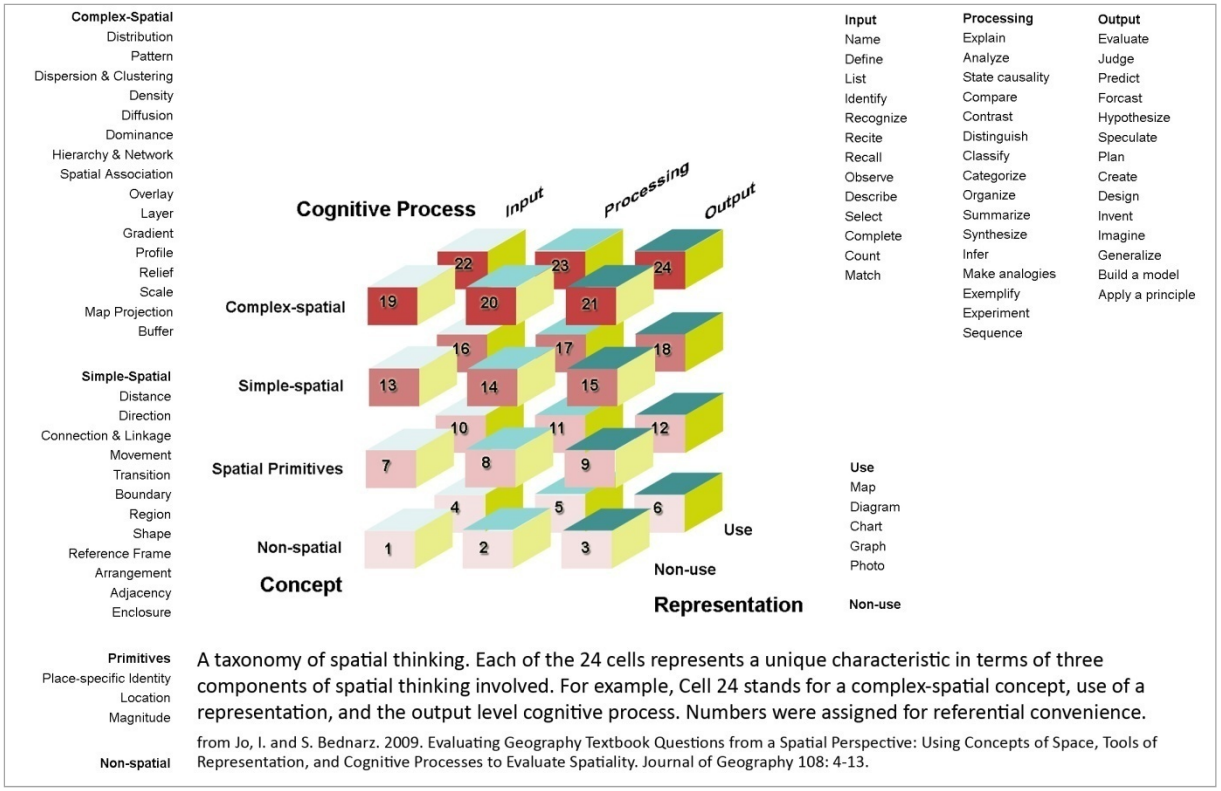


Figure 26 *Taxonomie de la pensée spatiale, proposée par Jo et Bednarz, 2009.*

L'identification et l'organisation des concepts spatiaux permet de clarifier les relations qui sous-tendent les connexions entre pensée spatiale et SIG. Etant donné la vulgarisation des technologies géo-spatialisées, il semble déterminant que l'utilisateur soit en condition d'appréhender et de s'approprier des concepts sous-jacents les nombreuses fonctionnalités des SIG. Des nombreuses recherches ont été menées (par exemple, Ishikawa, 2011) pour évaluer d'une part l'apport de la pensée spatiale aux Sciences de l'Information Géographique et d'autre part l'apport des SIG à l'apprentissage de la pensée spatiale. Si la deuxième condition ne semble pas être satisfaite (NRC, 2006) dans la mesure où aucune étude, sauf les travaux de Lee et Bednarz (2009), n'a vérifié empiriquement les effets des SIG sur l'apprentissage de compétences spatiales, la première condition a fait l'objet d'un des 13 sujets prioritaires listés par l'UCGIS (University Consortium for Geographic Information Science, 2005) lors de la publication du GIS&T Book of Knowledge (BoK, 2006). Le Bok fourni un guide exhaustif des concepts et compétences qui doivent être acquises dans l'enseignement supérieur dans les domaines des SIG (voir Chapitre I).

4.2 Représentations spatiales : définitions

Les représentations — aussi bien internes (cognitives) qu'externes (graphiques, linguistiques ou physiques) — fournissent les formes dans lesquelles l'information peut être structurée, stockée, analysée, comprise et communiquée à d'autres personnes (NRC, 2006). La représentation spatiale interne concerne la manipulation d'images spatialisées dans le cerveau, ce qui demande des habilités spatiales telles que la visualisation, l'orientation et les relations spatiales (Egarty et Al., 2006). La représentation spatiale externe se réfère à l'organisation, l'interprétation et la communication de l'information avec des cartes, des graphiques ou des images.

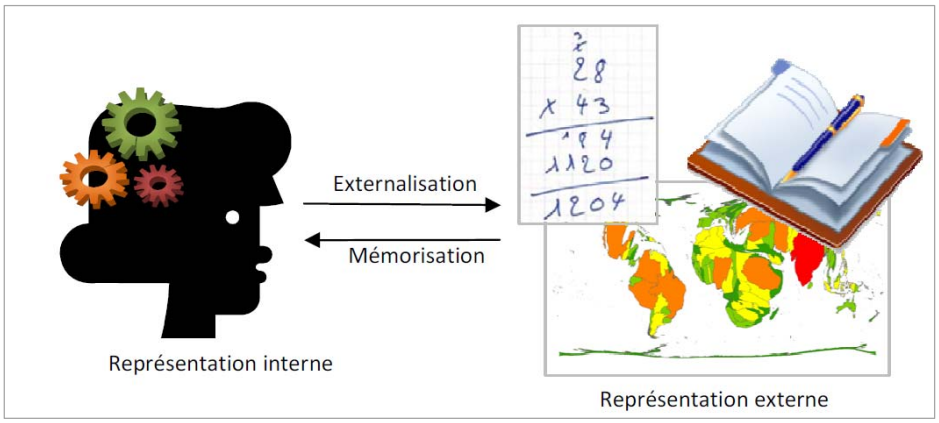


Figure 27 *Internal and external cognition, Chabris et Kosslyn, 2005*

Les mécanismes de représentation sont régis par la perception et par la pensée visuelle (*visual thinking*).

Le fonctionnement perceptuel est un processus à deux sens : on obtient des caractéristiques du monde extérieur et on modifie, on met en valeur et/ou on interprète, ces informations selon l'intention du moment. L'incroyable puissance de la pensée visuelle réside dans l'échange entre l'information extérieure et l'information intérieure (voir Figure 27) (Chabris et Kosslyn, 2005). On utilise les données de l'extérieur pour alimenter notre raisonnement interne et notre raisonnement peut être transféré sur les supports visuels (Beaulieu, 2009).

La pensée visuelle utilise la partie droite du cerveau pour raisonner de façon créative et imaginative. La partie droite du cerveau est aussi le siège des émotions, de l'art et de l'intuition. Par contraste avec la pensée visuelle, la pensée verbale utilise la partie gauche du

cerveau pour traiter l'information en série et raisonner par objet, de façon logique et linéaire. Elle utilise la connaissance du langage et les facultés mathématiques. A l'âge adulte, on a habituellement appris à développer ce mode de pensée (NRC, 2006). On communique par le langage, on analyse avec des chiffres et on raisonne de façon logique. Cependant, le raisonnement logique montre parfois ses limites. Lorsque le problème devient très complexe et que le nombre de données ou d'objet à analyser est important, le raisonnement verbal n'arrive plus à gérer la quantité d'informations et devient rapidement surchargé (Miller, 1956; Wurman, 1989). Plusieurs exemples du passé montrent une résolution de problème plus efficace et plus rapide par la pensée visuelle (ex. Dr. Snow et l'épidémie de cholera, la marche de Napoléon) (Mackinlay, 2008 in Beaulieu, 2009). Toute la puissance de la pensée visuelle réside dans le fait que toutes les informations saisies par notre système visuel sont traitées en parallèle permettant l'extraction de nombreuses informations rapidement (MacEachren, 1995, Ware, 2008). La vision globale est employée pour déclencher un vaste éventail d'associations (Beaulieu, 2009).

Une importante littérature a été consacrée depuis les années '80 à l'exploration de la cognition visuelle dans le domaine des Sciences de l'Information Géographique : de Bertin (1977) qui a posé les bases de la sémiologie cartographique, à MacEachren (1995) qui a fourni des connaissances incontournables sur les processus de géo-visualisation, ainsi que des méthodes nouvelles de représentations spatiales avec les nouvelles technologies. La recherche internationale vise à cerner et à développer des outils cognitifs pour rehausser la capacité humaine à comprendre l'information géographique.

4.3 Raisonnement spatial : définitions

Les processus de raisonnement fournissent les moyens pour manipuler, interpréter et expliquer l'information structurée (NRC, 2006). Cette définition du National Research Council semble être un peu réductive et elle mérite un approfondissement. Les processus de raisonnement passent à travers différentes phases, qui ne se limitent pas au traitement de l'information structurée. En effet, le raisonnement, en tant qu'opération mentale permettant l'élaboration d'une conclusion grâce à un enchainement logique de jugements, aide l'individu à manipuler les données, interpréter les informations et justifier des résultats, bref, à construire une connaissance. Dans cette logique, il est nécessaire de situer les notions de donnée, d'information et de connaissance selon la littérature. Notre point de départ et parti

pris, est le continuum de la compréhension, décrit par Clark (2004) et basé sur la pyramide hiérarchique DIKW (Data, information, Knowledge, Wisdom) de Bellinger et Al., (2004) et (Clark, 2004) in Beaulieu (2009). Les définitions succinctes suivantes sont ainsi adoptées :

- Une donnée est une information brute, sans signification autre que son existence. Elle est le produit de l'observation de la réalité.
- L'information contient des descriptions et un contexte qui nous permettent de répondre aux questions qui ?, quoi ?, quand ?, ou/et combien ?. Ce sont des données avec une signification attribuée par l'intermédiaire des relations ou d'une organisation.
- La connaissance est une collection d'informations utiles qui répond à la question « comment ? ». Elle peut être acquise d'un autre individu, par des instructions ou par l'expérience. Le passage de l'information à la connaissance suppose de dégager une appréhension globale de l'espace étudié, de verbaliser cette connaissance, de la confronter à un modèle d'interprétation (Genevois, 2008).
- La sagesse est le point culminant de la pyramide. Elle implique le jugement, la morale et les codes éthiques. Elle se construit à partir des connaissances acquises. A cette dernière étape du processus, l'individu est à même de mettre en œuvre des capacités d'introspection, de recul, d'évaluation d'une situation […](Genevois, 2008).

Selon Bellinger et Al., et Clark (2004, in Beaulieu, 2009) c'est la compréhension qui supporte la transition entre chaque concept voir (Figure 28). Bellinger et Al., *(*2004) suggèrent que le passage entre la donnée et l'information implique de comprendre les relations. Le passage entre l'information et les connaissances implique de comprendre les structures. Finalement, le passage entre les connaissances et la sagesse implique de comprendre les principes. La figure I.5 présente la progression entre les différents paliers de la construction de la connaissance.

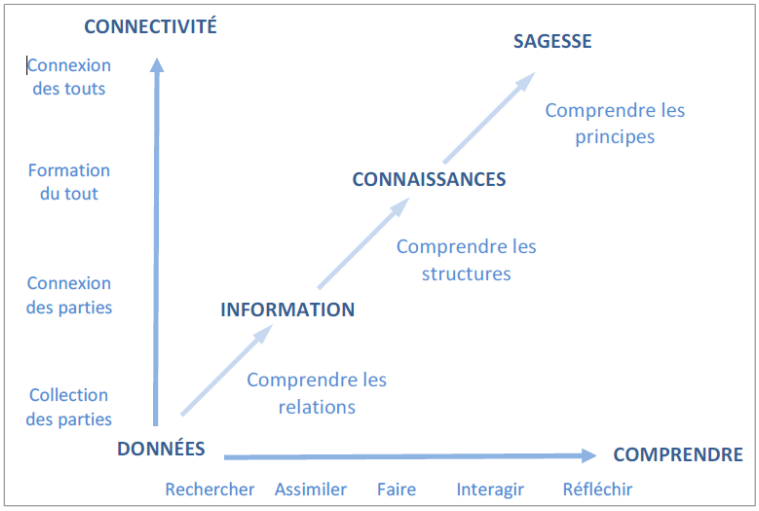


Figure 28 *La hiérarchie DIKW et le continuum de la compréhension (Bellinger et Al., 2004) et (Clark, 2004) in Beaulieu (2009)*

Si cette théorie est à la base du développement des sciences de l'information, qui ont associé à la hiérarchie à différentes typologies de systèmes d'information (SIG, SIManagement..), elle s'adapte pertinemment aux domaines de la cartographie avec les SIG et de la géo-visualisation : le raisonnement spatial pour la résolution d'un problème, à travers la production et l'interprétation cartographique ou l'exploration géo-visuelle, se développe dans ce contexte d'évolution de la compréhension de la donnée.

Le raisonnement spatial, en plus des deux modèles classiques de raisonnement, l'inductif et le déductif, est donc caractérisé par un troisième, axé sur les objectifs et typique aux SIG : l'abductif. Le raisonnement inductif est l'inférence à partir d'une information spécifique vers une règle générale ; le raisonnement déductif est l'inférence à partir d'une règle générale vers une spécificité; le raisonnement abductif est la construction d'hypothèses exploratoires à partir de données empiriques (Ishikawa, 2011).

Le raisonnement spatial fait partie de la construction des connaissances selon la méthode scientifique, telle que décrite par Gahegan et Al. (2001), qui comporte plusieurs étapes itératives passant de l'abduction à la déduction par l'induction. La première étape est l'exploration, la fouille de données, qui amène à la formulation d'hypothèses et donc un raisonnement abductif. Lorsqu'une hypothèse guide notre recherche, on entre dans un raisonnement inductif duquel on cherche à découler des règles et des comportements. On analyse et on traite ensuite de façon déductive les données, pour valider les informations obtenues et ensuite les évaluer et les présenter. Le processus de construction de la

connaissance est hautement itératif. On passe constamment de la donnée à l'information à la connaissance et l'inverse. Le processus abductif qui guide les premières étapes du processus de construction de la connaissance est primordial pour la découverte de nouvelles connaissances (Beaulieu, 2009).

4.3.1 Raisonnements et résolutions de problèmes : le cas de la cartographie d'aptitude avec des méthodes d'analyse spatiale multicritères.

Le raisonnement est impliqué dans de nombreuses activités comme la compréhension, l'apprentissage, le jugement, la prise de décision et la résolution de problèmes. L'activité de résolution de problème se définit par la relation entre tâche(s) et compétences du sujet ; il y a résolution dans les situations dans lesquelles on doit élaborer une procédure, c'est-à-dire, une suite organisée d'actions permettant d'atteindre un but (Nicolas et Al., 2007). La résolution d'un problème met en œuvre des méthodes de recherche générales et spécifiques au sein d'un espace de problème. La représentation construite au terme du processus de compréhension intègre l'espace du problème et l'ensemble des méthodes et connaissances activées par la recherche d'une solution dans cet espace.
La méthode de résolution la plus simple que l'on puisse concevoir fonctionne par "essai-erreur". Cette méthode est une recherche "à l'aveugle" dans l'espace du problème. Elle consiste à appliquer au hasard un opérateur parmi ceux disponibles, puis à évaluer le résultat de l'application de manière à en essayer un autre si ce résultat est négatif. Elle est appliquée en dernier ressort et on lui préfère généralement des méthodes appelées des heuristiques. On entend par heuristique : *« une démarche relativement empirique, établissant des hypothèses provisoires dans laquelle l'imagination, l'expérience, et l'histoire personnelle ont une place non négligeable»* (Lebraty, 2006, page 3.) Pour Newell et Simon (1972), le processus de résolution est guidé par des heuristiques de recherche qui s'appliquent dans un très grand nombre de problèmes, mais qui n'offrent pas, en soi, la garantie du succès de la recherche.

Jankowski et Al., (2000) s'intéressent aux traitements heuristiques pour la résolution de problèmes spatiaux décisionnels. Dans le cas, étudié par les auteurs, d'un problème de recherche de site avec des méthodes d'analyse spatiale multicritères (cartographie d'aptitude), l'objectif est de limiter la complexité cognitive qui se manifeste sur deux dimensions : le résultat de la combinaison des critères et la décision géographique.

Dans la première dimension, la complexité cognitive dépend du nombre de critères impliqués dans le problème. Dans la plupart des techniques multicritères, le décideur doit expliciter ses préférences pour les critères en leur attribuant un coefficient multiplicatif, un poids. Plus le nombre de critères est important, plus il est difficile pour le décideur d'attribuer aux critères des poids cohérents et représentatifs de ses choix. Aussi, la plupart des techniques multicritères assument implicitement que les critères ne sont pas corrélés, ce qui n'est pas le cas dans le monde réel. La complexité cognitive des résultats des critères et de leurs relations peut être réduite au moyen de procédures statistiques standardisées. Dans la deuxième dimension, la complexité dépend du nombre d'options de décision possibles : les relations spatiales et les patterns spatiaux des options de décision, produisent une complexité supplémentaire. Pourtant, les décideurs doivent être en condition de mobiliser leur connaissance heuristique sur la situation de décision, pour identifier des patterns et des relations à partir de cartes. Par conséquent, des moyens explicites pour exprimer la connaissance heuristique doivent être incorporés dans les méthodes de résolution de problèmes spatiaux décisionnels. Par exemple, la possibilité d'éliminer des critères d'évaluation «faibles» aide à limiter la complexité cognitive et sert aussi à structurer le problème de décision, qui est le principe fondamental du support à la décision.

Les problèmes décisionnels sont souvent définis comme étant 'semi-structurés' (Armstrong et Densham, 2008). Les problèmes géographiques semi-structurés contiennent des aspects qui peuvent être codés et analysés par les structures des données et les logiciels SIG, mais ils contiennent aussi d'autres aspects qui ne peuvent pas être formalisés et qui restent en dehors du domaine digital : ils peuvent inclure un sens politique ou culturel. Le sociologue, économiste et psychologue Herbert Simon, dans le cadre de ces recherches sur le comportement humain (1979, in Armstrong et Densham, 2008), affirme que les personnes sont incapables de comprendre pleinement toutes les facettes d'un problème décisionnel complexe ; ils emploient systématiquement une rationalité limitée qui leur permet de trouver des solutions en analysant les aspects qu'ils connaissent. Ces problèmes sont souvent abordés en les décomposant en une série de sous-objectifs réalisables (et souvent hiérarchisées). Le processus qui permet d'atteindre des sous-objectifs pertinents, utilisés pour guider la prise de décision, est appelé *satisficing.* Le terme *satisficing* (Simon, 1957), ou *principe du seuil de satisfaction de l'individu* est un mot-« valise » formé des mots *satisfying* (satisfaisant) et *sufficing* (suffisant). Simon (1957) explique ainsi que les gens sont prêts à accepter une solution « suffisamment bonne » plutôt « qu'optimale » si l'apprentissage de toutes les alternatives devait coûter du temps ou des efforts. Thorndyke et Stasz (1980) soulignent que

la résolution de problèmes spatiaux complexes demande l'extraction et l'intégration simultanée de plusieurs éléments de la carte ; cet effort peut être réduit grâce à l'interaction avec les SIG, qui, avec leurs capacités de modélisation, peuvent aider à créer un modèle mental propre à un contexte de problème spatial.

En conclusion, la pensée spatiale, que ce soit dans sa dimension conceptuelle, de représentation ou de raisonnement, est un sujet interdisciplinaire, allant de la psychologie à la pédagogie des SIG. Eclaircir sa signification, dans un domaine où les terminologies se recouvrent plus ou moins, peut contribuer à mieux maîtriser les liens entre plusieurs notions et positionner un composant dans un système, qu'il soit cognitif, théorique ou technologique.

5. Les questions de recherche

Selon la Théorie des Modèles Mentaux (TMM) de Johnson-Laird (1990), « raisonner met en œuvre une suite de processus cognitifs ou étapes de traitement ». D'abord, il s'agit d'encoder les données du problème (les prémisses), c'est-à-dire s'en construire une représentation mentale afin de comprendre les prémisses. Puis, le système cognitif fait des inférences en construisant une image mentale d'exemples particuliers décrits par les prémisses. Ensuite, le système tente de réfuter une première conclusion, en pensant à des contre-exemples. Enfin, le système fournit une réponse. Selon la TMM, « les erreurs de raisonnement peuvent avoir plusieurs sources : mauvaises représentations/compréhension des prémisses, dues à un défaut d'encodage, dérivation défaillante des conclusions des prémisses, ou encore recherche défectueuse de contre-exemples falsifiant la règle testée » Selon la Théorie de la Logique Mentale (TLM) de Braine et O'Brien (in Lemaire 2006), le système cognitif applique des règles (adéquates) de la logique formelle aux prémisses du problème. (Lemaire, 2006).

Grâce aux éléments théoriques issus des cadres présentés ci-dessus, nous définissons les raisonnements que nous voulons étudier dans le cadre de la résolution d'un problème de localisation de site, comme étant décrits par un ensemble de tâches, de choix d'actions, d'opérateurs (des règles) et d'objets conceptuels (inférences) mobilisés. Plus précisément :

- *Une tâche* est constituée d'une ou plusieurs action(s) et définie comme 'main steps in procedures' (Eastman, 1997).

- *Une action* est constituée d'une ou plusieurs opération(s) et définie comme 'rules in decision-making procedures' (Eastman, 1997).

- *Une opération* est caractérisée par un ou plusieurs objet(s) et comporte une ou plusieurs variables en entrée et génère une unique variable en sortie. Dans le cas de *l'algèbre des cartes*, les variables impliquées ne sont pas uniquement des nombre, mais des couches d'information géographique. Et les opérations effectuées sont de nature cartographique et non seulement arithmétique ou trigonométrique (Tomlin, 1994).

  Une opération particulière : le *contrôle (d'erreur)* est caractérisé par un ou plusieurs objet(s) et défini comme 'l'acte d'identifier un choix inapproprié dans un ensemble d'options (Ohlsson, 1997). Qu'est-ce que ça veut dire de commettre une erreur dans une tâche de choix séquentiel ? C'est une action qui ne va pas dans la bonne direction de l'objectif à atteindre. Cette action est inutile et inappropriée dans un contexte spécifique et elle entraine des conséquences sur le milieu, appelées « signaux d'erreur ». Puisque la connaissance guide l'action, corriger une erreur permet d'améliorer une future performance par l'application d'une structure cognitive appropriée » (Ohlsson 97, traduction libre). Les dimensions contrôle et validation sont au cœur du modèle de l'apprenant proposé par Ohlsson (1992). En effet, l'auteur propose, dans le cas des connaissances procédurales et de la résolution de problèmes, de considérer chez un apprenant les connaissances, sous forme de contraintes, qui lui permettent d'évaluer si sa solution est correcte.

- *Un objet* est décrit « comme un groupement temporaire entre un ensemble de caractéristiques visuelles et d'informations verbales » (Kahneman, 1992, in Ware 2005).

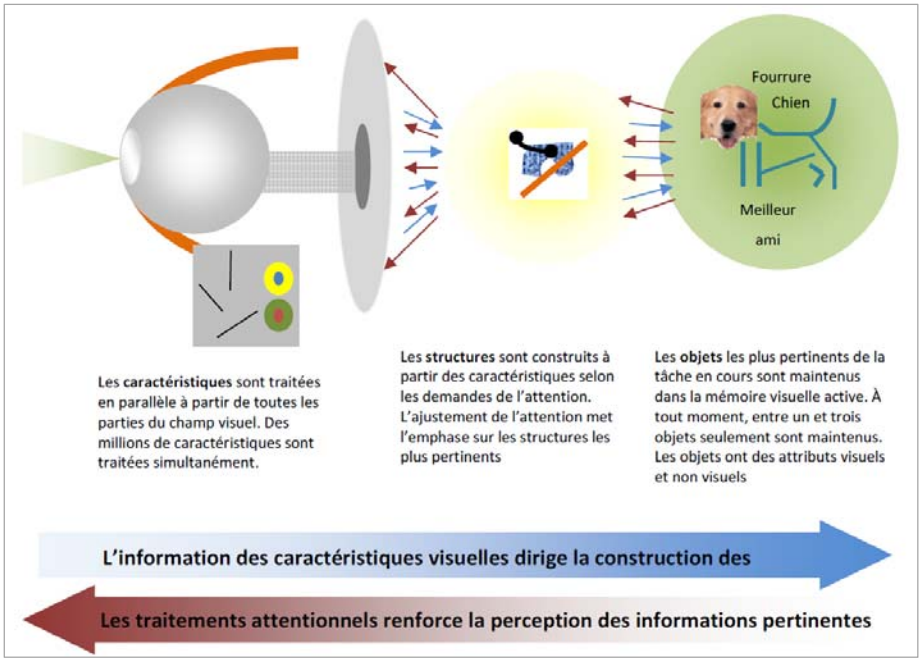


Figure 29 *Schéma de la construction du raisonnement visuel. C.Ware, Visual thinking for design, 2008.*

Ware (2008) illustre la construction du raisonnement visuel en considérant trois composants : les caractéristiques, les structures et les *objets* (voir Figure 29). Le traitement de l'information visuelle comporte trois grandes étapes. La première étape, le traitement parallèle, comporte l'extraction, du champ de vision, des caractéristiques : l'orientation, la couleur, la texture et le mouvement. Cela se produit rapidement et sans qu'on ait à y penser consciemment. (Ware, 2004, 21). Au cours de la deuxième étape, la mémoire de travail et la mémoire à long terme interviennent toutes deux; elles répartissent les caractéristiques décelées au cours de la première étape en simples regroupements ou schémas. Au cours de la troisième et dernière étape, un nombre restreint d'*objets* visuels sont extraits À ce stade, les *objets* sont temporairement stockés dans la mémoire à court terme afin qu'on puisse y accéder de nouveau rapidement; toutefois, on ne peut accorder une telle attention qu'à une faible quantité de données à la fois (Ware, 2004). Cette étape est aussi influencée par un traitement en fonction des buts, fondé sur des questions dirigées ou stimulées. Selon Few (2007), nous voyons les choses qui suscitent notre intérêt et font naître une question, et nous donnons suite en faisant une recherche dans notre champ visuel.

Dans notre cas d'étude, les objets (Rosch,1976 et Ware, 2004), les opérations et les actions devront être définis pour la carte d'aptitude.

En vue des précisions apportées, la question générale concernant l'identification de raisonnements (voir Introduction) peut être déclinée en deux questions spécifiques :

1. Quelles opérations sont effectuées et quels objets sont utilisés par les experts et les étudiants (novices), lors de la résolution d'un problème de localisation de site avec la cartographie d'aptitude ?

2. Afin d'identifier et quantifier les différences d'objets et d'opérations entre experts et étudiants, quels indicateurs utiliser et comment les mesurer ?

Pour pouvoir répondre à ces questions un protocole expérimental est mis en place. Nous présentons les détails du protocole expérimental dans le Chapitre V.

6. Synthèse

Ce chapitre introduit l'approche et la perspective sur lesquelles s'appuie l'exploration de mécanismes cognitifs qui régissent l'interprétation d'une carte et plus particulièrement la carte d'aptitude. Cette vue d'ensemble guide et soutient le développement de notre recherche.

Le fil conducteur de notre cadre théorique est la compréhension des mécanismes mentaux qui sous-tendent la lecture et l'interprétation d'une carte. Nous avons présenté un aperçu des mécanismes cognitifs plus profonds, allant de la vision au fonctionnement perceptuel jusqu'aux représentations mentales (schémas), qui nous expliquent commet l'humain traite l'information et construit la connaissance en explorant une scène visuelle. Nous nous intéressons tout particulièrement au schéma proposé par Allan MacEachren (1995) dans son approche cognitif-sémantique de l'interprétation cartographique (voir Figure 22). Ensuite, nous considérons, selon une perspective didactique, les notions de modèles mentaux, qui se différencient des notions de schémas. Pour cela, nous nous appuyons sur les travaux en didactiques des sciences expérimentales qui analysent essentiellement le continuum expert-novices et nous avons pu définir l'expertise, dans le contexte de la cartographie. Enfin, nous avons positionné les notions de raisonnement spatial et de ses composantes, qui constituent les fondements de notre domaine de recherche.

La formalisation des questions de recherche qui régissent la phase expérimentale conclut cette approche théorique.

CHAPITRE V : LE PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Ce chapitre présente la phase expérimentale de notre recherche. Il comporte la conception et la mise en œuvre du problème de cartographie d'aptitude, l'observation de la résolution du problème par deux populations différentes, les étudiants et les experts, et les moyens du recueil des données pour pouvoir analyser leurs différentes démarches et stratégies adoptées par les deux populations. La phase expérimentale est cruciale dans notre étude car, si elle permet en premier lieux d'apporter des réponses aux questions de recherche, elle permet aussi de découvrir des aspects inattendus. Pour cela, notre approche reste exploratoire.

Le chapitre s'articule essentiellement en deux parties : la première est consacrée aux expérimentations avec les étudiants et la deuxième est consacrée à l'expérimentation avec les experts. Bien que le problème de cartographie d'aptitude soit le même, la scénarisation de la situation est différente pour les deux populations. Avec les étudiants, nous étions en situation authentique puisque l'expérimentation a été menée lors d'une Unité d'Enseignement (UE) (module) faisant partie de leur cursus annuel et demandant une évaluation finale ; aux experts nous avons soumis le problème en demandant de le résoudre en quelques heures.

1. Introduction au protocole expérimental

Pour répondre aux questions de recherche, nous avons mis en place un protocole expérimental selon les paradigmes de la Design-Based Research (Edelson, 2002). Cette méthodologie permet, à partir d'objectifs d'apprentissage et par itérations successives entre analyse, conception et mise en situation, de concevoir et faire évoluer un dispositif de formation. Notre protocole expérimental est basé d'une part sur la conception d'un dispositif de formation, une situation-problème, la plus proche possible de la réalité professionnelle et d'autre part sur le recueil de données relatif à l'observation de l'activité des étudiants et experts résolvant ce problème. Pour le chercheur, l'observation consiste à se trouver présent et à se mêler à une situation pour l'enregistrer et l'interpréter en s'efforçant de ne pas la modifier (Peretz, 1998 in Marzin, 2011). L'observateur-chercheur, selon des procédures dites « non réactives » assiste aux actes et gestes, écoute les échanges verbaux. Pour cela, il a quatre tâches à accomplir :

- Etre sur place parmi les personnes observées et s'adapter à ce milieu
- Observer le déroulement ordinaire de la situation
- Enregistrer ceux-ci
- Interpréter ce qu'il a observé

L'observation s'applique à des populations restreintes ou particulières, pour la recherche de réponses approfondies et est une approche adaptée à l'étude des interactions dans les séances d'enseignement. Deux types d'observation sont habituellement mis en oeuvre : l'observation directe, où l'observateur doit être le témoin des comportements des individus ou des groupes sur le terrain (dans leurs lieux habituels) sans en modifier le déroulement ordinaire de la situation ; l'observation de situation construite ou provoquée (observation de type expérimental qui peut se faire en laboratoire ou sur le terrain) où l'observateur examine effectivement le comportement des individus ou des groupes dans des situations qu'il a mises au point. La situation de laboratoire est plus artificielle, mais elle permet de contrôler les paramètres de la situation pour observer plus précisément certains facteurs connus et leurs interactions. L'expérimentation de terrain (en conditions écologiques) consiste à recueillir des observations authentiques de situation de classe et permet l'observation de phénomènes nouveaux. Dans notre cadre expérimental, nous étions en observation, sur le terrain, d'une situation construite. L'équipe de concepteurs comprenait deux chercheurs, les observateurs, et deux enseignants, les tuteurs des étudiants.

2. L'expérimentation avec les étudiants

2.1 Les participants#

Dans le but d'observer une grande variété de stratégies, nous avons mené une expérimentation auprès de deux groupes bien différentiés mais tous deux de niveau bac +3.

D'une part, 15 étudiants en Licence Professionnelle 'Prospection et Protection des Ressources Souterraines', de l'UFR PhITEM (Physisque, Ingénierie, Terre, Environnement et Mécanique) de l'Université Joseph Fourrier de Grenoble (OSUG) : ces étudiants suivent une formation en alternance – entreprise et université- et ont déjà fait le choix d'une spécialisation ; ils ont une connaissance de la donnée cartographique acquise dans des cours universitaires de géologie, mais ils ne sont pas familiarisés aux méthodes d'analyse spatiale

avec les SIG. La promotion 2012 était constituée de 10 garçons et 5 filles et leur âge allait de 22 à 25 ans. Ils ont été organisés en 3 groupes de 5 personnes.

D'autre part, 51 étudiants en 1ère année d'Ecole d'Ingénieurs 'Eau, Énergie, Environnement' (E3) de l'Institut National Polytechnique de Grenoble. Ces étudiants sortent des classes préparatoires à dominante mathématique et physique, ils sont plus généralistes que les géologues à ce stade de leurs études d'ingénieurs, car ils débutent. Comme les géologues, ils sont novices en analyse spatiale avec les SIG. Ils sont aussi novices en cartographie. La répartition garçons-filles de la promotion 2012 était à peu près équivalente ; leur âge allait de 21 à 23 ans. Ils ont été organisés en 8 groupes de 6-7 personnes.

2.2 La conception de l'Unité d'Enseignement : 'Initiation aux SIG et à l'Analyse Spatiale Multicritère

Les étudiants ont été observés tout au long d' un module « d'initiation au SIG et à l'analyse spatiale » qui, tout en s'adaptant aux contraintes curriculaires (volume horaire, calendrier et évaluation), a visé l'acquisition de connaissances nouvelles.
Ce module, conçu exprès pour les expérimentations, a pris en compte certaines considérations issues d'enquêtes préliminaires (voir Chapitre I) que nous avions conduites sur les approches pédagogiques couramment mises en place pour l'enseignement des SIG (Balzarini et Al., 2011). La courte enquête menée dans le cadre des enseignements SIG en géosciences à l'Université de Grenoble confirme que les modalités pédagogiques sont d'une part ponctuelles et non progressives et d'autre part sont caractérisées par une approche très technique (découverte de l'environnement numérique et de l'organisation des outils, manipulation de principales fonctionnalités, création et publication des cartes). Les cours sont transmissifs, supportés par des « fiches de travail », qui présentent les instructions pour les manipulations, les notions sur les principaux concepts liés à l'information géographique et aux SIG (projections, formats matriciel ou vectoriel, requêtes..) et le problème à résoudre. Les jeux de données sont également fournis. L'activité est souvent limitée à des opérations « presse-bouton ». La principale conséquence de cette situation sont des apprentissages transitoires (provisoires) –« les savoirs morts »- qui ne semblent pas avoir du sens aux yeux des étudiants : ils sont souvent décontextualisés et par conséquence pas motivants, ne favorisent pas le transfert de connaissances antérieures dans de nouvelles situations (Dury,

2004). Ils ne construisent pas deconnaissance sur la complexité technique et conceptuel de l'outil et ne peuvent pas être réinvestis efficacement dans le monde professionnel.

Afin de palier ces défaillances et d'amener les étudiants et les enseignants à passer d'une culture de transmission du savoir centrée sur l'enseignant à une culture d'appropriation centrée sur l'étudiant (Raucent & Al., 2004*),* nous nous sommes appuyés sur les méthodes et les principes de pédagogie active, plus précisément l'Apprentissage Par Problème, pour la conception du module. Nous donnons ci-après quelques indications sur les spécificités de cette approche pédagogique.

2.2.1 L'approche par la pédagogie active : l'Apprentissage Par Problème

L'Apprentissage Par Problème– APP – est une pédagogie active, qui est née dans les années '70 à la Faculté de Médecine de la Mac Master University à Hamilton en Ontario, sur les concepts du socio-constructivisme, et qui a été « importée » et diffusée en Europe, entre autre par la Faculté des Sciences Appliquées (FSA) - école d'ingénieurs de l'université catholique de Louvain (UCL). Si en partant de la remarque d'un étudiant anglais à son Doyen de Faculté « Chez vous on enseigne beaucoup, mais on apprend peu », on inversait l'affirmation « Chez vous on apprend beaucoup, mais on enseigne peu », les tenants de l'APP s'y retrouveraient sans doute (SPU- FUND, Namur, 1999).

La stratégie de l'APP se base sur quatre principes pédagogiques : *le traitement actif de l'information* afin de mieux mémoriser les connaissances, *la réactivation des connaissances préalables* sur lesquelles greffer les nouvelles, *l'organisation de connaissances* pour les mobiliser plus facilement à l'occurrence, et *la contextualisation des connaissances* dans une situation que l'on peut rencontrer dans sa vie personnelle ou professionnelle (Barrows & Tamblyn, 1980).

Le premier axe de cette approche consiste à placer les étudiants face à des situations problèmes qui *« proposent une tâche à l'élève pour laquelle il ne dispose pas pour le moment de tout ce qui lui est nécessaire pour l'accomplir. Il lui manque ce qui est prévu comme apprentissage, de telle sorte que sa réalisation passe par la maîtrise d'un objectif sous-jacent »* (Poirier- Proulx, 1999). Les situations problèmes doivent être suffisamment complexes pour nécessiter un travail de groupe. La situation problème est inspirée de la pratique dans un

secteur professionnel donné. Le but est d'asseoir solidement les connaissances, les savoir-faire ou les attitudes nécessaires à l'exercice de cette profession (Raucent et Al., 2010).

Une deuxième caractéristique essentielle de cette approche est le fait que l'apprentissage, nécessairement individuel, est favorisé, stimulé, encouragé et soutenu par le travail en groupe. Le travail en groupe, quand il est efficace, poursuit de nombreux objectifs qui favorisent l'apprentissage individuel.

Une thèse centrale de la pédagogie active en groupe est que, s'il est vrai qu'il ne suffit pas, pour un étudiant, d'assister à une présentation de la matière faite par un professeur pour apprendre réellement ce qu'il est supposé apprendre, il ne suffit pas non plus de lancer une question, un exercice ou un problème sur la table d'un groupe d'étudiants pour qu'ils apprennent. C'est à ce niveau qu'intervient le rôle central joué par le tuteur (enseignant), le troisième axe. Dans une démarche APP le rôle du tuteur consiste principalement à susciter le raisonnement chez les étudiants, à stimuler la mobilisation des savoirs et à relancer au groupe ses propres questions de manière à ce que les étudiants puissent déterminer, par eux-mêmes, l'état de leurs connaissances, leur degré de maîtrise des concepts pour en arriver à déterminer la qualité de leurs réponses.

L'APP est une situation d'apprentissage organisée autour de la recherche, de l'explication et de la résolution de problèmes signifiants (Hmelo-Silver, 2004). Cependant, le problème est défini de manière à ce qu'il n'y ait pas qu'une seule solution. Le processus d'autorégulation est important pour fixer les objectifs d'apprentissage, planifier le travail, sélectionner les stratégies pédagogiques appropriées, mettre en œuvre le plan de travail, suivre et évaluer le processus ainsi que l'atteinte des objectifs (Moust et Al., 2005). L'enseignant joue un rôle de « facilitateur » et guide les étudiants à travers un cycle d'analyse et de synthèse des apprentissages.

Les résultats de l'analyse de Dochy et Al. (2003) indiquent que les étudiants se rappellent davantage les connaissances qu'ils ont acquises, ce qui leur permet d'appliquer les compétences de résolution de problèmes à d'autres situations (Dochy et Al., 2003; Lohman, 2002). De plus, l'APP serait plus efficace que les méthodes traditionnelles pour préparer les étudiants au monde du travail (Lohman, 2002; Pastirik, 2006).
Les étudiants observent qu'ils sont plus motivés et plus satisfaits avec l'APP qu'avec la méthode de l'exposé, surtout pour ce qui est de leur expérience de formation, de leur compétence en communication et de l'apprentissage autonome (Cockrell et Al., 2000).

Malgré ces effets positifs, l'APP n'a pas toujours amélioré les résultats scolaires par rapport aux approches traditionnelles (Smith et Cook, 2012).

Nous avons adhéré à cette approche et organisé les composantes du module, c'est-à-dire, le problème, les ressources, les objectifs d'apprentissage, l'agencement de séquences, les interventions de tuteurs, la répartition du temps de travail entre individu et groupe, ainsi que les évaluations, selon ses principes. Nous précisions ci-après cette organisation qui est autrement appelée le *Scénario.*

2.2.2 Les objectifs d'apprentissage généraux

« La question principale posée à l'étudiant ou au diplômé aujourd'hui ne devrait plus être "qu'avez-vous appris pendant votre formation ?" mais plutôt «que pouvez-vous faire maintenant que vous avez obtenu votre diplôme ?". Cette approche présente un intérêt pour le marché du travail et est certainement plus souple lors de la prise en compte d'enjeux liés à l'apprentissage tout au long de la vie, l'apprentissage non traditionnel, et d'autres formes, non formelle d'expériences éducatives » (Traduction libre, Purser, Council of Europe, 2003). En Juin 1999, les représentants des Ministères de l'Éducation des 29 Pays européens se sont réunis à Bologne, en Italie, pour formuler la Déclaration de Bologne, visant à établir un programme européen commun de l'Enseignement Supérieur (EEES). Le processus de Bologne a énonce un certain nombre de «lignes d'action» dans lequel les résultats de l'apprentissage jouent un rôle important ; l'une des conséquences logiques, c'est que, depuis 2010, tous les programmes curriculaires dans les établissements de troisième niveau de l'Espace européen de l'enseignement supérieur sont fondé sur le concept d'objectifs d'apprentissage (Kennedy et Al., 2006). Parmi la vaste littérature consacrée à la définition d'objectifs d'apprentissage ou pédagogiques, nous retenons ici celle proposée par le groupe de travail de la Commission Européenne (ECTS Users' Guide, 2005), comme définition de travail :

« Les *objectifs d'apprentissage* sont des énoncés de ce que l'apprenant devrait connaître, comprendre et / ou être en mesure de démontrer à l'issue d'un processus d'apprentissage ». Ils de distinguent des *compétences,* qui selon le ECTS Users' Guide (2005) sont «une combinaison dynamique d'attributs, de capacités et attitudes » et « sont formés dans diverses unités d'enseignement et évalués à différents

stades ». En s'appuyant sur les travaux de Bloom (1964) et Krathwohl (2002), qui décrivent trois domaines d'apprentissage – le cognitif, l'affectif et le psycho-moteur-, la Déclaration de Bologne fournit une nomenclature claire et exhaustive pour décrire avec des verbes tous les objectifs des trois domaines. Nous utilisons cette liste verbale pour décrire nos objectifs pédagogiques, dont nous présentons ci-après les éléments généraux :

Objectifs pédagogiques des Systèmes d'Information Géographique (SIG)

- Savoir analyser une problématique environnementale selon une approche d'analyse spatiale.
- Comprendre les principes et concepts de base des SIG.
- Comprendre l'intérêt des Systèmes d'Information Géographique pour la résolution de problématiques environnementales.
- Connaître les principales fonctionnalités d'un logiciel SIG.

Objectifs pédagogiques transversaux

- Savoir travailler en groupe de manière coopérative (animation, coordination, la communication, respect mutuel, bonne humeur…).
- Développer l'autonomie, la motivation et la prise d'initiative.
- Développer l'auto- réflexion : être capable d'analyser, de comprendre et d'évaluer son propre processus d'apprentissage et de résolution de problème. Le but étant d'être capable de s'améliorer continûment en tirant les leçons des expériences vécues.

Les objectifs d'apprentissages (OA) spécifiques à chaque séquence du module, décrits en début de chaque séquence, sont formulés selon les indications de la déclaration de Bologne et reliés aux objectifs d'apprentissage propre au domaine des sciences de l'information géographique minutieusement exposés dans le GIS &T Book of Knowledge (2009). A titre d'exemple, nous présentons ci-après les OA d'une séquence du module conçu. La première phrase correspond à la formalisation de nos intentions selon les indications de Bologne ; la deuxième phrase est le référent du BOK (Book of Knowledge), exprimé par code de 'Area, Sujet et Unité' (ex. : TAM6-1).

- ✓ S'approprier des concepts de base de la représentation des données dans un SIG. (TCV3-2) *Basic concepts of symbolization*
- ✓ Identifier la méthode cartographique adequate (Topic CV4-1) *Basic thematic mapping methods*
- ✓ S'approprier des modèles courants d'attribution de la couleur en cartographie. (TCV3-3) *Color for cartography and visualization*
- ✓ Calculer les données dérivées. (TAM6-1) *Calculating surface derivatives*
- ✓ Définir l'exclusion et les contraintes. (TAM2-3) *Spatial Queries* et (AM4-4) *Map algebra.*

2.2.3 La conception du problème

Un problème efficace doit d'abord susciter l'intérêt des étudiantset les motiver à chercher pour mieux comprendre les concepts introduits. Les problèmes bien définis amènent les étudiants à prendre des décisions ou à émettre des jugements justifiés par la logique ou la rationalisation des principes appris. La question initiale du problème devrait avoir une ou plusieurs des caractéristiques suivantes, de sorte que tous les élèves dans les groupes sont d'abord entraînés dans une discussion sur le sujet :

- ouverte, ne se limite pas à une seule réponse correcte ;
- connectée aux connaissances apprises préalablement ;
- avec des enjeux controversés qui susciteront des opinions diverses.

Le problème, doit permettre de relier les connaissances préalables aux nouveaux concepts, et permettre la jonction de nouvelles connaissances à des concepts issus d'autres cours et / ou disciplines (Duch, 1996).

D'un point de vue plus strictement didactique, la didactique française des mathématiques et des sciences nous offre des outils pour structurer et réfléchir à la conception du problème. Plus particulièrement, la Théorie Des Situations (TDS) de G. Brousseau (1998), fondée sur une conception socioconstructiviste de l'apprentissage, précise que, dans la situation dite didactique, l'enseignant conçoit une situation-problème qui doit permettre aux élèves d'acquérir une connaissance nouvelle ; la connaissance que l'on désire voir acquérir doit être l'outil le plus adapté pour la résolution du problème. Selon M. Fabre (1999) et JP. Astolfi (1992), on distingue cinq caractéristiques principales à un problème. Il doit 1) être d'une relative complexité ; 2) mettre en jeu plusieurs compétences ; 3) être tel que la solution n'est

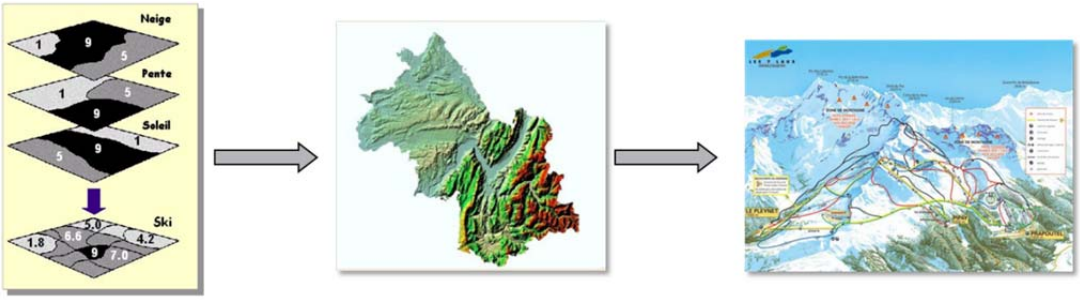
pas immédiatement disponible ; 4) exiger de la part de l'étudiant mobilisation et initiative et 5) se fonder sur une difficulté objective concernant le savoir à construire. De plus, les étudiants doivent avoir un moyen de contrôler eux-mêmes leurs résultats par des interactions avec le milieu mis à leur disposition. Le problème doit également permettre de mobiliser des invariants opératoires, tels que, par exemple, dans le cas d'une problématique en territoires de montagne, la connaissance des caractéristiques géologiques d'une région alpine (heuristiques acquises par la formation et l'expérience)

D'un point de vue thématique, le problème doit être conforme aux besoins de formation des étudiants, il doit toucher des domaines auxquels ils sont sensibilisés et en même temps leur permettre d'acquérir et de mettre en œuvre un savoir nouveau. Il doit pouvoir montrer un intérêt et une pertinence territoriale, (par exemple, dans le cas de Grenoble, le milieu alpin et la pratique des sports d'hiver). En nous appuyant sur ces éléments nous avons conçu un problème adapté à notre contexte, que nous avons formulé de la façon suivante :

« *Vous faites partie d'un bureau d'études et de conseil en aménagement et environnement. Vous êtes sollicité par le Conseil Général qui souhaite implanter un nouveau domaine skiable, dédié de préférence à l'entrainement des clubs de ski alpin. Pour cette raison le domaine doit comporter des pistes relativement raides à des altitudes pas trop élevées, pas nécessairement très longues, avec des espaces déboisés et la possibilité d'installer des réservoirs pour l'enneigement de culture* ».
Votre travail se décompose en deux étapes :

- *La première concerne la réponse à la consultation : vous devez élaborer un cahier des charges présentant les critères et la méthode retenue pour la détermination de l'emplacement de la station de ski.*

- *La seconde concerne la réalisation d'une carte d'aptitude montrant la localisation du meilleur site géographique pour la construction de la nouvelle station de ski.*



Procédure *Cartographie* *Résultats*

Les contraintes du problème sont d'ordre :

- géographique : il faut considérer d'une part l'accessibilité routière à la station pour les clubs de ski alpin, qui font le déplacement dans la journée, voir dans une demi-journée, d'autre part la proximité des agglomérations environnantes (Grenoble..) ;
- géomorphologique : l'inclinaison des pentes est un paramètre essentiel pour le tracé des pistes d'entrainement ; l'orientation est inversement importante d'une part pour la qualité de la neige, et d'autre part pour la température qui ne doit pas être top basse pour les enfants qui pratiquent l'activité ;
- hydrographique : un réseau hydrographique et des plans d'eau doivent être considérés pour les réservoirs des systèmes d'enneigement artificiel ;
- climatique : une couche neigeuse doit être naturellement assurée par les précipitations et la température qui sont dépendantes de l'altitude, des vents et des conditions microclimatiques locales.

Les principaux critères à traiter pour résoudre le problème avec l'analyse d'aptitude sont :

- la topographie (altitude, inclinaison des pentes, orientations, crêtes et creux) ;
- la géologie (formations, affleurements, quaternaire, orientation des couches..) ;
- l'hydrogéologie (configuration des bassins versants, réseau hydro local, érosion,..) ;
- les risques (avalanches, éboulements..) ;
- l'occupation du sol (bâti, végétation, ..) ;
- le climat (précipitations, ensoleillement, T°) ;
- l'impact environnemental ;
- l'accessibilité (coût de distance par rapport à une agglomération, aires de chalandise, bassins d'activité..) ;
- les situations législatives (acquisitions foncières, normes environnementales, ..).

Le problème fait partie intégrante de la situation créée par l'enseignant; il doit pouvoir être décrit par des variables de la situation. Les variables didactiques sont des paramètres de la situation qui peuvent prendre plusieurs « valeurs » dont la variation est susceptible de modifier le processus de résolution que les élèves vont adopter. Ce sont des variables

didactiques dans la mesure où en agissant sur elles, on pourra provoquer des adaptations et des régulations (Piaget, 1963) : des apprentissages. Dans notre cas, le problème posé aux étudiants consiste à réaliser une carte d'aptitude permettant d'identifier des sites potentiels pour l'implantation d'une station de ski. Les principales variables que nous avons définies sont indiquées en Tableau 15. L'ensemble des variables agissent sur la résolution du problème à différents niveaux : la définition des critères, la méthode de calcul, l'analyse visuelle pour choisir le site.

Variable	Valeurs
Type d'analyse	Multicritères, booléenne, statistique, requêtes..
Type d'expertise	Géologique, ingénierie de montagne, direction des stations, collectivité
Type de logiciel	ArcGIs (MapInfo, Idrisi, QGIS..)
Objectif	Recherche de sites aptes à .. , à risque, observations, simulations
Exploitation	Communication, prise de décision
Format des données Accessibilité aux données	Vecteurs, rasters, tableaux Disponibles gratuitement en interne ou dans les institutions (IGN, BRGM)
Type de milieu	Naturel ou anthropique (rural, urbain)
Taille du milieu	Très vaste, moyen, petit (évaluer en hectares ou en km de pistes)
Type de structure	Remontées mécaniques, pistes, retenues d'eau, infrastructures, urbanisation..
Type de public	Niveau des usagers (tous le monde, débutant, avancé, expert)

Tableau 15 *Liste des variables didactique possibles dans notre problème : en vert celles retenues.*

2.2.4 Le 'bon problème' à poser

Le choix des variables didactiques soulève la question du « bon problème à poser». Dans la perspective d'atteindre un des buts principaux de notre situation pédagogique, qui est la mobilisation de stratégies d'analyses spatiales et visuelles des étudiants, nous devons porter une certaine attention aux valeurs des variables. En effet, la variation de ces valeurs a un

impact sur le résultat cartographique : on peut obtenir une carte d'aptitude pour l'implantation d'une station de ski, facilement lisible et peu sélective qui n'incite pas l'analyse visuelle, comme on peut obtenir une carte bien plus complexe, mais qui force l'analyse. Nous démontrons ces propos ci-après. Nous avons créé deux situations : nous avons fixé les valeurs de trois variables prédominantes pour créer une première situation (A) qui s'avère ne pas stimuler les stratégies d'analyse visuelle chez les étudiants (observation au cours d'une expérience pilote). Nous avons ensuite créé une deuxième situation (B) avec des valeurs plus ajustées à la spécificité géomorphologique de la région (zone alpine, massifs cristallins très escarpés et hauts plateaux en altitude) afin d'inciter une lecture plus sélective.

Valeurs des variables didactiques pour la Situation A :
- type de milieu : un domaine skiable en haute altitude
- type de structure : des pistes larges et très faciles
- type de public : familial.

Un exemple de solution d'étudiants (Tableau 16) montre les valeurs suivantes et la cartographie obtenue :

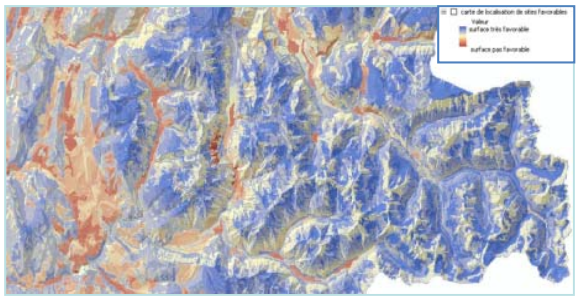
Critères-Variable	Valeurs	Carte d'aptitude résultante
Altitude	> 2000 m	
Inclinaison de pentes	15°-25°	
Végétation	clairsemée	

Tableau 16 *Exemple de solution de la Situation A réalisée par les étudiants*

Pour la Situation B, les valeurs des trois variables didactiques sont : un domaine skiable à moyenne altitude, avec des pistes courtes et raides pour un public de clubs de ski alpin.

Un exemple de résolution d'étudiants (Tableau 17) montre les valeurs suivantes et la cartographie obtenue :

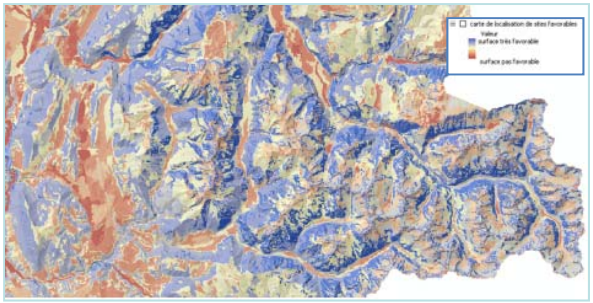
Critères	Valeurs	Carte d'aptitude résultante
Altitude	< 1500 et 2000 >	
Inclinaison de pentes	40°- 50°	
Végétation	forêt	

Tableau 17 *Exemple de solution de la Situation B proposée par les étudiants*

Nous avons analysé les stratégies de contrôle visuel des étudiants lors de la réalisation de cette carte (Balzarini, *et al.* 2012). En nous appuyant sur la littérature relative aux variables visuelles (Bertin, 1967/83) et aux concepts de fonctionnement perceptuel (Fabrikant, 2005) ainsi qu'aux descripteurs des tâches visuelles (MacEachren et M.Kraak, 2001), nous avons fait les constatations suivantes.

Dans la Situation A, au stade de la reconnaissance ou identification des objets et des formes, si la variable visuelle « couleur » (teinte et ton) est unanimement utilisée par les étudiants, les attributs géométriques - forme et taille de l'objet géographique - correspondant ici à la zone, n'ont pas été considérés. Dans cet exemple, les zones les plus favorables, en bleu foncé, sont très étendues : en se limitant à la prédominance du bleu foncé (teinte et ton), les étudiants ont cru pouvoir localiser plusieurs sites et répondre au problème. Au stade « analytique », lorsqu' il s'agit de donner du sens aux zones bleues foncées, d'identifier des corrélations ou des conflits, les surfaces favorables sont tellement étendues que les étudiants n'ont pas réussi à récapituler et à mettre en relation les zones favorables intégrant les combinaisons des critères et la topographie. Les étudiants n'arrivent plus à retrouver, dans le résultat visuel, tout ce qu'ils ont calculé via les techniques d'ASMC. La carte ne leur a pas été utile pour décider et justifier leur choix.

Dans la Situation B, du fait de la nature de la région, le résultat de l'ASMC a donné des cartes (Tableau 17) où les zones les plus favorables ont des petites surfaces, avec des limites beaucoup plus segmentées et irrégulières. L'identification des objets et des formes a été plus difficile pour les étudiants, mais ils ont mobilisé plus de stratégies : ils ont eu recours aux attributs 'taille et forme' des zones de couleur favorable pour identifier des surfaces continues aptes à répondre au problème. Ceci a eu pour conséquence de faciliter la reconnaissance des

patterns et leur connexion au monde réel. Les patterns représentant la combinaison des critères sont plus réduits et il a été cognitivement plus facile de découvrir des corrélations ou des conflits (par ex. surfaces favorables sur des versants mal exposés). Cette carte leur a permis de prendre des décisions argumentées.

Ce cas d'étude alerte sur la pertinence du problème posé et de ses variables didactiques. Dans la Situation A bien que les valeurs des variables soient théoriquement cohérentes, elles se sont révélées inefficaces pour une analyse sélective d'aptitude, dans un contexte géomorphologique régional où les faibles pentes sont très répandues en haute altitude. La combinaison inadéquate des variables didactiques et d'autres paramètres (comme la réalité géomorphologique régionale) a amené à la conception d'un problème qui ne provoque pas des apprentissages.

Forte de cette expérience, nous avons défini des variables du problème (voir Tableau 14) de notre module expérimental qui amènent, de façon générale, à la réalisation de cartes d'aptitude sélectives.

2.2.5 Les ressources

Un choix important dans notre démarche de conception didactique et expérimentale a été celui de fournir aux étudiants les ressources nécessaires à la résolution du problème. Les ressources que nous fournissons aux étudiants sont essentiellement de deux types : les données géographiques de référence et les supports documentaires.

Les données géographiques de base nécessaires à la résolution du problème sont:

- le Modèle Numérique de Terrain, format GRID (ESRI) 1 canal, taille de la cellule (X,Y) 50, 0 et 49,9 (pas sur terre de 50 m), en système de projections géographiques Lambert II Carto, Méridien de Paris ;
- les cartes géologiques du BRGM en format vectoriel et matriciel ;
- les données vectorielles de la BD038 TOPO de l'IGN, 2008 comprenant le réseau routier, les voies ferrées, les transports d'énergie, l'hydrographie, le bâti, la végétation, l'orographie, les zones d'activité et toponymes ; en système de projections géographiques en RGF93_Lambert_93 ;

- les données Corine Land Cover en format vectoriel, polygones, en système de projections géographiques NTF_Lambert_II_étendu

Ces données sont fournies dans un dossier numérique que les étudiants téléchargent lors de la première séance.

Les données sur les précipitations, les températures, les risques naturels et les situations législatives sont à l'initiative des étudiants : ils peuvent les trouver sur le Web.

Les supports documentaires sont:

- thématiques ; des rapports d'étude sur la mise en œuvre d'approche multicritères pour des problématiques de montagne ; des documents de synthèse sur les normes prévues pour l'implémentation de stations de ski ;
- méthodologiques des articles de recherche concernent l'approche multicritère et le rôle des SIG dans différentes problématiques environnementales de supports de cours de l'enseignant présentant les concepts et notions fondamentales des SIG, ainsi que la prise en main du logiciel utilisé ; les tutoriels du logiciel (ArcGIS).

L'ensemble de ces ressources est mis à disposition des étudiants, via un espace numérique de travail sur la plateforme de ressources pédagogiques de l'université (DOKEOS) qui permet la gestion des ressources numériques, le dépôt et retrait des travaux des étudiants. La Figure 30 illustre l'environnement des ressources de la plateforme DOKEOS.

Figure 30 *Captures d'écran de l'espace ressources sur la plateforme DOKEOS*

Le Logiciel SIG est ArcGIS V. 10.1. Il est mis à disposition des étudiants dans les salles informatiques des UFR et distribué en Licence flottante (ESRI) à tous les étudiants.

2.2.6 L'architecture et l'organisation de l'UE

Le problème et ses variables didactiques, les ressources et les objectifs d'apprentissage sont organisés dans le respect des principes de l'APP et des contraintes pédagogiques académiques. Tous ces éléments contribuent à l'architecture du module, que nous illustrons dans sa globalité avec le Tableau 18.

L'architecture générale du module indique l'enchainement des séances, le sujet de chaque sénace (titre), les modalités (tuteur, groupe, binôme..), la tâche principale à réaliser et les OA.

Séance	***Principaux Objectifs d'Apprentissage***	**Modalités**
1. Le Problème	S'approprier du problème, même si on ne connait pas précisément les méthodes.	
2. Le Cahier des Charges : procédure et critères	Extraire et synthétiser les infos nécessaires Lister tous les critères communs et « optimaux » Décliner chaque critère en plusieurs indicateurs	

3. Les données	Identifier les données utiles à l'analyse, définir les spécificités(SIG). Définir pour chaque indicateur - ce qu'on mesure - le type de donnée - le format Gérer la visualisation et la symbologie des données en format vecteur, raster, table et table attributaire.	
4. Les couches-critères	Cartographier les valeurs pour chaque indicateur ; puis faire éventuellement une nouvelle couche. Mettre toutes les données au même format, même système et à la même résolution.	
5. Le classement des données	Etablir le nombre de classes le plus pertinent pour le problème donné. Justifier le choix d'une méthode Réaliser une carte thématique univariée.	
6. Méthodes d'analyse multicritère et contrôle	Evaluer « mathématiquement » l'importance de chaque critère par rapport aux autres. Affecter une importance relative à chaque indicateur à l'intérieur d'une couche- critère. Choisir la méthode d'analyse spatiale multicritère appropriée au problème donné.	
7. La décision	Analyser les caractéristiques des classes obtenues dans la carte finale Comparer les résultats (créer des diagrammes de statistiques des cellules, comparer l'étendue, les limites, la continuité des classes). Etre critique par rapport aux résultats obtenus	
8. Finalisation et synthèse	Représenter logiquement le processus d'analyse et automatiser les traitements. Rédiger un document, supporté par la carte finale.	
9. La présentation du projet	Justifier le choix d'un résultat/d'une carte parmi d'autres, par rapport aux - contraintes de départ - compromis effectués - objectifs de réalisation	

Tableau 17 *Architecture générale du module*

		GO!		
Cours de restructuration	*Démo ArcGIS*	*Travail en groupe*	*Travail en binôme*	*Présentations*

Tableau 18 *Légende de l'Architecture générale du module*

Les modules intégraux de l'UE pour les étudiants géologues et pour les étudiants ingénieurs sont consultables en Annexes V.

Nous disposions de 18 heures de cours organisées en 6 séances de 3h (x2) hebdomadaires pour les géologues, et en 9 séances de 2h hebdomadaires sur 9 semaines pour les ingénieurs.

Chaque séance était organisée selon le même schéma : une première période ou les étudiants, repartis en groupes, analysent et définissent la (les) tâche(s) ; une deuxième période où ils cherchent, individuellement, et découvrent les informations nécessaires à la résolution de la tâche ; une troisième période où ils exposent au groupe les connaissances acquises et synthétisent les besoins pour la séance suivante. A ce stade, ils préparent les questions à soumettre au tuteur pour le cours de restructuration (« just on time teaching » manner). Ces cours sont organisés après que les étudiants aient déjà une première représentation mentale des notions abordées. Leur particularité est que, face à un tel public, l'enseignant peut focaliser son intervention sur la synthèse en mettant en évidence la structure et les liens entre les concepts. La Figure 31 schématise l'agencement des séances (T = Travail).

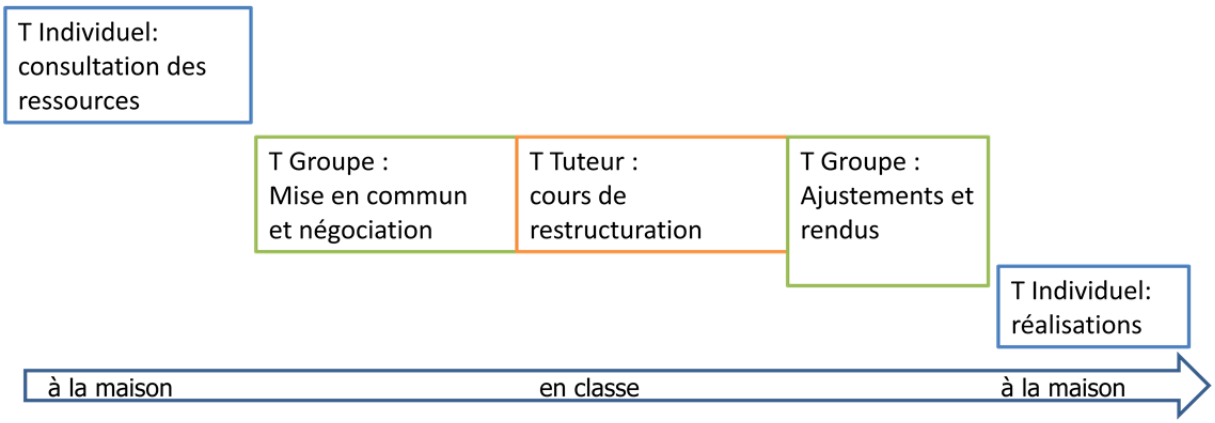


Figure 31 *Schéma de l'agencement des séances du module en APP*

Le planning est donc réparti selon des moments de classe qui comportent des discussions en groupe, des mises en commun, des questionnements, des productions, ainsi que des moments de travail personnel et/ou en binôme. Le travail de restitution demandé peut prendre différentes formes comme la lecture d'article, l'appropriation de supports de cours, la réalisation de synthèses et la production de documents spécifiques. Dans notre cas, le travail de restitution correspond aux livrables.

2.2.7 Les livrables et les évaluations

Les livrables ont un double objectif: d'une part fournir un support tangible de notes, listes, schémas aux étudiants à réinvestir pour la préparation de la présentation finale du projet, et d'autre part constituer des éléments complémentaires aux analyses méthodologiques conduites par les chercheurs. Les productions que les étudiants doivent remettre au tuteur sont :

Pour la séance 2 « Les critères » :

1. Un Cahier des Charges (Cdc) comprenant un schéma de la procédure et un arbre des concepts à mobiliser dans l'analyse. Un modèle de Cdc est fourni et les étudiants ont une semaine pour le concrétiser. Le Cdc aide l'équipe de recherche à identifier le niveau des étudiants en termes de gestion et planification d'un projet environnemental.

Pour la séance 3 « Les données » :

1. Une liste des critères et des facteurs. La liste doit préciser pour chaque critère: les raisons qui le lient à la problématique et les incidences sur le terrain. Le support est libre et les étudiants ont une semaine pour la rendre au tuteur. Cette liste aide les tuteurs (et les chercheurs) à identifier le niveau des étudiants dans le domaine thématique.
2. Un tableau de correspondances entre critères, données et unités de mesure. Un modèle de tableau à compléter est fourni aux étudiants : ils doivent indiquer pour chaque critère quelle est la donnée correspondant, son(es) format(s) et son unité de mesure. A travers ce tableau, les tuteurs évaluent l'exactitude des correspondances, la typologie des formats cités, la typologie des unités de mesure citées. Le tableau aide les tuteurs (et les chercheurs) à identifier le niveau de connaissances des étudiants en information géographique.

Pour la séance 6 « L'attribution des poids aux critères et l'agrégation des données » :

1. Une grille pour les commentaires des cartes d'aptitude réalisées. Afin de récapituler et organiser tous les algorithmes testés dans cette séance (et par conséquent, toutes les cartes produites), une grille est fournie aux étudiants : ils doivent la compléter en renseignant la formule d'agrégation (la somme pondérée) utilisée, les fichiers ArcGIS utilisés et les commentaires sur l'analyse pour chaque carte d'aptitude résultant. Les étudiants ont toute la séance pour compléter la grille. La grille est particulièrement utile à notre recherche pour vérifier les analyses effectuées sur les cartes et pour retrouver la correspondance entre les sommes pondérées et les cartes citées dans les interactions verbales.

Pour la séance 7 « Le choix » :

1. Un tableau comparatif pour le choix de la « meilleure » carte et du (des) « meilleur(s) » site(s). Le modèle du tableau est fourni aux étudiants : parmi toutes les cartes produites, les étudiants doivent en choisir 5, les lister par ordre de préférence, et argumenter leur choix. Les critères de choix formalisés dans le tableau correspondent aux arguments et aux interactions verbales du groupe dans cette phase de concertation. Les étudiants ont toute la séance pour compléter le tableau. Ce support s'est révélé particulièrement intéressant pour les étudiants, car il leur a constitué une base concrète d'argumentation pour la présentation du projet.

Pour la séance 9 « La présentation du projet » :

1. La carte d'aptitude finale, présentée selon les principes de mise en page cartographique : image cartographique, légende, rose des vents, échelle, titre et auteurs.
2. Une présentation sur support Power Point (ou similaire) pour chaque groupe. Une grille de présentation a été fournie aux étudiants : la procédure générale, les traitements des données, les argumentations et les limites. Aussi un temps de parole individuel est imposé pour que tous les étudiants puissent s'exprimer.

Tous les originaux des livrables sont consultables en Annexes V.

Deux évaluations ont été planifiées. Une évaluation par groupe : chaque groupe présente à l'ensemble des étudiants, les résultats obtenus et la méthode de résolution du problème utilisée (10 mn de présentation, suivies de 10 mn de discussion). Une mise à l'épreuve

individuelle correspondant à un exercice d'analyse d'une carte de synthèse relative à un problème similaire à celui sur lequel les étudiants ont travaillé.

2.2.8 Les supports du module

Les contenus et l'organisation du module se formalisent avec deux types de supports : un Environnement Numérique de Travail (ENT) la plateforme DOKEOS et un support-clé de l'APP: *le livret personnel* pour l'étudiant. Le premier permet l'accès en ligne aux feuilles de routes du module ainsi qu'aux ressources. Les feuilles de route, organisées selon l'architecture du module et les OA, indiquent, au tuteur et aux étudiants (en groupe et en individuel) les tâches à accomplir et les ressources à utiliser.

Le deuxième, véritable guide papier d'activité, comprend une description des objectifs de l'unité, les références, l'énoncé de la tâche à réaliser, toute autre information utile à son travail individuel ou coopératif. Une capture d'écran du module pour les géologues est présentée en Figure 32 et un extrait du livret est présenté en Figure 33. L'intégralité du livret est consultable en Annexe V.

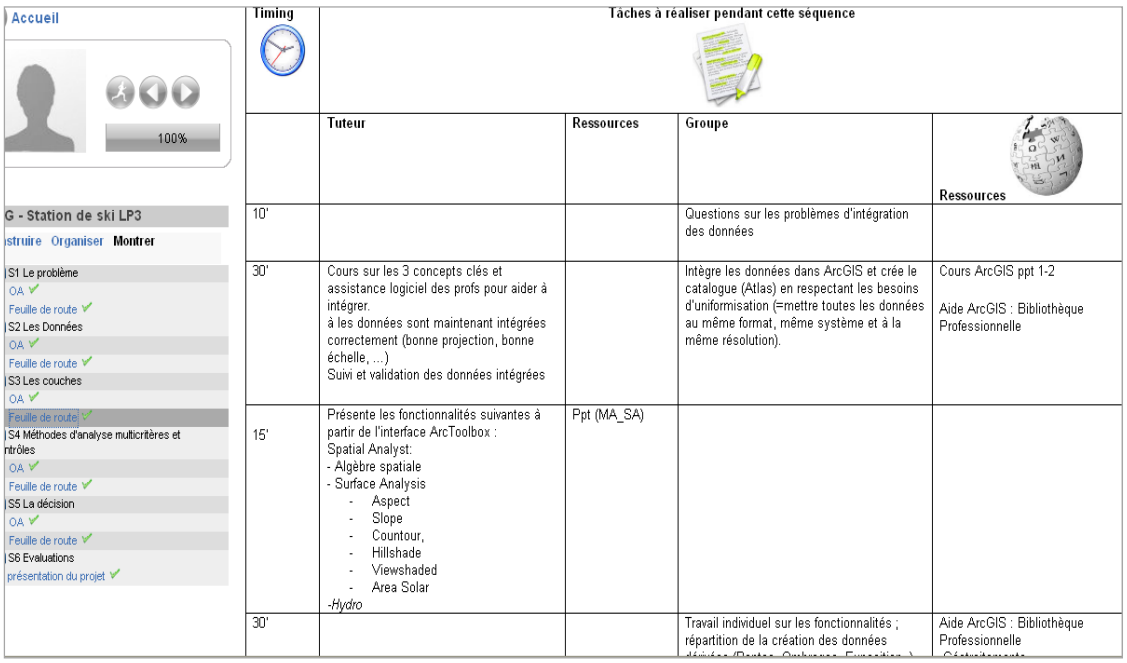


Figure 32 *Capture d'écran d'une séance du module sur la plateforme DOKEOS*

Mardi 27 Mars	Séance 3	Traduire les critères en variables mesurables Prise en main d'Arcgis	2 h

Objectifs de la séance :

- Identifier les données géographiques nécessaires à la résolution du problème.
- Prise en main du logiciel SIG

Durée	Tâches à réaliser durant la séance
1 10 mn	**Commentaires sur les cahiers des charges**
2 30 min	**Travail en groupe (négociation)** ▪ Traduire les critères en variables mesurables et établir la liste des données géographiques nécessaires à la résolution du problème ▪ Formulation des questions
2 30 min	**Cours de restructuration (30 mn)** ▪ Réponses aux questions ▪ Représentation des données géographiques dans les SIG.
3 20 mn	**Travail en groupe** ▪ Arrêter la liste des données géographiques à retenir
4 25 mn	**Cours – Démonstration logiciel ARCGIS** ▪ Prise en main d'ARCGIS.
5 5 mn	**Prendre connaissance des consignes pour la séance 4**

Mise en commun du travail individuel

Organiser le groupe

Construire une solution

Favoriser l'expression de chacun

Consignes pour la prochaine séance 4 :

- Télécharger les données géographiques sur Dokéos.
- Commencer à intégrer les données dans ArcGIS.
- Visualiser les données et pour chaque jeu de données élaborer une carte en changeant la symbologie

Figure 33 *Extrait du livret de l'étudiant. Détail d'une Séance*

2. 3 Etude expérimentale : les dispositifs de recueil des données#

Les étudiants ont été observés en situation d'apprentissage, pendant leur activité de résolution de problème, sur le module que nous venons de décrire[13]..

Afin de pouvoir répondre à notre première question de recherche (voir Chapitre IV) qui est totalement exploratoire, nous avons d'abord cherché à obtenir le plus large panel possible d'informations. Pour cela, tous les éléments d'expressions et de productions des sujets ont été récoltés, au moyen de différents supports documentaires et audiovisuels. Chaque moyen est conçu sur la base d'hypothèses de travail, a un objectif et permet d'évaluer les indicateurs établi pour chaque observation. Trois types de données ont été recueillis :

[13] Ils ont été informés du cadre expérimental dans lequel leur cours avait lieu et ils ont été invités à signer une lettre d'autorisation à l'usage des images vidéo et des données qu'ils produisent

1. les trois *questionnaires* à réponses ouvertes ;
2. *les données verbales ;*
3. *les productions cartographiques.*

1. Les trois questionnaires ont été soumis aux étudiants à trois moments cruciaux de la procédure de cartographie d'aptitude et aux experts à la fin de leur activité contrôlée. Ils permettent de recueillir les idées des sujets juste après l'action, de façon à ce qu'ils se basent sur ce qu'ils viennent de faire. Le recueil est individuel pour avoir un large panel de réponses.

L'objectif direct des questionnaires était de mettre en évidence des thèmes, des familles de réponses, représentatives des contenus conceptuels mobilisés par les sujets. L'objectif indirect des questionnaires était de fournir une base de réflexion sur les catégories conceptuelles, extraites, dans un deuxième temps, des données verbales. Pour répondre à ces objectifs, les questionnaires ont été conçus selon deux approches d'enquête. La première donne l'orientation globale des questions et, s'appuyant sur le modèle descriptif de l'activité de Vergnaud, permet de différencier les concepts des modes opératoires, ou les stratégies des anticipations. La seconde, plus approfondie, se basant sur les hypothèses de recherche permet de préciser la formulation des questions.

Le premier questionnaire (Q1) interroge les étudiants sur la méthode de reclassement statistique employée. Ce questionnaire est proposé juste après qu'ils aient fait ce travail sur les données. La tâche de reclassement et standardisation de la donnée est décrite selon les composants du schème d'activité de Vergnaud (voir Chapitre III); les composants peuvent être exposés sous forme de questionnement :

- au niveau des invariants opératoires : quels concepts-en-acte sont appelés pour effectuer la discrétisation de la donnée géographique ?
- au niveau des règles d'action : quelle méthode de discrétisation est choisie ?
- au niveau des stratégies : quels arguments pour justifier de cette méthode ?
- au niveau des buts et anticipations : quelles explications pour le choix de ce nombre de classes ?

Les hypothèses émises sur cette tâche, ont été reformulées afin de constituer les questions soumises aux sujets. De la totalité des 11 questions du Q1, le Tableau 19 présente les questions les plus significatives, retenues pour l'analyse quantitative. Le questionnaire complet est consultable en Annexe V.

Hypothèse	Questions
Les étudiants ne savent pas réinvestir leurs connaissances en statistiques pour classer la donnée géographique.	1.Pourquoi devez-vous mettre vos données en classe ?
La méthode donnée par défaut (manuelle) par le logiciel est prévalent; les autres ne sont pas mentionnées.	2. Quelle(s) méthode(s) de classement avez-vous utilisé ?
Les propriétés de la méthode employée ne sont pas précisées	3. Pourquoi avez-vous utilisé cette méthode/ces méthodes ?
les étudiants décident d'un nombre de classes et des seuils au hasard	4. Vous avez défini un nombre de classes, lequel et pourquoi ?

Tableau 19 *Questions du Questionnaire 1*

Le second questionnaire (Q2) interroge les sujets sur la méthode d'analyse multicritère et sur l'affectation des poids aux critères qu'ils ont adopté.

Cette tâche est décrite selon les composants du schème d'activité de Vergnaud (voir Chapitre III) ; les composants peuvent être exposés sous forme de questionnement :

- au niveau des invariants opératoires : quels concepts sont mobilisés pour formaliser une moyenne pondérée ?
- au niveau des règles d'action : quelle technique est choisie ?
- au niveau des stratégies : quelle méthode pour attribuer les poids ?
- au niveau des buts et anticipations : quelles conséquences sont à préconiser sur la carte suite aux changements des poids ?

Les hypothèses émises sur cette tâche, ont été reformulées afin de constituer les questions soumises aux sujets. De la totalité des 9 le Tableau 20 présente les questions les plus significatives, retenues pour l'analyse quantitative. Le questionnaire complet est consultable en Annexe V.

Hypothèse	Questions
Les étudiants n'ont pas la capacité de mathématiser l'information géographique	2. Ecrivez la formule utilisée dans la technique que vous avez choisie ?
Les étudiants n'arrivent pas à contrôler leurs résultats sur la carte	6. Quel est l'impact d'un changement des importances relatives sur le résultat final ? Pourquoi ?
Les étudiants valident leur carte sur la base de l'étendue des zones	7. Qu'est-ce que vous cherchez à voir en premier dans votre carte résultat pour la valider ? donnez des exemples…
Les étudiants choisissent leurs cartes sur la base de la combinaison des poids.	9. Parmi toutes les cartes réalisées, vous devez en choisir une, quels arguments allez-vous prendre en compte pour faire ce choix ?

Tableau 20 *Questions du Questionnaire 2*

Le Q3 évalue les étudiants sur le contrôle visuel à partir de cartes construites et censées répondre à un problème similaire à celui qu'ils ont eu à résoudre précédemment, mais sur des données différentes. Il est accompagné par les images des cartes à analyser (voir Annexes V). Ce questionnaire intervient donc tout à la fin du module. L'approche pour la conception des questions n'est pas basée sur les hypothèses comme pour les précédents, mais il est basé sur une formalisation des descripteurs visuels d'une carte, issue de Kraak (2010). Cette tâche est décrite selon les composants du schème d'activité de Vergnaud (voir Chap.III) les composants peuvent être exposés sous forme de questionnement :

- au niveau des invariants opératoires : quelles connaissances on mobilise pour évaluer une carte de synthèse ?
- au niveau des stratégies : quels objets de la carte on reconnaît ?
- au niveau des buts et anticipations : quelles relations entre les objets on identifie ?

De la totalité des 11 questions du Q3, le tableau 21 présente les questions les plus significatives, retenues pour l'analyse quantitative (voir Chapitre VI). Le questionnaire complet est consultable en Annexe V.

Descripteurs visuels	Questions
Identifier les formes, les objets	2. Quels types de formes identifiez-vous dans les surfaces de couleurs verte et marron? Décrivez-les en quelques mots (taille, forme, contours..),
Récapituler les patterns, découvrir les correlations et les conflits	8. Si vous deviez proposer la carte de l'Image 7 à un décideur, pourriez-vous lui affirmer que les zones vertes sont toutes favorables ? expliquez pourquoi
Récapituler les patterns, découvrir les correlations et les conflits	9. Si vous deviez proposer la carte de l'Image 6 un décideur, pourriez-vous confirmer que les zones vertes sont toutes favorables ? expliquez pourquoi
Choisir	10. Comparer les trois cartes : laquelle est le plus apte à répondre au problème ? Pourquoi ?
Préconiser	11. Une fois la carte choisie, identifiez un ou plusieurs sites favorables à l'implémentation d'un vignoble

Tableau 21 *Questions du Questionnaire 3*

2. Les données verbales sont constituées par les interactions verbales des étudiants pendant les étapes clés de la procédure de résolution. Elles sont obtenues au moyen d'enregistrements vidéo et audio : des enregistreurs sont installés près de tous les groupes lors des échanges qui ont lieu aux moments des mises en commun des tâches effectuées préalablement en binômes ; des caméras sont installées près de quelques binômes et quelques groupes pour visualiser l'écran (cartes et environnement SIG) et les pointages sur l'écran. Les données sont obtenues selon des modalités 'd'explanation protocol' (Chi, 1997), où les participants discutent librement entre eux, en expliquant leurs choix, leurs doutes, leurs erreurs (quand ils les diagnostiquent). Les modalités sont aussi collectives, dans la mesure où c'est une expression de groupe que nous recueillons. Cette dernière modalité est en partie imposée par l'organisation du module en APP, qui prévoit de faire travailler les étudiants en groupe. Néanmoins, elle se justifie sur le plan pédagogique par la qualité des apprentissages, qui est améliorée grâce à la gestion des conflits (Bourgeois et Nizet, 1997). Aussi, sur le plan cognitif, « le groupe enrichit le processus de résolution, parce qu'il explore un panel plus large d'alternatives et alimente plus d'hypothèses qu'un décideur individuel, aussi il stimule

la demande interpersonnelle d'explications, ce qui amène à la co-construction de la connaissance ». (Okada et Simon 1997, in Armstrong and Densham, 2008).

3. Les Productions cartographiques. Il s'agit des toutes les cartes classées (une carte par critère) et des cartes d'aptitude réalisées au moyen des sommes pondérées. Ces productions cartographiques sont accompagnées par des fiches (grille descriptives des cartes, tableaux de critères, etc..) qui ont également été recueillies. Les cartes, évaluées selon des indicateurs de réussite (voir Chapitre VI), représentent le résultat des procédures de résolution collective appliquées par les étudiants : elles nous permettent de faire le lien entre des stratégies et des résultats.

L'approfondissement sur la démarche méthodologique d'analyse des données est présenté dans le Chapitre VI.

Pour chaque séance observée, nous présentons ci-après uniquement les moyens matériels déployés et leurs spécificités.

Pour la séance 5 « Le reclassement des données » :

1. *Les enregistrements audio* pendant la phase de négociation du nombre de classes et de la méthode de discrétisation des données géographiques. Le support est un fichier audio et la durée de l'enregistrement et d'environ 30 minutes. Les enregistrements ont été repartis de la façon suivantes: sur les 8 groupes et 4 binômes d'étudiants ingénieurs, sur les 3 groupes pour les étudiants géologues;
2. *Les enregistrements vidéo*. Le support est un fichier vidéo et la durée est d'environ 45 minutes. Les enregistrements ont été effectués sur 2 binômes d'étudiants géologues.
3. *Le Questionnaire (Q1).* Ce questionnaire à questions ouvertes interroge individuellement les étudiants sur la méthode de reclassement statistique choisie. Le support est un fichier texte, numérique et papier. La durée du questionnaire est d'environ 20 minutes. Les étudiants l'effectuent en fin de séance.

Pour la séance 6 « L'attribution des poids aux critères et l'agrégation des données » :

1. *Les enregistrements audio* sur la phase de décision des importances à attribuer aux critères, ainsi que sur l'analyse visuelle des cartes résultant des sommes pondérées. Le support est un fichier audio. La durée est d'environ 1 heure. Les enregistrements ont été

repartis de la façon suivantes : sur 3 binômes et 3 trinômes d'étudiants géologues; sur les 8 groupes étudiants ingénieurs.

2. *Le Questionnaire (Q2).* Ce Questionnaire à questions ouvertes interroge individuellement les étudiants sur la méthode d'analyse multicritère choisie et sur la démarche d'affectation des poids aux critères. Le support est un fichier texte numérique et papier. La durée du questionnaire est d'environ 20 minutes. Les étudiants l'effectuent en fin de séance.

Pour la séance 7 « Le choix » :

1. *Les enregistrements vidéo et audio* sur la phase de choix de la carte finale et du site préconisé. Les supports sont respectivement un fichier vidéo et un fichier audio. La durée est de 1h30. L'enregistrement vidéo a concerné 1 groupe d'étudiants géologues ; l'enregistrement vidéo a concerné en les 3 groupes d'étudiants géologues et les 8 groupes étudiants ingénieurs.
2. *Carte finale* de synthèse (d'aptitude).

Pour la séance 9 « La présentation du projet » :

1. *Le Questionnaire (Q3).* Ce questionnaire à questions ouvertes correspond à la mise à l'épreuve individuelle pour l'évaluation finale. Il s'agit d'une mise à l'épreuve des capacités analytiques acquises à l'issue de l'UE : les étudiants doivent répondre à la critique et à l'analyse de cartes d'aptitude qui présentent la solution d'un problème de localisation de site (implantation d'un vignoble) similaire à celui travaillé en cours, mais différent en termes de types de critères. Le support est un fichier texte numérique et papier. La durée est 1 heure.
2. *Les Présentations des projets* d'implémentation de la station de ski. Le support est un fichier power point. La durée est de 10-15 minutes par groupe. Chaque groupe présente son projet à la classe pendant 5 minutes, puis répond aux questions des tuteurs et éventuellement des autres étudiants pendant 5-10 minutes.

3. L'expérimentation avec les experts

L'observation des chemins empruntés par l'expert lors de l'exécution de la tâche fournit un aperçu incomparable sur le raisonnement. L'évaluation des processus de raisonnement et de stratégies de résolution de problème peut être obtenue de l'analyse des « tâches artificielles ».

Ces tâches demandent à l'expert de réaliser une activité préconçue, souvent en conjonction avec un enregistrement audio-visuel en mode Think-Aloud (Petcovic et Libarkin, 2007) et Explanation Protocol (Chi, 1997). L'objectif de cette expérimentation est de capturer les éléments cognitifs dénotant des stratégies, des réflexions et des contrôles qui sont propres à l'expertise, plutôt que les compétences techniques et thématiques.

Si, chez les étudiants, nous avions identifié, au cours d'analyses préliminaires, des points critiques dans la procédure et que, par conséquent, le recueil de données s'est focalisé sur ces phases délicates, chez les experts nous adoptons une démarche entièrement exploratoire et nous observons toute leur procédure.

A cet effet, un protocole expérimental a été mis en place pour les experts : il diffère de celui des étudiants en termes de modalités et non de contenu (les objectifs de réalisation sont identiques).

3.1 Les participants

Trois experts ont participé à notre expérimentation. Trois profils différents, mais avec des compétences complémentaires et représentatives du monde des sciences de l'information géographique, il s'agit de :

1. E1. Un Maître de conférences de l'Université de Grenoble, rattaché à l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Grenoble. Cet enseignant-chercheur, spécialiste de l'étude du cycle sismique et des méthodologies de la mesure des déformations du sol par techniques de télédétection (imagerie radar), intervient dans plusieurs enseignements dans l'unité de formation et de recherche PHITEM (Physique, Ingénierie, Terre, Environnement et Mécanique) de l'Université Joseph Fourier (Grenoble I). Il s'intéresse depuis longtemps à l'intégration des SIG dans les Géosciences, en tant qu'outil de support à la recherche et outil professionnel pour les bureaux d'études. Il maitrise et sait évaluer les spécificités de différents SIG, tels que Mapinfo, QGIS et ArcGIS. Son sens de la critique et de l'investigation apportent une approche scientifique à l'usage des SIG dans des problématiques environnementales.
2. E2. Un ingénieur Cartographe d'ESRI France-Cartosphère. La société se consacre depuis sa création au conseil et à l'assistance dans l'analyse des besoins en données localisées, à la distribution de l'ensemble de données géographiques (IGN, NavTeq

et TéléAtlas en France) aux prestations sur ces mêmes données, ainsi que à l'édition de produits à valeur ajoutée. Cet ingénieur agronome et cartographe issu de l'Université Paris I (Panthéon-Sorbonne), travaille chez ESRI France depuis 2008. Il est spécialisé en topographie, imagerie spatiale, photogrammétrie, télédétection, cartographie et systèmes d'information géographique, et maitrise parfaitement ArcGIS

3. E3. Un ingénieur d'affaire d'ESRI France, autrement dit consultant avant-vente. Les missions de cet ingénieur consistent à définir le cahier des charges et à assurer la supervision de la mise en place opérationnelle des projets SIG pour les clients. Ancienne formatrice et expert SIG chez le Gouvernement de la Nouvelle-Calédonie, cet ingénieur d'affaire a une formation de cartographe à l'Université d'Orléans. Ses compétences SIG ont évolué au sein d'ESRI France, où elle travaille depuis 2000 : de la cartographie à l'informatique, de la formation à la gestion de projet SIG, elle a une maitrise considérable de l'Information Géographique et des fonctionnalités d'analyse spatiale d'ArcGIS, qu'elle adapte aux multiples projets.

3.2 Le problème

L'énoncé du problème de localisation de site pour l'implémentation d'une station de ski, est exactement le même que celui soumis aux étudiants.

3.3 Les ressources

Les experts ont eu accès aux mêmes ressources documentaires mises à disposition des étudiants sur la plateforme DOKEOS. Néanmoins, c'est principalement le dossier des « données nécessaires à la résolution du problème » qui a été téléchargé. Contrairement aux étudiants, les experts n'ont pas eu besoin de prendre connaissance des livrables (productions des étudiants), car ils ne leur sont pas demandés ; seulement un schéma générique de la procédure de résolution leur a été fourni dans le but de faciliter les étapes techniques.

Le logiciel SIG est ArcGIS V. 10.1.

3.4 Les modalités

Les Experts ont été observés en activité sur leurs lieux de travail, seuls avec un chercheur, selon la méthode de la « tâche artificielle » : ils réalisent l'activité préconçue et verbalisent à voix haute leurs actions. Les observations ont eu lieu le 30 et 31 Aout et le 17 septembre 2012. La durée de l'expérimentation a été, pour chaque expert, d'environ 4 heures comportant environ 3 heures pour réaliser l'activité de cartographie, 30 minutes pour compléter un questionnaire à questions ouvertes et 30 minutes de débriefing avec les chercheurs.

Avant de commencer l'activité, le chercheur leur explique qu'ils sont bien dans l'action (et non dans le transfert de connaissances), ils sont libres de faire des erreurs, des allers-retours. Ils doivent s'exprimer à voix haute et expliquer/commenter leurs réflexions, leurs doutes ou certitudes, leurs actions et leurs pratiques. Concrètement, cette expérimentation peut se résumer par les phases suivantes :

- Remise du problème sur papier.
- Remise du dossier des données.
- Remise du schéma de la procédure sur papier.
- Création d'un dossier personnel, où stocker les données dérivées et les cartes produites, afin de pouvoir nous les transmettre.
- Démarrage d'ArcGIS et du projet.
- Démarrage de la caméra pour l'enregistrement vidéo, positionnée derrière l'expert de façon à capturer la voix, la gestualité vers l'écran et l'écran même de l'ordinateur.
- Arrêt de l'enregistrement vidéo à la fin du projet
- Remise du questionnaire à compléter et à rendre
- Débriefing entre chercheurs et experts

3.5 Le recueil des données.

Le protocole expérimentale chez les experts a permis de recueillir, pour chacun d'entre eux les données suivantes :

- Un enregistrement vidéo dont le support est un fichier vidéo d'environ 3 heures.
- Un questionnaire comprenant 15 questions à questions ouvertes. Ce questionnaire correspond à la synthèse des trois questionnaires (Q1, Q2 et Q3) soumis aux étudiants

à différents moments de l'expérimentation. Or, vu les temps réduits dont nous disposions avec les experts, nous avons conçu une version synthétique et condensée des trois questionnaires. La fonction du questionnaire est d'interroger les experts sur les mêmes points analysés par les étudiants : les choix des méthodes de classifications de la donnée géographique, d'agrégation et d'attribution de poids aux critères et d'analyse visuelle pour le choix de la carte d'aptitude finale. L'objectif du questionnaire est de pouvoir comparer les réponses des experts avec celles des étudiants.

- Un dossier des données créées, comprenant les couches classées, les tests des sommes pondérées et la carte d'aptitude finale.

L'expérimentation avec les experts a constitué un palier décisif dans notre recherche. Bien qu'ils ne fussent que trois, leur contribution nous a permis de placer notre recherche dans une perspective de comparaison expert-novice (Petcovic et Libarkin, 2007) ; aussi, elle nous a permis de sonder et de découvrir des mécanismes cognitifs (voir Chapitre VII) propres à une approche professionnelle de l'activité de cartographie d'aptitude avec des méthodes multicritères.

4. Synthèse

Afin de pouvoir répondre aux questions de recherche (voir Chapitre IV) un protocole expérimental permettant l'observation d'étudiants et d'experts en activité de cartographie d'aptitude avec des méthodes d'analyse spatiale multicritère a du être mise en place. L'objectif principal du protocole a été de permettre de recueillir des données brutes, représentatives des mécanismes de résolutions d'un problème cartographique. La conception et mise en œuvre du protocole se sont effectuées selon les deux contextes d'étude concernés : celui des étudiants et celui des experts. Pour les étudiants, le protocole expérimental a du correspondre à une situation d'apprentissage à la fois innovante, basée sur une pédagogie active qui met en avant une culture d'appropriation centrée sur l'étudiant (l'APP) et à la fois respectueuse des contraintes curriculaires. Pour les experts, le protocole a inclus la résolution, filmée, d'un problème de cartographie d'aptitude.

Pour les chercheurs, le protocole a permis l'articulation de tous les outils d'investigation (questionnaires, enregistrements audio et vidéo) nécessaires à extraire l'information cadrée par les questions de recherche, mais aussi à l'observation de phénomènes nouveaux.

CHAPITRE VI : L'ANALYSE DES DONNÉES

L'objet de ce chapitre est de justifier notre méthode d'analyse des données en nous appuyant sur les recommandations issues de la littérature. Les données provenant de notre expérimentation sont essentiellement de deux types : les données écrites et orales (verbales), obtenues de l'observation de l'activité via les enregistrements vidéo et audio des sujets, et les cartes réalisées par les sujets pendant l'activité. La nature différente des données comporte des approches analytiques différentes. Dans un premier temps, ce chapitre présente la méthodologie que nous avons choisie pour traiter les données verbales qui dans le domaine des sciences cognitives connaissent un nombre important de méthodes d'analyse, notamment qualitatives. Ensuite, afin de pouvoir caractériser la qualité des réalisations cartographiques, une grille d'analyse est proposée (Cauvin et Al., 2007). Des analyses croisées entre les processus cognitifs et les productions cartographiques sont proposées. Les analyses comparées entre experts et étudiants (Petcovic et Libarkin, 2007) sont annoncées en fin de chapitre.

Toutefois, la plus grande partie du chapitre est consacrée à l'analyse des données verbales, qui constituent le volume le plus important de nos données.

1. La méthode d'analyse des données verbales[14]#

Dans les sciences cognitives et les sciences de l'education, il y a eu un besoin croissant de collecter et analyser les « messy data ». Ces données concernent les explications verbales, les observations, les enregistrements vidéo et audio, aussi bien que les gestes. Le besoin de recueillir ces types de données est lié à l'étude des comportements et des performances dans un contexte d'activité. Par exemple, il semble de plus en plus évident que les performances des experts sont supportées par des aides extérieurs, tels que la prise de notes, les dessins ou les esquisses (Norman, 1988 in Chi 1997); il semble par conséquent nécessaire d'inclure dans le corpus de données à analyser non seulement les transcriptions verbales mais aussi les dessins, les gribouillages ou les gestes des experts pour capturer une compréhension complète

[14] Paragraphe correspondant à une synthèse, en traduction libre, de l'article 'Quantifyng Qualitative Analyses for Verbal Data : A Practical Guide', M.T.H. Chi, 1997, *The Journal of Learning Sciences, 6(3)*

de leur capacités (Norman, 1988 in Chi , 1997). Mais, les données de différentes natures doivent pouvoir être combinées et comparées. Or, la combinaison des méthodes d'analyse, surtout qualitative et quantitative est une démarche complexe à mettre en œuvre : elle prend beaucoup de temps, elle est subjective d'un point de vue de l'interprétation et restrictive d'un point de vue de l'applicabilité des protocoles. Une adéquation de différentes méthodes est proposée par Michelene T.H. Chi en 1997, qui présente un véritable guide à l'intégration d'analyses quantitatives et qualitatives pour les données verbales (écrites ou orale). La méthodologie de Chi est notre cadre méthodologique d'analyse. Une introduction à cette méthode est présentée ci-après, suite à une traduction libre d'extraits de l'article « Quantifying Qualitative Analyses for Verbal data : A Practical Guide » (The Journal of The Learning Sciences, 6(3), 1997). Les travaux de recherche de Chi (1972-2013) se situent dans le domaine de la représentation des connaissances expert-novice, l'expertise et la résolution de problèmes en physique et dans les géosciences. La littérature scientifique lui consacre environ 5000 citations, et ses articles ont, depuis une vingtaine d'années, une diffusion mondiale. La Géocognition s'empare également des démarches de Chi, notamment pour la description des représentations mentales de la connaissance géographique (Mark, Freska et Tverski, 1999). Dans le cas de notre recherche, ce choix méthodologique se justifie par l'approche exploratoire des connaissances, en situation d'apprentissage en comparaison avec l'expertise, qu'il engage.

L'analyse verbale est une méthodologie pour quantifier le codage subjectif ou qualitatif du contenu des phrases. Essentiellement, cette méthode permet, à travers le codage d'éléments verbaux (*verbatim*) propres à une idée, de concrétiser l'idée même, pour ensuite pouvoir en comptabiliser ou comparer les occurrences.

Le champ de recherche qui englobe un grand nombre de méthodes d'analyses verbales est celui de l'apprentissage. Deux objectifs sont visés par cette démarche : premièrement capturer la représentation d'une connaissance qu'un sujet peut avoir, et comment cette représentation se modifie avec l'acquisition ; deuxièmement, contraster la connaissance d'un expert avec celle d'un novice. La plupart des recherches dans ce domaine se sont intéressées à représenter une connaissance idéale relative à un problème donné, utilisant des techniques computationnelles sophistiquées et des moyens tels que les réseaux sémantique ou Bayesiens. Or, plutôt que chercher à représenter une connaissance idéale, l'objectif de cette méthode est de mettre en évidence quelles connaissances le sujet utilise pour résoudre un problème, qu'elles soient correctes ou pas. Pour mettre en évidence ce que le sujet connait, il est

nécessaire d'analyser non seulement le contenu des expressions verbales, mais aussi leur structuration. L'ensemble des propositions, concepts, objectifs, rôles et relations permettent de reconstituer une structure cognitive.

Le traitement le plus fréquent et systématique des données verbales est fait dans le contexte de la méthode du 'protocol analysis', comme exposé par Newell et Simon (1972). Bien que les deux méthodes partagent beaucoup de points en commun, Chi (1997) tient à souligner les différences qui se situent au niveau des consignes, du but, de l'analyse, de la validation et des conclusions. Face à un problème donné, les consignes du 'protocol analysis' demandent au sujet de verbaliser à voix haute (thinking-aloud) les informations qu'il obtient au fur et à mesure qu'il avance dans la résolution ; cette verbalisation décrit strictement, machinalement l'action conduite sans laisser de la place aux explications et justifications. Au contraire, les consignes de la 'verbal data analysis' demandent au sujet d'expliquer et rationaliser ce qu'il est en train de faire, au risque de modifier la performance qui peut justement être améliorée par l'auto-explication.

En ce qui concerne le but des deux analyses, les différences sont déterminantes : le 'protocol analysis' veut capturer le processus de résolution du problème, qui correspond à un ensemble de séquences de tâches (et sous-tâches) et d'opérateurs. Souvent, un modèle du processus est reconstitué minutieusement en amont, grâce à une analyse cognitive de l'activité et une comparaison entre le modèle et le parcours de résolution du sujet est effectuée, pour vérifier où les tâches et les opérateurs concordent. Inversement, la 'verbal data analysis' de Chi, reconstitue le chemin de résolution du sujet sans un modèle préalable de comparaison.

En termes d'analyses, les deux méthodes partagent plusieurs détails techniques, tels que la segmentation et le codage. Néanmoins, dans le 'protocol analysis' du fait qu'il définit à priori les états du problème et les opérateurs, l'analyse consiste à identifier dans le corpus textuel le vocabulaire correspondant à ces éléments. Dans la 'verbal data analysis' les référents ne sont pas connus : l'identification et la définition des référents, qui ont forcement lieu avant l'étude du vocabulaire, ajoute donc de la complexité à ce type d'analyse.

La validation de l'analyse est obtenue dans le 'protocol analysis' par le degré de correspondance entre la représentation de la résolution du problème du modèle et la représentation de la connaissance du sujet (séquences et les éléments du modèle et l'ensemble des séquences et éléments du sujets) ; seulement il n'est jamais clair dans quelle mesure le modèle peut être invalidé. Dans la 'verbal data analysis', la validation est souvent obtenue à

travers des calculs statistiques sur les données codées, dont les résultats supportent (ou pas) une hypothèse ou répondent à des questions de recherche.

Aussi, les conclusions que l'on peut tirer de ces deux approches analytiques sont différentes : le 'protocol analysis' fournit des informations sur la stratégie adoptée par un sujet dans la résolution d'un problème. La stratégie est liée à l'enchainement de séquences, de tâches et d'opérateurs présents dans le processus de résolution. Certains auteurs montrent que la stratégie des experts est orientée par la définition du problème, tandis que pour les novices elle est orientée par les objectifs à atteindre (Simon et Simon, 1978) ; ces deux visions comportent des enchainements de séquences différents. La 'verbal data analysis' ne fournit pas des conclusions sur l'enchainement des séquences et donc sur la stratégie adoptée pour la résolution d'un problème ; elle permet d'identifier l'ensemble des connaissances mobilisées par un sujet lors de la résolution d'un problème.

L'accent mis sur les différences entre les deux méthodes d'analyse parait indispensable à la présentation de notre approche, car, comme l'auteur le souligne, dans un cadre expérimental, le chercheur passe assez facilement d'une méthode à l'autre, sans pour autant compromettre sa méthodologie. Dans notre cas, il est important de rappeler que, à côté des aspects prépondérants de la 'verbal data analysis', d'autres aspects du 'protocol analysis' ont été adoptés, notamment là où nous avons effectué, au préalable, une analyse cognitive de l'activité de cartographie d'aptitude.

Avant d'aborder les détails procéduraux de la méthodologie, un bref tour d'horizon proposé par Chi (1997), sur les moyens d'intégration d'analyse qualitative et quantitative est ci-après présenté. Dans les sciences cognitives, les méthodes qualitatives se référent généralement aux recherches conduites dans des milieux –dits- naturels, tels que les classes, les entreprises, les communautés, les quartiers et les données recueillies concernent des observations, des explications, des interviews, des enregistrements, etc. Le principal avantage de ces méthodes est qu'elles fournissent une compréhension riche et approfondie d'une situation ou d'un phénomène ; l'inconvénient est qu'elles souffrent de la subjectivité d'interprétation et de la non-réplicabilité. Les méthodes quantitatives se référent en général à un cadre expérimental délimité (souvent en laboratoire), soigneusement conçu, dans lequel le chercheur contrôle et manipule les variables à étudier ; les données issues de ces expériences sont de nature dénombrable, telles que l'absence ou la fréquence. Ces méthodes assurent l'objectivité et la réplicabilité, mais limitent la généralisation des résultats au contexte du monde réel. Il y a

plusieurs façons d'intégrer les méthodes quantitatives et qualitatives : la plus traditionnelle est l'approche 'interprétative', dans laquelle les données qualitatives sont utilisées pour interpréter les résultats quantitatifs ; l'approche 'complémentaire' dans laquelle les données quantitatives servent à confirmer les analyses qualitatives ou vice-versa ; l'approche 'quantitative-based qualitative' dans laquelle les données qualitatives sont examinées pour définir des thèmes ou des tendances, des méthodes de codage sont développées pour capturer ces tendances et le codage est analysé quantitativement. L'analyse des données verbales que nous adoptons correspond à la dernière approche.

1.1 Procédure de la 'verbal data analysis'

Une fois les données recueillies et transcrites, la technique d'analyse comporte 8 étapes. Nous les décrivons ci-après. Le terme « protocole » est utilisé par Chi (1997) pour parler du corpus de données verbales et nous adoptons sa terminologie dans ce chapitre.

1. Réduire le protocole verbal. Le chercheur réduit le volume des transcriptions de l'activité, soit en décidant d'un échantillonnage aléatoire, soit en choisissant un sous-ensemble sur la base de critères neutres, tels qu'une plage de temps, un changement de locuteur, etc.., soit en sélectionnant quelques tâches représentatives de toute l'activité.
2. Segmenter le protocole réduit. Une fois que le corpus du protocole est défini, il est nécessaire de le segmenter pour identifier les unités d'analyse. Les manières de coder un événement sont classiques et bien documentées dans la littérature, et comprennent au moins les catégories suivantes (Zacks & Tversky, 2001) : espace, temps, intentionalité (ou motivations), causalité, protagonistes et/ou objets. Il s'agit bien de comprendre que ces unités ne sont présentes que par commodité. Il serait tout à fait possible que l'observateur note ce qu'il observe, en direct et en langage naturel, mais cela donnerait des protocoles bien trop variables pour être analysés. Le choix des unités de codage consiste donc bien en une première réduction de la dimension de la réalité observée (Dessus, 2007). Pour le codage des données verbales, il y a trois enjeux à considérer :
   a) la granularité du segment : la coupure peut se faire à différents niveaux qui révèlent des granularités différentes, telles qu'une proposition, une idée, un raisonnement. Dans le cas de données relatives à un protocole de résolution de problème, une approche qui utilise un grain correspondant aux tâches et sous-tâches de la procédure de solution, fournit des données plus évidentes.

b) l'adéquation entre la dimension du grain et l'interprétation des résultats que le chercheur peut en dériver en réponse aux questions de recherche : par ex., si le chercheur se demande comment ses sujets raisonnent sur une tâche spécifique, il serait approprié de considérer comme unité de codage un enchainement de raisonnements, ce qui comporte un grain de plusieurs phrases.

c) les attributs utilisés pour segmenter : les limites des unités de codage peuvent être définis avec des caractéristiques non liées au contenu, comme les pauses ou les tours de parole, ou avec des caractéristiques sémantiques, comme les idées, les chaines d'arguments, les sujets de discussion ou les impasses pendant la résolution d'un problème.

Souvent, notamment dans le cas de données verbales relatives à une procédure de solution, une idée est illustrée par plusieurs phrases. Il est alors plus pertinent de preserver des segments longs, car ils englobent la complétude de l'idée évoquée et empêchent de compter plusieurs fois le même propos.

3. Définir le schéma de codage. Une fois que le corpus est segmenté, il est prêt pour être codé. Les codes doivent être conçus pour correspondre à la représentation de la connaissance : par exemple, un formalisme de type organigramme sera approprié pour représenter des réseaux sémantiques ou conceptuels, alors que des modèles mentaux seront plus pertinents pour un système de connaissances. Le schéma de catégories taxonomiques est sans doute le plus simple de ces formalismes, car il ne permet pas de révéler les liens entre les éléments codés ; néanmoins ce schéma organise l'appartenance des explications et élaborations des sujets (experts ou novices) à des catégories de concepts, de principes ou de procédures propres à un système de connaissance.

   Dans les données verbales, le développement d'un formalisme est un processus itératif qui demande, indépendamment du type de représentation choisie, un va-et-vient entre une démarche « top-down » et une démarche « bottom-up ». « Top-down » signifie que les codes choisis sont guidés par les cadres théoriques : dans le cas d'une activité de cartographie d'aptitude, dont les connaissances sont représentées par un schéma taxonomique, les catégories sont conçues sur la base de ce que la littérature scientifique a prouvé en matière d'interprétation cartographique ; « bottom-up » signifie au contraire, que les catégories sont issues de l'analyse des données brutes et que des nouvelles hypothèses peuvent être générées à partir des données.

4. Identifier les éléments verbaux représentatifs (*verbatim*) et les affecter au formalisme choisi. Une fois qu'un formalisme est décidé, l'étape suivante consiste à identifier les éléments du discours qui sont représentatifs d'une catégorie et à leur affecter un codage spécifique. Par exemple, si dans le schéma taxonomique une catégorie connotée par des attributs géomorphologiques a été établie, le chercheur cherchera dans les segments du corpus tous les mots en lien avec l'orographie, tels que 'montagne', 'vallée', 'versant'.
5. Représenter le formalisme (optionnel). Une fois que les données sont codées elles doivent être représentées. Le choix de la représentation graphique est dépendant du type de formalisme. Dans le cas d'un schéma taxonomique, une simple table qui organise toutes les catégories peut être adéquate ; dans le cas d'un réseau sémantique il faut représenter les relations par des liens (lignes) et des nœuds (points) selon les correspondances entre les codes.
6. Identifier le(s) pattern(s). La représentation graphique du codage facilite la reconnaissance d'éventuels patterns. Lorsque le graphisme est un tableau, comme dans le cas du schéma taxonomique, il est relativement simple d'identifier des patterns car les résultats des calculs sur les données peuvent être représentés en graphique. Lorsque le graphisme est une structure en réseau, les patterns peuvent être visuellement identifiés au niveau des liens, mais des méthodes quantitatives doivent être développées pour confirmer ces observations. Dans les deux cas, la quantification des éléments représentés dans le formalisme d'un codage, ne doit pas se limiter au comptage total de tels éléments ; l'intérêt d'une intégration entre méthodes qualitatives et quantitatives prend tout son sens lorsque la quantification permet de mettre en évidence des différences entre patterns et à l'intérieur de patterns, avec par exemple, des techniques de comptage sur les occurrences des éléments codés.
7. Interpréter le(s) pattern(s) et sa validité. L'interprétation des patterns dépend entièrement des hypothèses ou des questions de recherche posées : les données et les résultats des analyses peuvent être interprétés en termes de stratégies et processus, ou en termes de structure et contenu de la connaissance de base, ou des deux. Certes, l'interprétation est d'autant plus persuasive qu'elle bénéficie de l'apport d'autres preuves et analyses : dans le cas du schéma taxonomique, l'interprétation est souvent très convaincante juste grâce au support des techniques statistiques que l'on peut facilement lui appliquer.
8. Effectuer un double codage et affiner les analyses. Afin de prouver la fiabilité de l'analyse, il est nécessaire qu'un deuxième chercheur (codeur) effectue les analyses. En règle générale, le 'double codage' comporte une discussion préliminaire entre les deux

codeurs, pour définir ce qui doit être cherché dans le corpus verbal ; cette concertation est suivie par une définition plus précise des caractéristiques de chaque catégorie, pour aider le deuxième codeur à compléter son codage. A l'issue du travail du deuxième codeur, des désaccords ressortent de deux analyses ; ces désaccords sont essentiellement de deux types : des désaccords dits d'indexation, quand les deux codeurs codent le même verbatim avec des catégories différentes ; des désaccords dits d'ambigüité, quand les deux codeurs ne sont pas sûrs de l'affectation du même verbatim à une catégorie précise, car le segment verbal est ambigu. Dans les deux cas, les désaccords doivent être traités : ceci peut amener dans le premier cas à reconsidérer la définition des caractéristiques et des limites de certaines catégories, pour que la sélection des verbatims entrant dans cette catégorie soit plus encadrée ; dans le deuxième cas, les codeurs reconsidèrent les segments ambigus, qui peuvent être ultérieurement réduits et faire l'objet d'analyse plus fines ou alors être exclus de l'analyse.

Au-delà d'assurer la rigueur du travail d'analyse du chercheur, cette démarche de double codage permet d'enrichir la réflexion, car elle oblige d'une part à reconsidérer des choix faites dans une première lecture du corpus et d'autre part à affiner l'analyse sur les segments verbaux avec des passages successifs et itératifs.

A l'issue de cette procédure, une précision est suggérée par l'auteur : dans chaque paradigme de recherche, il y a une part théorique et une part mécanique. La théorie guide les questions et les questions guident les analyses; la mécanique met en place les moyens pour obtenir les réponses aux questions. Nous avons adhéré à ce paradigme en l'adaptant à nos questions de recherche et nous l'avons mis en œuvre pour le traitement de données verbales de notre expérimentation.

2. Analyse de données écrites : les questionnaires

Cette analyse a été conduite selon une approche thématique du contenu : des thèmes sont extraits du texte des réponses des participants (bottom-up process), et peuvent ensuite être liés ou organisés pour développer une structure dominante (Swenson et Kastens, 2011). Dans cette approche, nous nous sommes appuyés sur la méthodologie de Chi (1997) pour examiner les mots-clés et les phrases que les étudiants utilisent pour décrire ce qu'ils ont fait et la justification de leurs choix pour résoudre leur problème. L'analyse des données écrites s'est

faite à partir des réponses aux 3 questionnaires à questions ouvertes qui a été soumis aux étudiants à trois moments cruciaux de la procédure de cartographie d'aptitude, aussi qu'aux experts à la fin de leur activité contrôlée. Les sujets ont répondus individuellement aux trois questionnaires.

Les réponses sont traitées selon l'approche 'lexicale simplifiée, qui étudie les mots-clés utilisés par les participants (Andreani et Conchon, 2005). Le sens des mots est déduit des relations intuitives avec le contexte. L'analyse de la signification de chaque mot est appréciée dans les phrases où il se trouve. La lecture et les annotations sont conduites selon un processus de navigation lexicale. Les allées et retours au texte permettent d'apprécier l'environnement lexical immédiat. Ils repèrent les mots situés avant et après les mots étudiés. Le sens est établi à partir des réponses complètes des enquêtes et de la situation réelle d'utilisation.

Les mots-clés sont traités sous leur forme canonique la plus élémentaire : verbe à l'infinitif, substantif au singulier, adjectif au masculin par exemple. L'analyse ne s'intéresse qu'aux mots 'pleins' et laisse de côté les mots 'outils' (i.e., les articles, les propositions, les pronoms etc…), même s'ils ont une fréquence d'apparition élevée (Andreani et Conchon, 2005).

Les réponses sont saisies des grilles d'analyse organisées de la façon suivante (voir, à titre d'exemple, le traitement des réponses d'un groupe d'étudiants (g1) en Annexes VI) :

- Dans la première grille les colonnes recensent les réponses brutes, avec une syntaxe limitée mais fidèle aux expressions utilisées par les étudiants. Chaque ligne est identifiée par une lettre de l'alphabet, correspondant à un étudiant ; cette correspondance est respectée sur les 3 questionnaires.
- Une deuxième grille, *Class_Réponses*: les réponses sont groupées par classes de similitude lexicale ou sémantique (les mêmes mots ou expressions qui ont le même sens employés par les étudiants) ; elles sont exprimées par des verbes ou des courtes phrases qui restent fidèles aux termes utilisés par les étudiants.
- Une troisième grille *Thèmes*: c'est la grille la plus « éloignée » des réponses brutes ; il s'agit d'un groupement ultérieur des classes de similitude dans des types, qui sont décrits selon une interprétation et une généralisation des caractéristiques. Cette organisation reflète les points 3 et 4 da la méthode de Chi (1997). La Figure 34 illustre une synthèse du traitement des réponses sur les 3 feuilles pour la question 7 du QR2, et sur le groupe d'étudiants géologues (15 sujets).

Feuilles réponses brutes	Feuilles classes de réponses	Thèmes
Q2.7. Qu'est-ce que vous cherchez à voir en premier dans votre carte résultat pour la valider ?		
zones bien différenciées	des zones de contraste et bien différenciées	le graphisme/la variable couleur
zones d'intérêt bien délimitées		
contraste important sur la carte (pente et alti)		
le contraste et qu'il n'y ait pas trop vaste choix		la restriction, sélectivité de la carte
des zones bien définies et différenciées	des zones bien délimitées et limitées	
que le site soit situé en montagne	que les bons sites soient en montagne (relief)	la morphologie
un bon relief		
plus d'importance dans des zones de moyenne et haute montagne	que le critère d'alti soit prépondérant	la hiérarchie des critères
trouver un lieu avec une bonne altitude		
prépondérance de l'altitude		
les surfaces sont assez grandes	des surfaces assez grandes	la géométrie
des zones à priori bonnes		

Figure 34 *Exemple simplifié de traitement des réponses sur les 3 feuilles d'une grille d'analyse (fichierExcel).*

L'analyse qualitative a concerné les 30 réponses des 3 questionnaires (voir Chapitre V) : elle a permis d'obtenir un panel « thématique » complet des arguments et des notions mobilisées (ou pas) par les étudiants sur des points précis de leur processus de résolution. Une analyse qualitative-quantitative de type 'backdrop approach' (Chi, 1997) a été ensuite appliquée. Dans cette analyse, les apports quantitatifs (par ex. comptage de non-réponses, ou du nombre d'étudiants qui donnent une classe de réponse) surviennent après l'analyse thématique, pour soutenir ou refuter les hypothèses de recherche. Cette analyse a concerné 12 questions sur les 30 des trois questionnaires : *Q1* 2, 3, 4 ; *Q2* 2, 6, 7,8 ; *Q3* 2, 8, 9,10, 11 (voir

Chapitre V). Cette importante réduction de questions a été dictée par plusieurs raisons : les questions éliminées sont redondantes, leur formulation était vague et ne visait pas un indicateur précis, et leurs hypothèses sous-jacentes n'apportaient pas une connaissance utile pour l'identification de thèmes ou de concepts, mobilisés dans le cadre d'un processus de résolution (les questionnaires complets sont consultables en Annexes V).

Une analyse « thématique » (et non quantitative, vu que les experts n'étaient que 3) a également été réalisée sur les réponses des 3 experts sur les 12 questions retenues comme plus significatives.

Les analyses des données écrites ont permis d'extraire des types de réponses et de les organiser en thèmes ; ces thèmes caractérisés par des descripteurs ont fortement contribué à la conception des catégories conceptuelles issues, par la suite, de l'analyse des données verbales.

3. Analyse des données verbales : les enregistrements

Rappelons que les enregistrements ont été effectués pendant la réalisation de 4 tâches fondamentales du processus de cartographie d'aptitude (voir Chapitre V) :

- T0 = la standardisation et le classement des données (méthodes de discrétisation)
- T1 = l'attribution des poids et l'agrégation des critères (sommes pondérées)
- T2 = l'analyse visuelle des cartes résultant des sommes pondérées
- T3 = le choix du site sur la carte retenue

Les données issues des enregistrements ont été traitées selon le protocole d'analyse en huit étapes de Chi (1997), décrit plus haut.

(1.)[15] Les transcriptions ont été réduites aux parties du discours relatives à l'activité de résolution de problème et de cartographie d'aptitude ; les parties du discours « bruité » par les contenus non pertinents (autres sujets de conversation, rigolades, bêtises..) à l'analyse n'ont pas été transcrites.

(2.) Les transcriptions ont constitué le *Corpus.* Le Corpus a été segmenté pour dégager les unités de codage, constituées par une ou plusieurs phrases. La segmentation s'est effectuée à différents niveaux, sur la base d'un propos, d'une idée, d'un échange, d'un épisode, d'un

[15] points du protocole de Chi (1997)

changement d'activité ou d'une impasse. L'étude des phrases s'est faite selon une analyse lexicale (comme pour les réponses des questionnaires), une analyse des mots fonctionnels qui permet de mettre en évidence les prises de position, à travers les expressions d'intensité (ex. : beaucoup, très , le plus..) ou le discours impliqué (ex. : moi, en ce qui me concerne..), les attitudes neutres, traduites par des expressions de prudence (ex. : il me semble, on pourrait…) et les relations de cause à effet (ex. : donc, puis, alors..).

(3.) La segmentation a révélé une granularité et des unités de codage diversifiées, ce qui a donné lieu à une organisation hiérarchique des informations extraites du corpus. Cette organisation prévoit trois niveaux posés selon un processus 'theory-driven' : la tâche, les actions, les opérations. Ils relèvent de ce processus car on les trouve dans la littérature, dans les descriptions de méthodes d'analyse spatiale multicritère (Eastman, 1997, Malzcewski, 2004), comme étant des phases et sous-phases de la procédure multicritère. En accord avec les directions de Chi (1997), notre analyse veut mettre en évidence quelles connaissances le sujet utilise pour résoudre un problème, qu'elles soient correctes ou pas, plutôt que de représenter une connaissance idéale. Selon un processus 'data-driven', au niveau des opérations, des opérations de contrôle ont été définies ainsi que des objets conceptuels, ces derniers constituent le niveau le plus bas de la hiérarchie. Les contrôles sont définis selon les travaux sur les apprentissages par l'erreur d'Ohlsson (1997) ; les objets sont définis selon les indications de Kahneman (1992) sur la construction du raisonnement visuel.

L'organisation générale des unités de codage est illustrée en Figure 35. Les définitions spécifiques, issues du Chapitre IV, sont reportées ci-après.

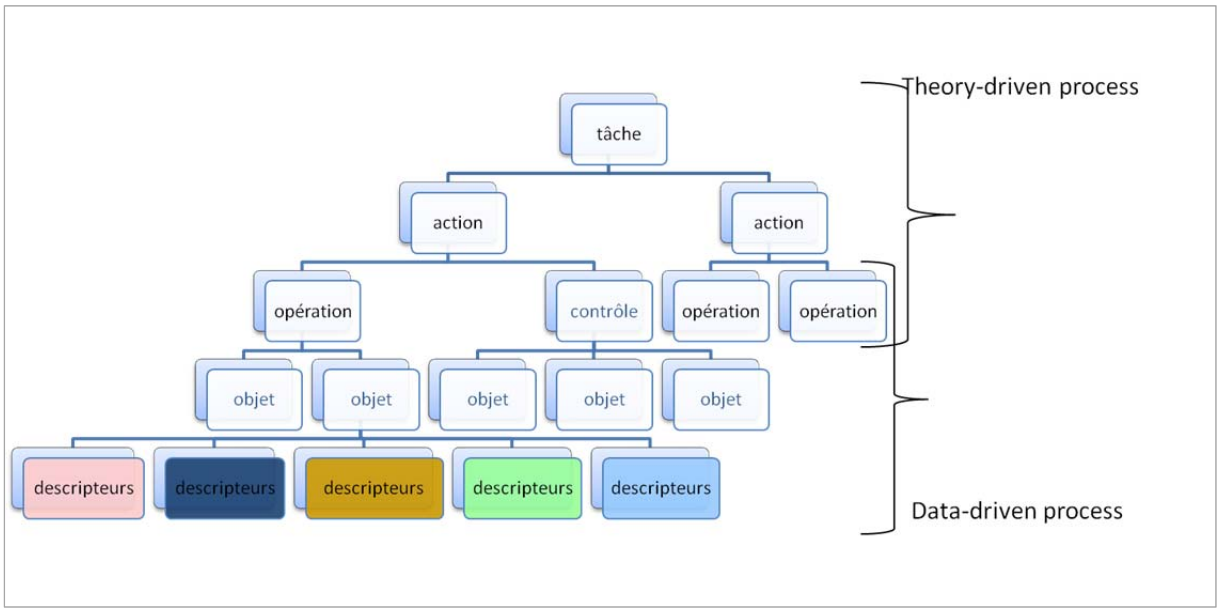


Figure 35 *Schéma hiérarchique des unités de codage*

- *Une tâche* est constituée d'une ou plusieurs action(s) et définie comme 'une étape principale de la procédure' (Eastman, 1997).
- *Une action* est constituée d'une ou plusieurs opération(s) ou contrôle(s) et définie comme 'les modes opératoires de la procédure de prise de décision' (Eastman, 1997).
- *Une opération* est caractérisée par un ou plusieurs objet(s) et définie comme une 'opération qui comporte une ou plusieurs variables en entrée et génère une unique variable en sortie. ' (Tomlin, 1994). Dans la cartographie d'aptitude, les opérations sont de nature algébrique (algorithmes), graphique (attribution des couleurs) ou analytique (analyse des classes).
- Une opération particulière : le *contrôle (d'erreur)* est caractérisé par un ou plusieurs objet(s) et se défini comme 'l'acte d'identifier un choix inapproprié dans un ensemble d'options. (Ohlsson, 1997).
- *Un objet* est décrit « comme un groupement temporaire entre un ensemble de caractéristiques visuelles et des informations verbales (la verbalisation de l'objet) » (Kahneman, 1992).

(4.) Les unités de codage 'tâche', 'action', 'contrôle' et 'objet' ont été codées. Les quatre tâches avaient été définies à priori, une liste d'actions par tâche a été établie ; dans chaque action nous avons identifié une ou plusieurs opérations, correspondant, la plupart du temps aux coupures du corpus. Dans chaque opération, un ou plusieurs objets conceptuels émergent : ils vont constituer des catégories. Concrètement, nous avons identifié dans un premier temps tous les verbatims ou les mots-clés, comme par exemple «montagne" ou "vallée", "station de ski" ou "nom de localité", "palette", "vert, rouge", "seuils, %", pouvant constituer des groupes sémantiques, pour concevoir les catégories. On verra dans la partie résultats, que cette analyse a conduit à reconnaitre trois types d'opération des contrôles, définis également en catégories : vérification, diagnostique et correction. Cinq catégories on été définies pour les objets conceptuels: algébrique, couleur, orographique, géographique et analytique (zones susceptibles). A l'intérieur de chaque groupe sémantique (catégorie), différents verbatims peuvent exprimer différent concepts : à titre d'exemple, dans la catégorie « Algébrique » on trouve des verbatims liés à la définition de seuils max et min pour les critères, des verbatims liés à la classification, aux bornes des classes, au nombre de classe,

etc.. Nous les avons appelés ‘descripteur’, car ils décrivent les caractéristiques d’une catégorie, et dans l’exemple ci-haut, il s’agit respectivement des descripteurs ‘exclusion’ et ‘classe’. Les descripteurs constituent le grain le plus fin de notre analyse.

La Figure 36 illustre les principes de la segmentation du corpus.

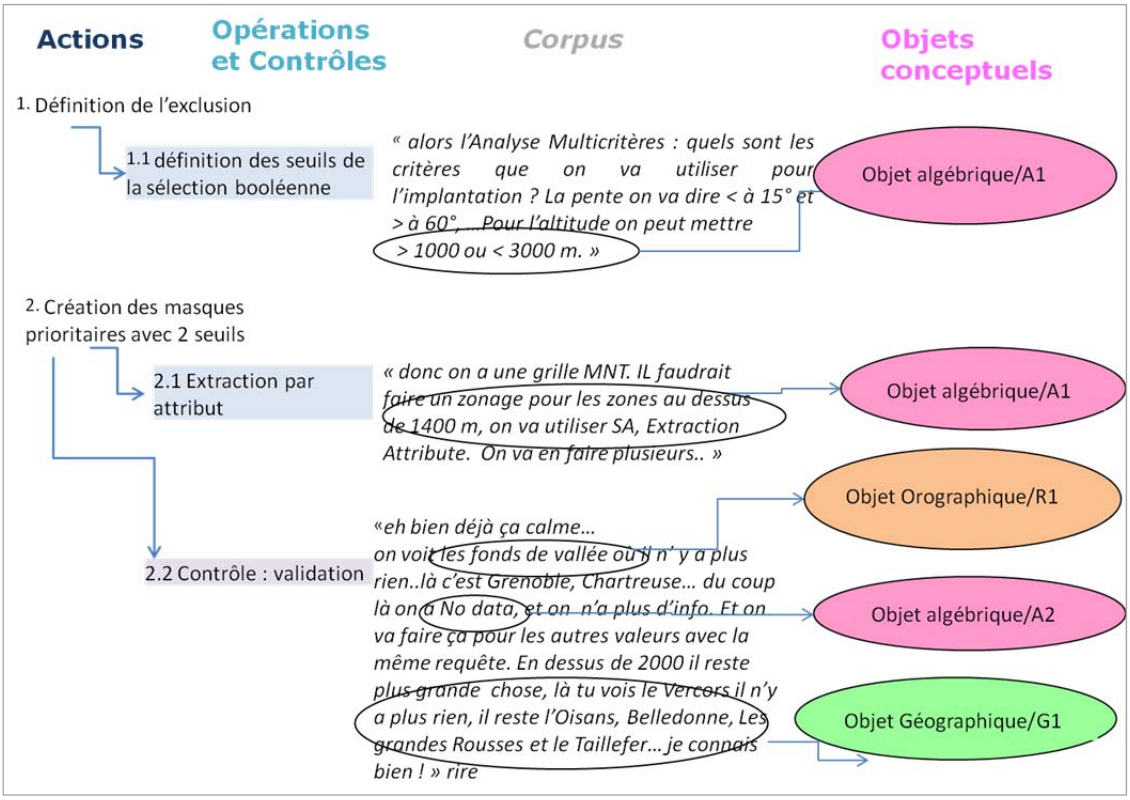


Figure 36 *Exemple de segmentation du corpus*

La Figure 37 présente un exemple de grille d’analyse avec le corpus segmenté en unités de codage. La dernière colonne à droite reporte les unités de codage. Dans chaque unité un ou plusieurs descripteurs sont repérés et reportés dans les colonnes des catégories d’objets. Les cases en couleur correspondent aux descripteurs des catégories d’objets et de contrôles, présentés en détail plus loin dans le Chapitre VII.

e1	procédure		codes opérations	opérations	code a+ n	objet algébrique / mathématique	code v+ n	objet/ variable visuelle	code r+n	objet/ topographique, relief	code G+n	objet géographique	code AN + n	objet analysé	segments
3:43:12	A2. Analyse et choix des cartes	12. 1. changements des limites des couleurs principales					V4	couleur/ limites surfaces vertes et rouges					AN5		2h44': je prends la même palette. (il passe d'un affichage à l'autre des 2 cartes). Ça ne change pas...dans cette zone là on a plus de vert, mais ça ne joue pas énormément, il n'y a pas une différence importante
3:50:24		2. vérification des zones avec la topographie	CV7	contrôle : validation			V2	couleur/contraste	R5	falaises et types de pente (dégrés d'inclinaison et lithologie)	G1	identification précise des sites -Le Sappey, le Néron, le Saint-	AN3	corrélation entre les zones vertes et rouges et la terrain connu	Tout ce qui est Vercors reste en rouge et pourtant ce n'est pas si haut, est-ce que sont les falaises? Quoi que si, c'est haut (indique les crêtes)
3:57:36				ajout de données vecteurs en superposition	A7		V1	couleurs					AN1	corrélation à d'autres critères	2h45': ce que on n'a pas encore regardé sont les points d'eau que on peut juste mettre par-dessus, il faut q'ils soient dans les zones vertes
4:04:48			CP1	masque sur les scores (les plus hauts): quel seuil?	A2	valeurs numérique en légende							AN4	séléction	2h46': pour choisir entre les deux scénarios , je regarderais que les valuers (en légende) plus hauts, je ferai un masque pour réduire encore, rire...
4:12:00		3.recours aux outils d'effets visuels pour s'aider à la visualisation - Zoom, Transparence, carte de fond, ombrage-		ombrage					R2	relief	G1	Ecrins, Carte de fond			2h47': zoom sur les Ecrins. Il me faudrait une carte de fond pour mieux voir..je vais faire un ombrage pour voir le relief
4:19:12		4. vérification plus détaillée avec la topo	CV7/ CD6	erreur : pentes en zones de falaises; contrôle diagnostic: pas assez de restriction sur le critère pente			V1	couleur ton (vert)	R2+R15	pentes, falaises	G1	Néron, Saint-Eynard	AN3	corrélation entre les zones vertes et rouges et la terrain connu	2h51': Ouhh là!! Là le Néron ..on a été généreux sur les pentes, il faudrait des pentes en peu moins raides. Il (le calcul) enlève les falaises, mais regarde au Saint-Eynard il les laisse (en vert) et c'est trop raide(zoom très fort) et l'alti n'est pas assez mise en valeur. Il y a qq choses que je ne comprends pas : on n'a pas été assez restrictifs sur les
4:26:24		5. réperage d'un conflit (scénario 2) : zones fav et non fav et pentes réelles	CV1	diagnostic: calcul: mauvais classement des pentes (classe trop inclinées = presque falaises) et trop	A4	coeff trop important sur un critère	V1	couleur ton (rouge)	R2+R15	pentes douces en zones défav; falaise en zones fav	G1	Le Sappey , Chartreuse	AN1	corrélation entre les zones rouges et la réalité de terrain (connu)	2h53': on aurait dû mettre moins de pondération des pentes, car le calcul les mets en rouge, justement sur le versant du Sappey où il y a des pistes
4:33:36					A4	SP en %									2h54': je vais faire un 3° scénario: MNT 45%, Expo 15%, Pentes 20%, Dist 20%.
4:40:48			CP3	erreur d'évaluation et manque d'expertise (sur la problématique)											2h55': je me suis trompé sur le critère Pentes de départ, je ne vais pas trop au ski... comme quoi il faut bien connaître la problématique!

Figure 37 *Extrait de grille d'analyse avec corpus*

(5.) Les typologies des objets et des contrôles se formalisent en catégories Elles sont représentées en tableaux, indiquant pour chaque catégorie le code, les descripteurs et les verbatims représentatifs.

(6.) Une fois les catégories définies, les verbatims ont été isolés, codés et affectés à chaque descripteur pour être comptabilisés. Pour mettre en évidence les patterns, l'analyse quantitative a comporté les calculs de présence/absence et des occurrences. Des comparaisons entre experts et étudiants, aussi bien pour les objets que pour les opérations-contrôles et les actions, ont pu être faites.

La Figure 38 présente la grille d'analyse simplifiée et codée, à partir de laquelle est construite notre matrice de données La Figure 39 illustre la matrice de données. Ce tableau organise en colonnes tous les descripteurs des catégories d'objets et en ligne les sujets (e1, e2, e3, g1, g2, g3, g4, g5, g6) par 4 blocs de tâches (T0, T1, T2, T3). Deux autres matrices ont été construites pour les actions et pour les opérations de contrôle.

K	L	M	N	O	P	Q	R	S
		codes procédure	codes opérations	*code a+ n*	*code v+ n*	*code r+n*	*code g+n*	*code Z + n*
3:43:12	**A2. Analyse et choix des cartes**	T21	CV5		V4			AN5
3:50:24		T21	CV7		V2	R5	G1	AN3
3:57:36				A7	V1			AN1
4:04:48			CP1	A2				AN4
4:12:00		T22				R2	G1	
4:19:12		T21	CV7/ CD6		V1	R2+R5	G1	AN3
4:26:24		T21	CV1	A4	V1	R2+R5	G1	AN3
4:33:36		T21		A4				
4:40:48			CP3					
4:48:00		T21	CV2/ CD6/ CC6	A2	V2			AN3
4:55:12		T22	CV2	A2		R5	G1	AN1

Figure 38 *Extrait d'une grille d'analyse codée simplifiée*

Figure 39 *Matrice des descripteurs des objets*

(7) L'interprétation des patterns s'est fait au moyen d'un logiciel de *mind mapping*, XMind. Une modélisation de l'enchainement d'actions et d'objets conceptuels sur les quatre principales tâches de résolution du problème de cartographie d'aptitude, a été proposée.

(8.) L'opération de codage a été effectuée par deux codeurs différents. Le double codage a permis d'établir, au moyen d'un programme spécifique, la liste des désaccords et les taux d'accord. Suite aux résultats du double codage, tous les désaccords ont été ré-analysés pour atteindre un taux d'accord final de 87,8% (moyenne).

Ces analyses verbales ont permis d'identifier des éléments de base du raisonnement de nos sujets dans leur activité de cartographique d'aptitude : les actions, les opérations et les objets conceptuels. L'organisation de ces éléments montre des enchaînements, des typologies et des occurrences diversifiées selon les profils des sujets. Les éléments au grain le plus fin de cette analyse sont les objets conceptuels, qui sont comme de véritables outils, manipulés, utilisés systématiquement ou pas par les sujets lors de l'application des opérations et des stratégies de contrôle des erreurs. Leur présence et/ou occurrence dans le contexte d'une tâche donne des indications précises sur la façon de procéder des différents profils des sujets : les résultats de ce comptage sont présentés en Chapitre VII.

4. Analyses des productions cartographiques

L'analyse des cartes réalisées est de nature qualitative, car elle part de l'observation des cartes réalisées par les sujets pour la résolution du problème de localisation de site et s'articule autour d'une grille d'évaluation des qualités sémiologiques. L'objectif de cette analyse est double : d'une part il s'agit d'identifier quelles règles de la conception cartographique sont acquises et mises en application par les sujets et celles qui ne le sont pas ; et d'autre part, il s'agit d'avoir un outil pour esquisser des corrélations, s'il y en a, entre les résultats sur les raisonnements et les productions cartographiques.

Nous rappelons que la grille d'évaluation a été conçue à partir des indications de Cauvin et Al (2007) concernant la perception, la lecture et les règles de construction de la carte. Comme l'auteur le souligne, valider une carte c'est comparer les réponses qu'elle apporte aux demandes, aux attentes explicites ou implicites du lecteur, c'est identifier les qualités qu'elle présente et les confronter aux qualités qu'on lui demande de posséder. Ces qualités diffèrent selon qu'il s'agit d'une carte d'exploration, destinée à la recherche, d'une carte d'information

destinée au grand public ou encore d'une carte de prise de décision. Les qualités d'une carte peuvent être classées en deux grandes catégories : les « fondamentales » (Denègre, 2005, in Cauvin et Al., 2007) et les « graphiques ». Les qualités fondamentales sont plutôt liées à la construction de la carte :

1. *adéquation à sa destination* : le thème majeur de la problématique devra s'appréhender du premier coup d'œil ; le message ne doit jamais être une superposition d'idées mais une recherche de priorités, des éléments fondamentaux; les images (cartographiques) doivent résumer sous une forme « immédiatement perceptible » les données essentielles à l'information ((Brunet, 1978 in Zanin, Tremelo, 2003) ;
2. *simplicité* : l'efficacité du message sera d'autant plus grande que le nombre d'images (superposées ou séparées) et leur complexité seront réduits et que la lecture pourra être faite au niveau de l'ensemble (Bertin, 1967) ;
3. *exactitude* : c'est la conformité aux spécifications, dans la saisie des données et dans l'interprétation cartographique : observer un traitement rigoureux et adapté des données (Weger, 1999) ;
4. *fiabilité* : elle est garantie *par les li*mites d'utilisation définies par son concepteur : la valeur des données explicitées par les sources dont elles sont issues ; la nature des techniques utilisées pour le traitement et l'interprétation (Weger, 1999).

Les qualités graphiques sont plutôt associées à la perception de la carte :

5. *la lisibilité* permet une bonne perception du contenu, évite les ambigüités grâce à des contrastes marqués et facilite la mémorisation. Une carte n'est efficace que si elle peut être lue sans efforts dans des conditions normales (Weger, 1999) ;
6. *la sélectivité* rend aisée la distinction entre les diverses catégories d'objets, en fonction des choix effectués ; les différents éléments de la carte ne peuvent jamais avoir la même importance dans le message à transmettre : les objets importants, doivent être mis en valeur et doivent être aperçus dans leur ensemble, tandis que les informations de second ordre seront plus discrètes ((Zanin, Trémélo, 2003) ;
7. *l'esthétique* rend la carte attrayante, plaisante à regarder et à étudier (Cauvin et Al., 2007).

Les sept points listés ci-dessus, constitutifs de la grille d'évaluation, ont été jugés selon une technique dite d'échelonnement catégoriel, dans laquelle on attribue à des cartes, un nombre

traduisant un jugement (Cauvin et Al., 2007). L'échelonnement correspondant à notre évaluation va de 0 à 4, respectivement de l'absence de la qualité (0) à la qualité clairement identifié (4). La Figure 40 présente un exemple de grille. Les grilles ont été complétées par trois examinateurs : les deux chercheurs impliqués dans l'expérimentation et la tutrice intervenant dans le module. Bien que l'ensemble des 13 cartes (intermédiaires et finales) réalisées aient été examinées pour les évaluations conclusives du module, 9 cartes de sommes pondérées (3 pour les 3 groupes d'étudiants géologues, 3 pour les 3 groupes d'étudiants ingénieurs et 3 pour les experts) ont été analysées.

Indicateurs	*Examinateur1*				*Examinateur1*				*Examinateur3*				Score
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3	
1. adéquation à sa destination			2				2			1			
2. simplicité		1					2			1			
3. exactitude		1					2			1			
4. fiabilité		1			0					1			
5. lisibilité			2				2			1			
6.sélectivité			2					3		1			
7.esthétique			2				2			1			
				11				13		7			31

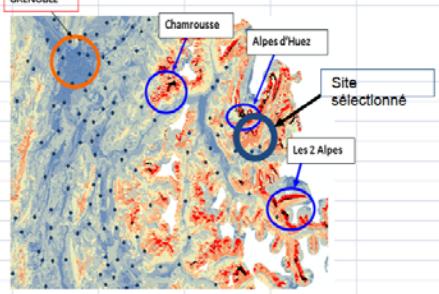


Figure 40 *Exemple de grille d'évaluation pour le groupe 4*

5. Analyses des données croisées.

Les analyses dites 'croisées' concernent, pour chaque groupe et chaque expert, les résultats des données verbales et les résultats des évaluations des cartes d'aptitude réalisées. Des corrélations sont tentées entre les actions répertoriées sur les quatre tâches analysées, et la qualité de la carte finale résultant des méthodes d'analyse multicritère. Deux questions fondamentales peuvent être posées :

1. est-ce qu'il existe une relation entre le type et le nombre d'actions entreprises et la réussite de la carte d'aptitude ?
2. est-ce que les contrôles finalisent la réussite de la carte ?

Nous considérons les scores, subjectifs, attribués par les examinateurs aux indicateurs de la grille d'évaluation des cartes, pour établir la réussite d'une carte. Plus les scores sont hauts plus la carte répond avec succès aux critères de qualité. Lorsque toutes les actions seront répertoriées, on peut faire l'hypothèse que des relations existent entre le type d'actions effectuées et la qualité de la carte. On peut identifier des actions qui relèvent de la sémiologie,

telles que l'affectation de la couleur ou de la teinte, et la validation des zones par l'analyse de l'expression graphique, et des actions de mathématisation, telles que la définition de seuils de validité et d'exclusion, l'application de méthodes pertinentes de discrétisation et de sommes pondérées. Une première hypothèse peut alors être énoncée: *une procédure qui présente un nombre plus important d'actions de mathématisation abouti à une carte d'aptitude de meilleure qualité*. Nous mettons à l'épreuve cette première hypothèse en dénombrant les actions. Une deuxième hypothèse est posée : *un nombre élevé de contrôles supporte la réussite de la carte, car les contrôles permettent de revenir sur les erreurs et d'améliorer les solutions pas très satisfaisantes.* Nous mettons à l'épreuve la deuxième hypothèse en dénombrant les contrôles. Les résultats des comptages alimentent de nouvelles hypothèses de sorte que, de façon itérative, d'autres tests peuvent être conduits pour consolider les premières observations.
(Pour des contraintes de temps, notre analyse n'a pas pu aller plus loin, elle reste basée sur des relations de présence/absence, ce qui nous a permis d'identifier des tendances).

6. Analyses comparées des données

L'objectif ultime de notre démarche est de pouvoir comparer les résultats des analyses des données écrites, verbales et produites entre les experts et les étudiants. Les analyses quantitatives menées sur la présence/absence et sur les occurrences des types de réponses dans les questionnaires et des catégories taxonomiques dans les données verbales permettent de mettre en évidence et mesurer les différences entre les deux profils. Des résultats d'ordre qualitatif sont issus de l'évaluation des cartes produites.

7. Bilan

Les données écrites, issues des questions ouvertes, et les données verbales, issues des enregistrements ont fait l'objet d'analyses méthodiques. Les analyses sur les données écrites vont permettre d'une part de dessiner les thèmes des catégories taxonomiques révélées, par les analyses des données verbales, et d'autre part de comptabiliser les occurrences des types de réponses. Les analyses de données verbales vont permettre d'identifier les éléments du processus cognitif de l'activité de cartographie d'aptitude tels que les actions, les opérations et les objets conceptuels mobilisés pour la résolution du problème.
Une analyse de la qualité des cartes produites a également été conduite sur la base d'une grille

d'évaluation.

La combinaison de toutes ces différentes approches a donné lieu à des analyses croisées dont l'objectif a été d'identifier des caractères, procéduraux ou sémiologiques, liés à la réussite (ou pas) de la carte. Le Chapitre VII présente les résultats des analyses verbales, cartographiques et croisées.

La multiplicité de l'approche méthodologique, issue des sciences cognitives, de la cartographique ou des sciences de l'éducation, pose le vrai défi de cette analyse, celui d'identifier, appliquer et intégrer différentes méthodes issues de ces disciplines.

CHAPITRE VII : LES RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats des analyses des données verbales (écrites et orales) et cartographiques issues du protocole expérimental. Il est constitué de trois parties qui présentent respectivement les résultats des analyses écrites, orales et comparées. Les analyses des données verbales écrites aboutissent à la définition des thèmes généraux extraits des réponses et à leur répartition quantitative. Les analyses des données verbales orales permettent d'identifier les catégories d'actions, d'opérations de contrôle et d'objets conceptuels, extraites des discours des participants. Elles amènent à des résultats d'ordre quantitatif, tels que les nombre d'occurrences : ceci correspond à la répartition du nombre de contrôles ou d'objets mobilisés dans une tâche en fonction des groupes de participants. Ce dénombrement met en évidence, dans les résultats des analyses comparées, les écarts (ou les similitudes) entre les experts et les étudiants et également entre les groupes d'étudiants géologues et ingénieurs. Un bilan conclusif, résume les éléments saillants ressortant des analyses, tandis qu'une interprétation plus approfondie sera présentée dans les discussions du Chapitre VIII.

1. Les résultats des données écrites

1.1 Les résultats qualitatifs : les thèmes

Les thèmes sont obtenus à partir de l'élaboration sémantique, empirique, des types de réponses obtenues (Andreani et Conchon, 2004). Ici l'objectif est de sélectionner les dimensions clés en réduisant la masse d'information. Les résultats de 3 questionnaires à question ouverte, concernent les 12 questions retenues comme significatives (voir Chapitre IV) sont reportées ci-après dans les Tableaux 22, 23 et 24.

Questions	Thèmes	*Extraits de Verbatim*
Q1.2 Quelle(s) méthode(s) de classement avez-vous utilisé ?	outil manuel	*Manuelle, selon nos avis personnels*
	outil automatique	*Intervalles Egaux, imposée par le critère principal* *Seuils Naturels, pour respecter la donnée*
	graphique-visuel	*par symbologie de couleurs*
	mathématique, critère	*par ordre, hiérarchie des critères*
Q1.3 Pourquoi avez-vous utilisé cette méthode/ces méthodes ?	cartographie	*pour une meilleure visibilité/vision/précision de la carte* *pour cibler les zones, utile pour choisir une carte*
	algèbre	*pour avoir les mêmes classes (comparer l'incomparable)* *pour faciliter la pondération*
	procédure	*pour respecter le Cahier des charges et les critères établis*
Q1.4 Vous avez défini un nombre de classes, lequel et pourquoi?	lecture de la carte	*pour une lecture de la carte simple et non surchargée (4 classes)* *>8 = difficile à lire; <8= difficile de classer les infos*
	critère	*ça correspond au découpage en I.E. de la donnée altitude (8 classes)*
	légende	*pour exprimer les 4 ou les 3 classes de la légende (3 classes)*

Tableau 22 *Les thèmes extraits pour le Questionnaire 1*

Dans le Questionnaire 1, qui interroge sur la tâche de discrétisation et reclassement des données (T0), on observe :

- au niveau des invariants opératoires (concepts-en-acte appelés pour effectuer la discrétisation de la donnée géographique) et au niveau des règles d'action (méthode de discrétisation choisie), les thèmes de réponse ne mettent pas clairement en évidence une démarche conceptuelle. Ils indiquent l'utilisation des fonctionnalités manuelles ou automatique de classement proposées par le SIG, des démarches plutôt mathématiques

d'ordonnance des critères et des démarches plutôt visuelles d'attribution d'un dégradée de couleurs aux classes.

- au niveau des stratégies (arguments pour justifier la procédure suivie), les thèmes indiquent des raisons liées au respect de la procédure, au besoin de lisibilité et de commensurabilité.
- au niveau des buts et anticipations (explications sur le choix du nombre de classes). Les thèmes indiquent surtout un besoin de lecture simple de la carte ou d'adéquation au classement d'un critère retenu comme déterminant.

Questions	**Thèmes**	***Extraits de Verbatim***
Q2.2. Ecrivez la formule utilisée dans la technique que vous avez choisie ?	hiérarchique	*classe1*coef1 + classe2*coef2+..*
	équiprobabilité	*0,25 *alt+ 0,25*pente+ 0,25*CLC+0,25*expo*
	pourcentage	*19% alt+13% expo+14%CLC+19% dist*
	pas de formulation	
Q2.6. Quel est l'impact d'un changement des importances relatives sur le résultat final ? Pourquoi ?	zone (couleur, taille, densité)	*il y a un changement des dimensions des zones sur la carte*
	poids (importances relatives)	*les coeff "bas" effacent les critères*
Q2. 7. Qu'est-ce que vous cherchez à voir en premier dans votre carte résultat pour la valider ?	la géométrie	*des surfaces à la juste taille, précise ,homogène*
	la hiérarchie des critères	*les plus importants soient prépondérants*
	la morphologie	*les zones aptes doivent être situées en montagne (en relief)*
	le graphisme/la variable couleur	*contrastes de couleurs, différences nettes entres les zones*
	la restriction, sélectivité de la carte	*peu de zones avec des forts poids (meilleures zones) et bien localisés*
Q2. 9. Parmi toutes les cartes réalisées, vous devez en choisir	la géométrie	*la présence des + grandes surfaces favorables*
	la hiérarchie des	*le rang et le poids des critères (selon le Cahier des*

une, quels critères/arguments allez-vous prendre en compte pour faire ce choix ?	critères	*charges)*
	la morphologie	*la localisation des zones favorables en montagne*
	le graphisme/la variable couleur	*le contraste et dimension/différenciation des zones*
	la restriction, sélectivité de la carte	*la réstrictivité des zones favorables et leur de taille précise*

Tableau 23 *Les thèmes extraits pour le Questionnaire 2*

Dans le Questionnaire 2, qui interroge sur les tâches de pondération (T1) et d'analyse des cartes de synthèse réalisées par les sujets (T2), on observe :

- au niveau des règles d'action (technique choisie), les thèmes révèlent un formalisme hiérarchique, en pourcentage, de l'équiprobabilité et également l'absence de formalisme (les étudiants n'écrivent pas la formule de la somme pondérée) ;

- au niveau des buts et anticipations (conséquences sur la carte suite aux changements des poids). Les thèmes indiquent une analyse des causes liées aux changements des poids affectés et des effets anticipés au niveau de la géométrie des surfaces colorées (zones).

Questions	**Thèmes**	***Extraits de Verbatim***
Q32. Quels types de formes identifiez-vous dans les surfaces de couleurs verte et marron ? Décrivez-les en quelques mots (taille, forme, contours..),	la géométrie	*des formes allongées, angulaires, en escalier, homogènes, étroites, larges, discontinues, fines, contrastées..*
	la géographie	*les formes marron= montagnes, vallées, sommets, crêtes, agglo ; les formes vertes = flanc de montagnes, plaines*
	l'unité de mesure (pixel)	*les surfaces correspondent aux pixels: carré de taille et 1 seule couleur*
	les critères	*formes marron = pente ou expo non favorables; formes vertes= pente et expo favorables*
	la zone analysée	*formes marron = pente ou expo non favorables; formes vertes= pente et expo favorables*

Q38. Si vous deviez proposer la carte de l'Image 7 à un décideur, pourriez-vous lui affirmer que les zones vertes sont toutes favorables ? expliquez pourquoi	la géométrie	*non: les pixels ont une trop grande taille* *non : zones vertes trop présentes et étalées, pas assez ciblées*
	la géographie (morphologie);	*non : zones vertes comprennent des sommets et des versants entiers avec des mauvaises expos*
	l'unité de mesure (pixel)	*non: les pixels ont une trop grande taille*
	les critères	*non: carte qui ne hiérarchise pas assez ses critères*
	la procédure	*non : il manque trop d'infos*
Q39. Si vous deviez proposer la carte de l'Image 6 un décideur, pourriez-vous confirmer que les zones vertes sont toutes favorables ? expliquez pourquoi	la géométrie	*non : zones vertes trop petites* *oui : zones fav mieux définies, pas épaisses, peu éclatées*
	la géographie (morphologie);	*non : zones vertes correspondant à des cours d'eau ou en montagne*
	la procédure	*oui, mais avec des analyses supplémentaires*
	la zone analysée	*oui : carte plus restrictive et discriminante qui délimite bien les différentes zones* *non: zones vertes pas toutes accessibles*
Q310. Comparer les trois cartes : laquelle est le plus apte à répondre au problème ? Pourquoi ?	pondérations et critères	*carte 2 : altitude importante, pondérations bien réparties* *carte 3 : importance de l'inclinaison des pentes et de l'altitude*
	géométrie et graphisme	*carte3: zones très nettes, bonne dimension, contraste, plus sélective*
Q311. Une fois la carte choisie, identifiez un ou plusieurs sites favorables à l'implantation d'un vignoble et argumentez.	site	*1 ou 2 site(s) = ha bien positionné*
	zone	*2 ou + zones : des trop grandes surfaces*

Tableau 24 *Les thèmes extraits pour le Questionnaire 3*

Dans le Q3 qui interroge sur l'analyse et l'évaluation de cartes d'aptitude données, on observe :

- au niveau des invariants opératoires (connaissances mobilisées pour évaluer une carte de synthèse), que les thèmes qui pilotent les choix sont d'ordre mathématique (pondérations et critères) et graphique (la géométrie et le contraste) ;

- au niveau des buts et des anticipations (relations entre les objets), les objets identifiés sont décrits selon leurs géométries, leurs caractéristiques géographiques ou géomorphologique, leurs dimensions et leur relation avec la réalité du terrain.

Les thèmes extraits des réponses écrites ont permis d'initier le travail sur les objets conceptuels et de faire une première liste des objets mobilisés par les étudiants.

1.2 Les résultats quantitatifs : les occurrences des types de réponses

Après avoir identifié les thèmes qui régissent, de façon globale, les invariants opératoires, les inférences, les règles d'action et les anticipations des tâches de reclassification, de pondération et d'analyse d'une carte d'aptitude, des réponses quantitatives peuvent être apportées aux hypothèses sur certains écueils de la procédure et par conséquent sur les difficultés des étudiants. Ces résultats quantitatifs sont issus du comptage d'occurrence des types de réponses pour un total de 65 réponses.

1.2.1 Analyse des réponses du Questionnaire 1.

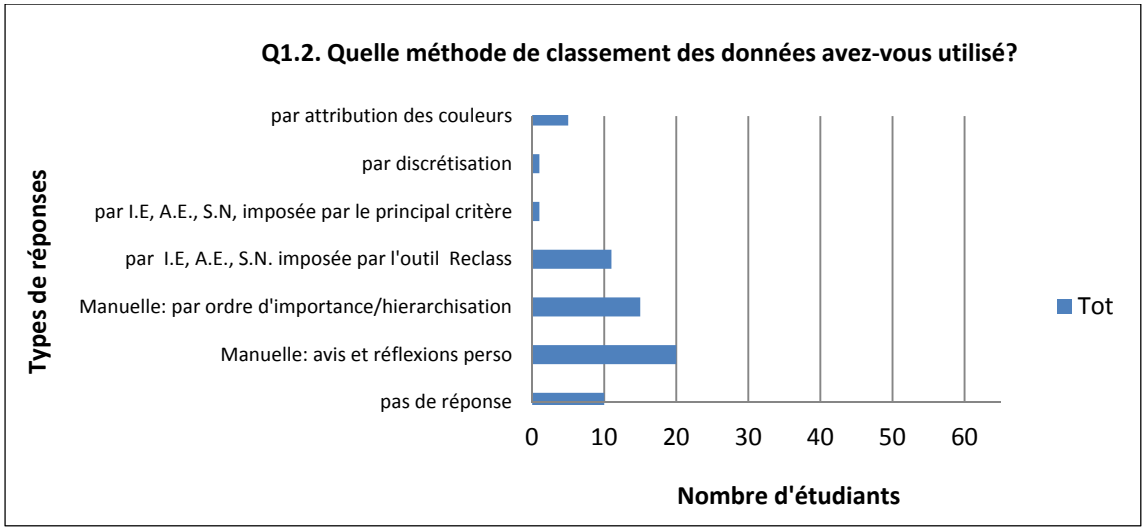


Figure 41 *Répartition des réponses relatives à la question Q1.2 sur le classement*

A l'hypothèse que « *la méthode donnée par défaut (manuelle) par le logiciel est prévalent; les autres ne sont pas mentionnées* », le graphique Q1.2 (Figure 41) montre que la méthode de classement (discrétisation) des données la plus utilisée par les étudiants est effectivement la méthode dite « Manuelle ». Cette méthode, comme les six autres, est proposée par le SIG ArcGIS 10.0 dans l'environnement Reclassification. La Figure 42 illustre la fenêtre de Reclassification avec toutes les méthodes mises à disposition.

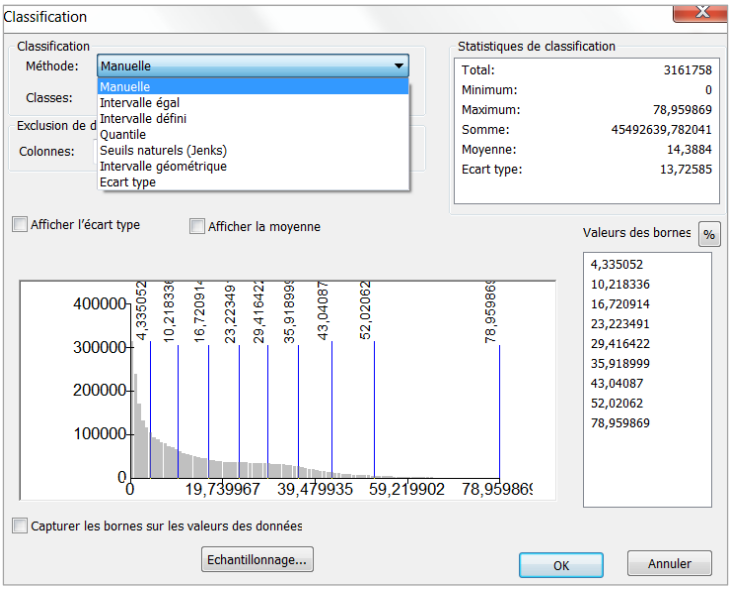


Figure 42 *Fenêtre de l'outil Reclassification dans ArcGIS 10.0*

Avec la méthode « Manuelle », l'étudiant peut régler les bornes des classes selon les besoins de sa classification. Le plus grand nombre de réponses à la question Q1.2 indique que les choix des étudiants pour la définition manuelle des classes sont dictés par des considérations personnelles ou par la nécessité de hiérarchiser les valeurs des données. D'autres méthodes sont également utilisées comme celles d'intervalle Egal ou les Seuils Naturels, guidées par les fonctionnalités de l'outil informatique. Les non-réponses sont significatives (15,4%).

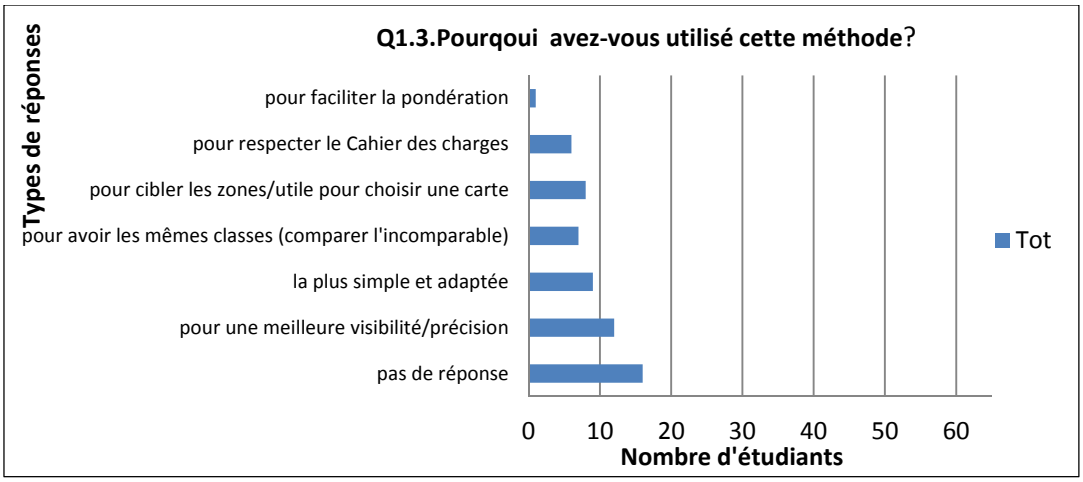


Figure 43 *Répartition des réponses relatives à la question Q1.3 sur la méthode de discrétisation*

A l'hypothèse sous-jacente de la question Q1.3, à savoir « *les propriétés de la méthode employée ne sont pas précisées* », le graphique Q1.3 (Figure 43) indique que le manque d'argumentation, représenté par les non-réponses, est récurrent (24,6%). Le choix d'une méthode est aussi justifié par rapport à la visibilité et la précision qu'elle fournit à la lecture de la carte, soit un critère esthétique. Les autres types de justification, comme sa simplicité d'application, l'adaptabilité aux spécifications du cahier des charges et à la standardisation des données présentent des occurrences assez proches.

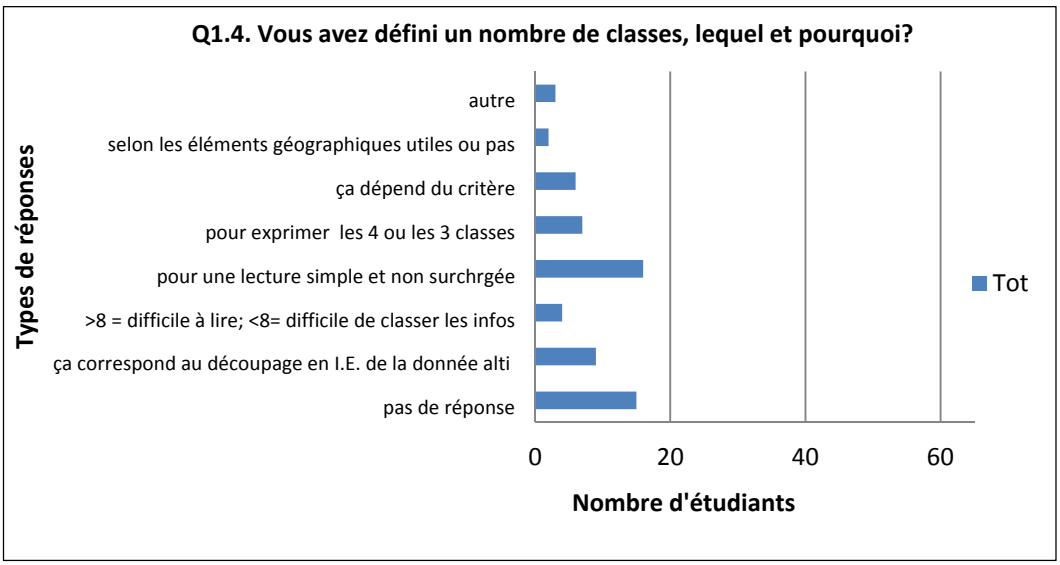


Figure 44 *Répartition des réponses relatives à la question Q1.4 sur le nombre de classes*

A l'hypothèse sous-jacente de la question Q1.4, à savoir « *les étudiants décident d'un nombre de classes et des seuils au hasard* », le graphique Q1.4 (Figure 44) montre que le choix du nombre de classes à définir est plutôt dicté par le besoin d'avoir une lecture simple et non surchargée de la carte (critère esthétique) (24,6%). Le nombre de classes varient de 3 à 8. Néanmoins, les non-réponses sur la justification du nombre choisi restent proportionnellement très importantes (23%).

1.2.2 Analyse des réponses du Questionnaire 2

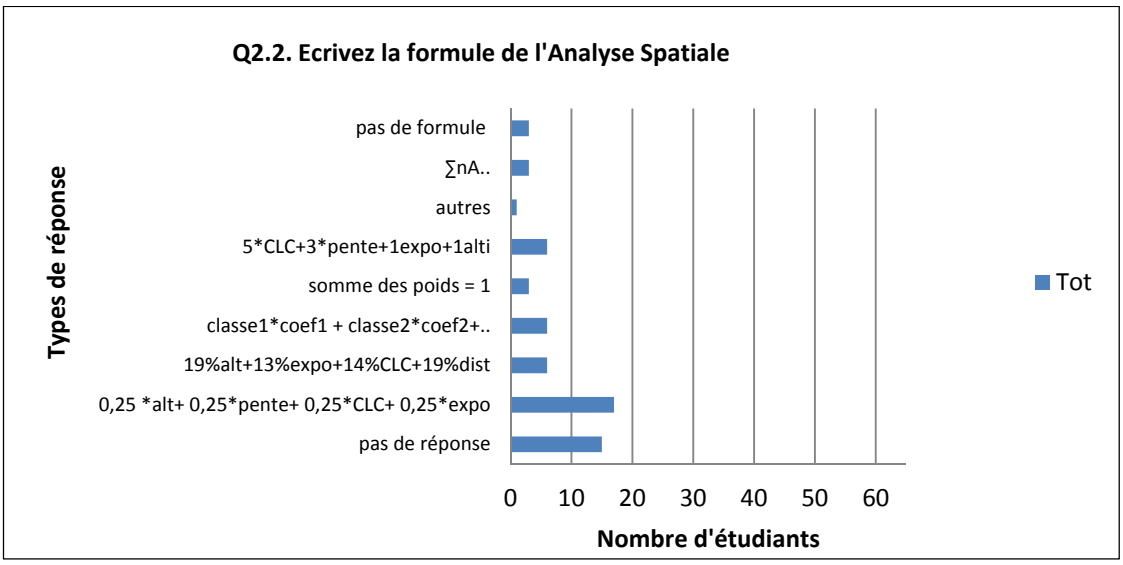


Figure 45 *Répartition des réponses relatives à la question Q2.2 sur la formule d'agrégation des critères*

Le graphique de la Figure 45 présente les réponses de la question Q2.2 correspondant à l'hypothèse selon laquelle *« les étudiants n'ont pas la capacité de mathématiser l'information géographique »*. Le type de réponse le plus récurrent est la formalisation de l'agrégation[16] des critères par la représentation des coefficients multiplicateur en décimaux et selon une répartition équiprobable. La distribution des poids aux critères est donc faite sur une échelle allant de 0 à 1. Les non-réponses sont significatives pour les géologues (46,7%), pour les groupes des ingénieurs elles correspondent à 17%. On observe un type de réponse indiquant qu'il n'y a pas de formule algébrique représentative.

[16] Le terme 'agrégation' est utilisé selon la terminologie de l'ASMC (voir Chapitre II)

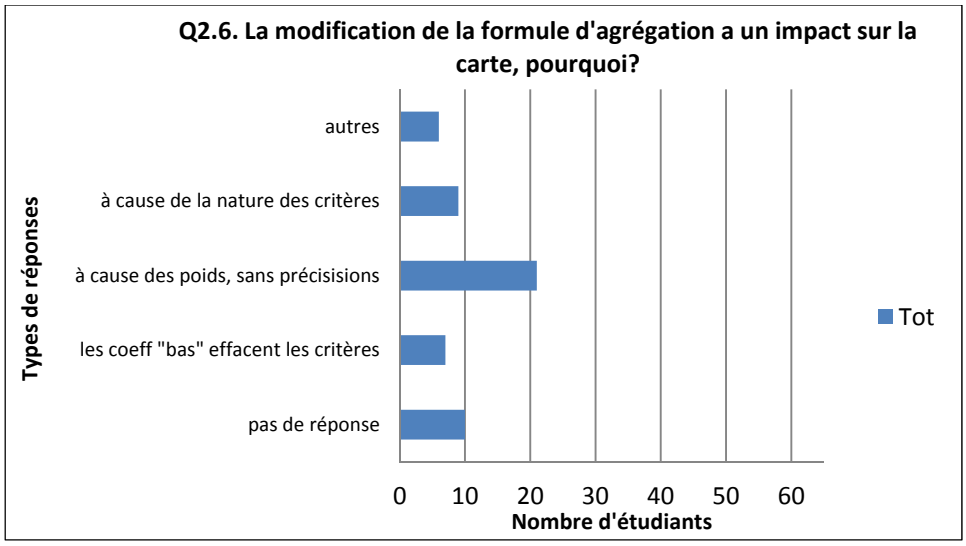


Figure 46 *Répartition des réponses relatives à la question Q2.6 sur la modification de la formule d'agrégation des critères*

A l'hypothèse sous-jacente de la question Q2.6, selon laquelle « *les étudiants n'arrivent pas à anticiper leur résultat sur la carte* », le graphique Q2.6 (Figure 46) montre que les étudiants arrivent à justifier les modifications des classes d'aptitude suite aux changements des poids des critères ; cependant, ils ne donnent pas de précisions sur l'impact du coefficient multiplicateur sur la distribution des valeurs dans les pixels. Les non-réponses restent toutefois relativement importantes (15,4%).

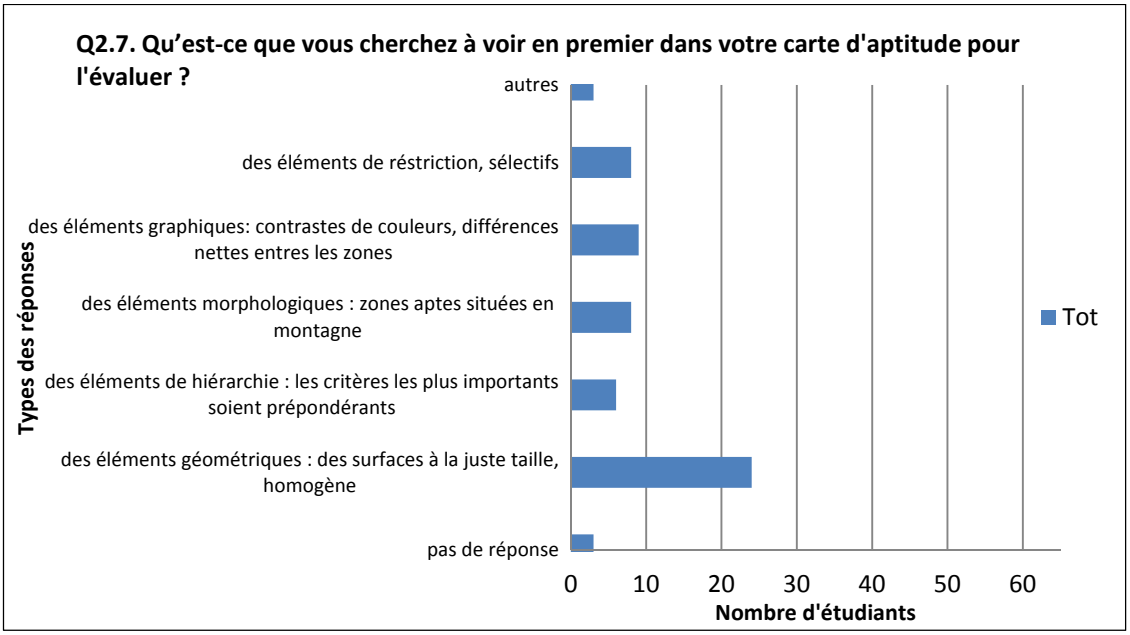


Figure 47 *Répartition des réponses relatives à la question Q2.7 sur la validation de la carte d'aptitude*

La question (Q2.7.) (Figure 47), de nature exploratoire, s'appuie sur l'hypothèse que « *les étudiants choisissent leur carte sur la base de l'étendue des zones* ». Le type de réponse le plus récurrent concerne les éléments géométriques : 36,9% d'étudiants évaluent leur carte à travers l'analyse des dimensions des zones favorables. La carte est valable lorsqu'elle propose une solution au problème d'identification de surface de domaine skiable.

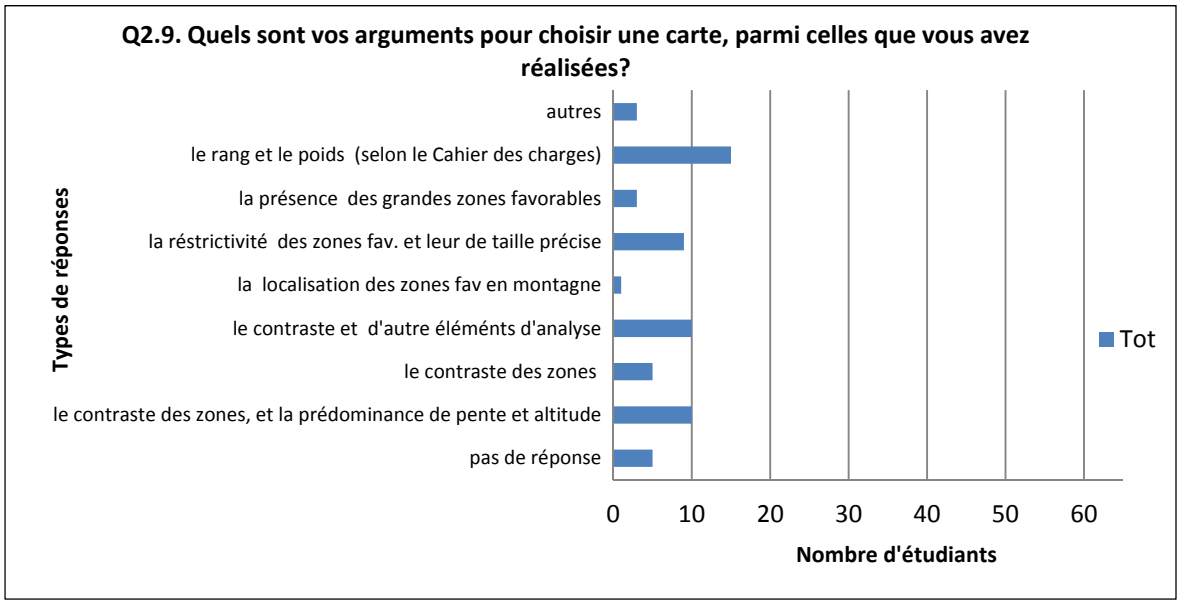


Figure 48 *Répartition des réponses relatives à la question Q2.9 sur le choix de la carte*

La question Q2.9 (Figure 48) confronte les étudiants au choix d'une carte parmi un nombre de cartes réalisées. Cette question est de nature exploratoire, elle s'appuie sur l'hypothèse que « *les étudiants choisissent leur carte sur la base de la combinaison des poids* ». L'argument de réponse le plus évoqué relève du respect du cahier des charges. Les étudiants choisissent la carte qui représente les conditions mathématiques (de seuils et de classes) établies dans le cahier des charges. Des aspects graphiques de contraste et de sélectivité sont également mentionnés.

1.2.3 Analyse des réponses du Questionnaire 3

A partir de la question Q3.2 les étudiants ne sont plus interrogés sur leurs propres productions cartographiques, mais sur des cartes d'aptitudes réalisées par un tiers. Ces cartes concernent une autre problématique, relative à l'implantation d'un vignoble en Isère. A travers le questionnement, les étudiants sont tenus à analyser visuellement ces cartes : les descripteurs d'analyse visuelle (Kraak, 2010), présentés en Chapitre V, sous-tendent chaque question.

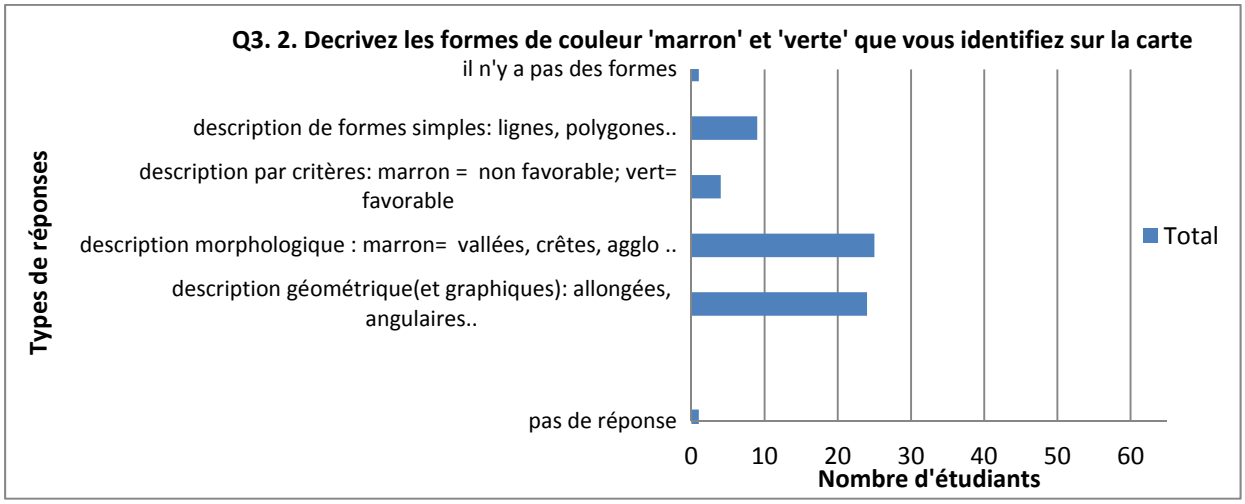


Figure 49 *Répartition des réponses relatives à la question Q3.2 sur la description des formes.*

La Q3.2 (Figure 49) interroge sur la capacité des étudiants à *identifier les formes et les objets.* Une majorité d'étudiants donne soit une description d'ordre 'morphologique' des formes observées (les zones de couleur correspondent à des formes orographiques), soit une description d'ordre géométrique (les zones de couleur correspondent à des formes géométriques caractérisées par des dimensions et une configuration -allongées, arrondies, angulaires..-). On observe que une faible proportion d'étudiants (6,1%) ont analysé les zones de couleur selon une approche par critères « favorables ou pas ».

Les questions Q3.8 (Figure 51) et Q3.9 (Figure 53) incitent les étudiants à justifier de la validité d'une carte. Deux cartes d'aptitude (a) (Figure 50) et (b) (Figure 52) sont respectivement proposées dans les deux questions. Les descripteurs visuels sous-jacentes veulent mettre en évidence la capacité à *récapituler les patterns, découvrir les corrélations et les conflits.*

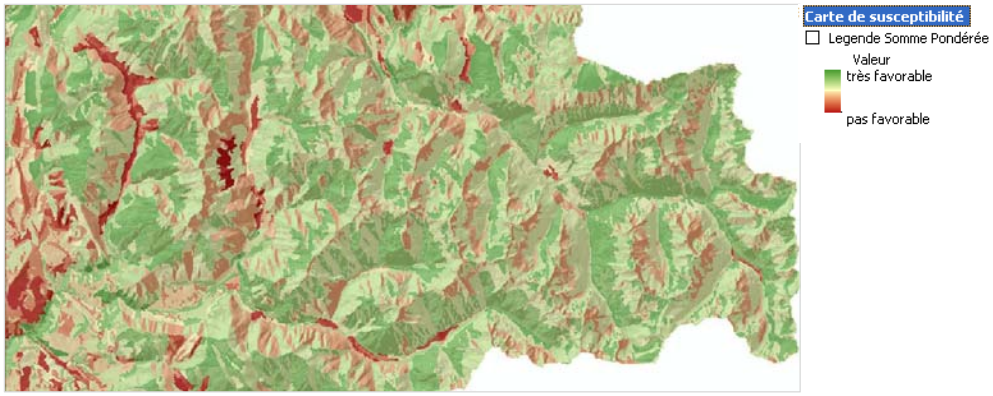


Figure 50 *Carte d'aptitude pour l'implantation d'un vignoble (a) présentant des vastes surfaces de zones favorables en vert foncé.*

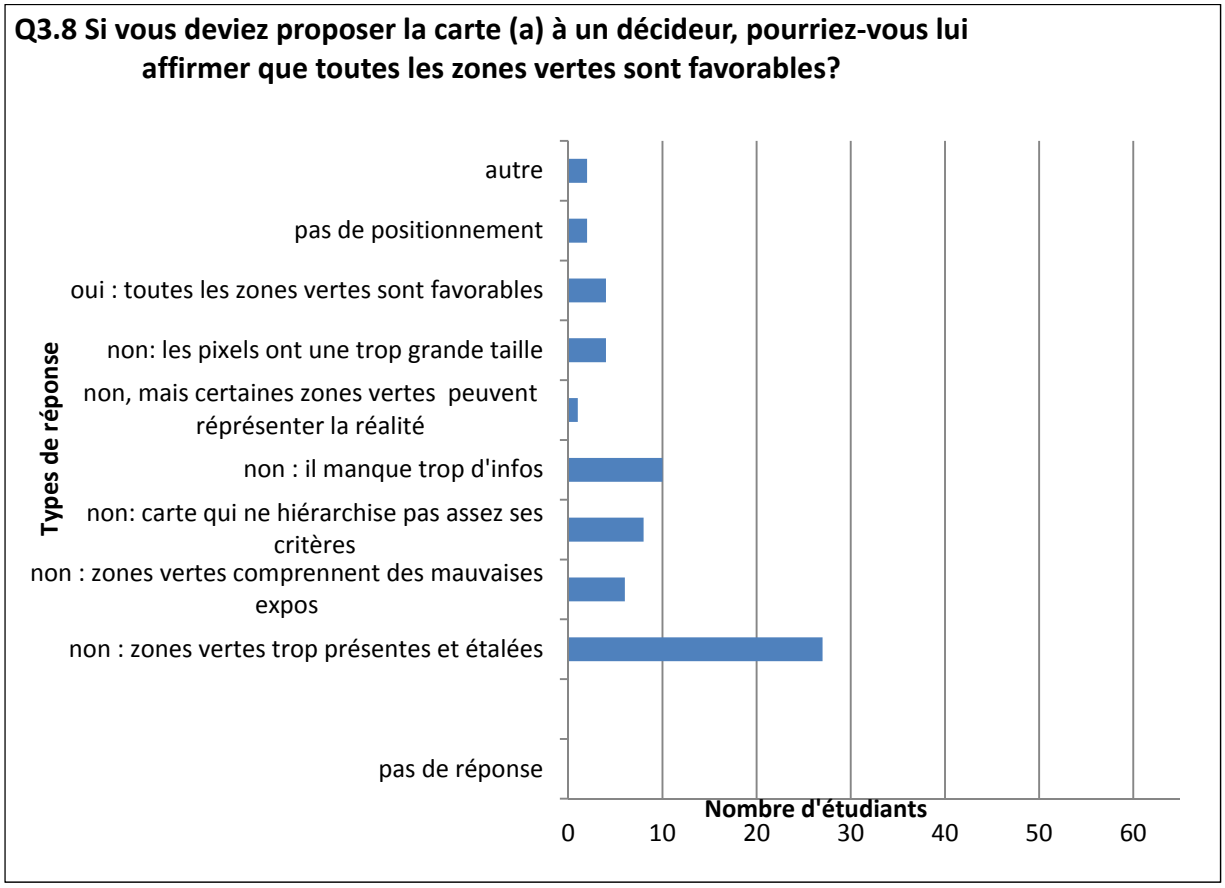


Figure 51 *Répartition des réponses relatives à la question Q3.8 sur la validation d'une carte (a)*

Une forte proportion d'étudiants (41,5%) hésite à affirmer que toutes les zones indiquées comme favorables peuvent l'être réellement. De façon générale, cette carte n'est pas validée

par les étudiants qui ont considéré la non sélectivité des zones favorables (vertes) : elles sont trop vastes et étalées pour pouvoir être propices partout.

La Q3.9 (voir Figure 53) pose la même question sur la carte sur la carte d'aptitude (b) (Figure 52)

Figure 52 *Carte d'aptitude pour l'implantation d'un vignoble (b) présentant des surfaces restreintes de zones favorables*

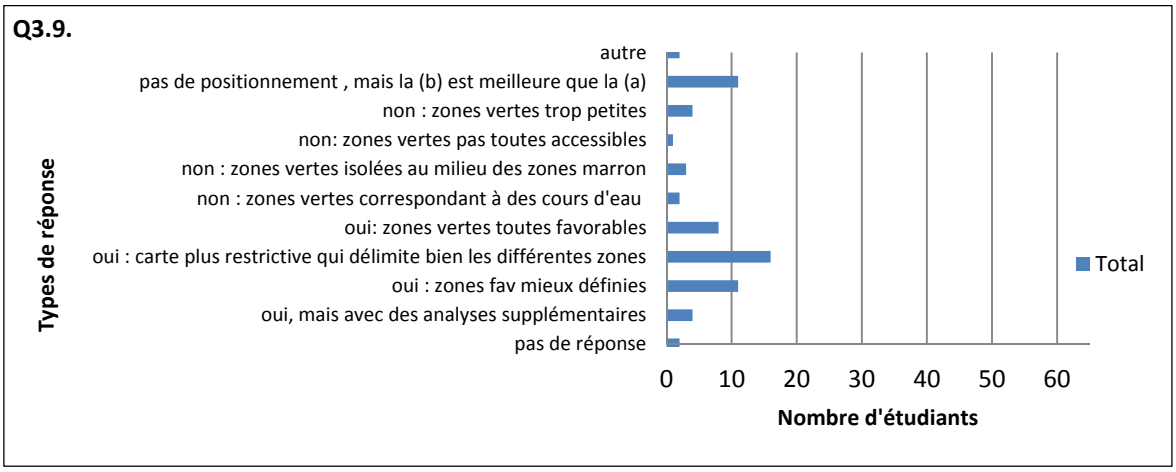


Figure 53 *Répartition des réponses relatives à la question Q3.9 sur la validation d'une carte (b)*

Les réponses des étudiants indiquent que la carte (b) est analysée selon sa sélectivité, étant donné qu'elle présente des zones propices à l'implantation du vignoble, plus restreintes et délimitées. L'analyse des patterns et des conflits est concluante au regard du fait que la plupart des étudiants estiment que les zones favorables proposées par cette carte sont crédibles. Néanmoins, 16,9% d'étudiants ne justifient pas leur choix, tout en reconnaissant la meilleure fiabilité de la carte (b).

La Q3.10 (Figure 55) incite une fois de plus les étudiants à faire et à justifier un choix. Trois cartes d'aptitude à l'implantation d'un vignoble, réalisées à partir des mêmes critères mais avec des pondérations différentes, sont présentées (Figure 54). Cette question informe sur les arguments, qu'ils soient visuels, mathématiques ou analytiques que les étudiants évoquent pour interpréter et évaluer une carte. Le Tableau 25 présente la répartition des pondérations affectées aux 3 cartes soumises à l'évaluation.

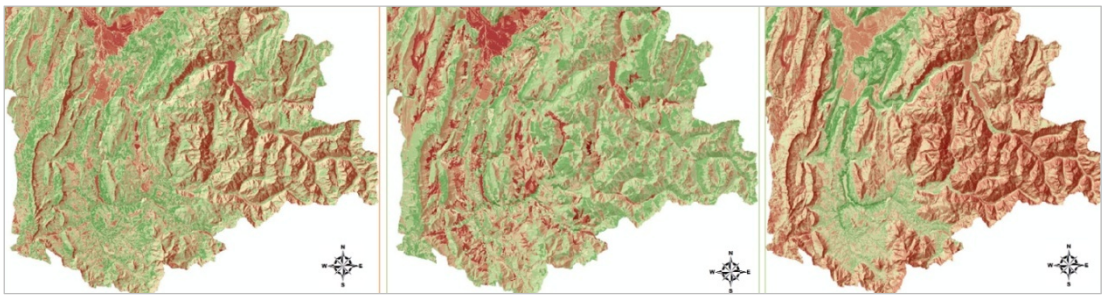


Figure 54 *Carte 1* *Carte 2* *Carte3*.

Les trois cartes soumises à évaluation

Critères	Pondérations		
	Carte 1	Carte 2	Carte 3
Inclinaison des pentes	5	0,5	3
Altitude	1,5	2,5	5
Exposition	3	3	1,5
Couverture au sol	0,5	4	0,5
Total	10	10	10

Tableau 25 *Pondérations attribuées aux critères pour les 3 Cartes de la Figure 51*

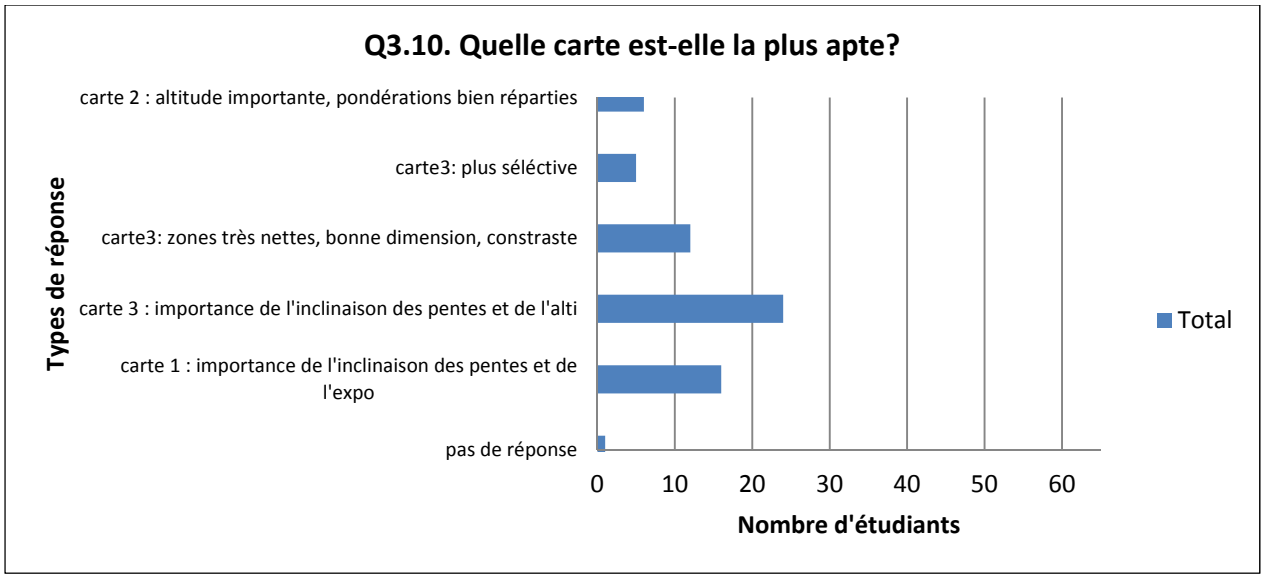


Figure 55 *Répartition des réponses relatives à la question Q3.10 sur les arguments de choix de la carte*

Les réponses des étudiants montrent que la plupart d'entre eux (36,9%) choisissent la carte 3 (Figure 54) essentiellement sur la base des spécifications des critères : les poids importants affectés à deux critères prépondérants, l'altitude et l'inclinaison des pentes. Le deuxième argument le plus récurrent parmi les réponses des étudiants est la saillance du contraste des couleurs. Cet effet visuel semble aider les observateurs à prendre une décision. Or, si le choix est donc dicté par la nécessité de répondre aux exigences physiques d'un vignoble, et le contraste des zones vert-marron est évident, le résultat cartographique de la carte 3 (Figure 54) ne répond pas aux besoins de sélectivité : les zones très favorables en vert foncé sont très vastes selon les seuils d'altitude définis.

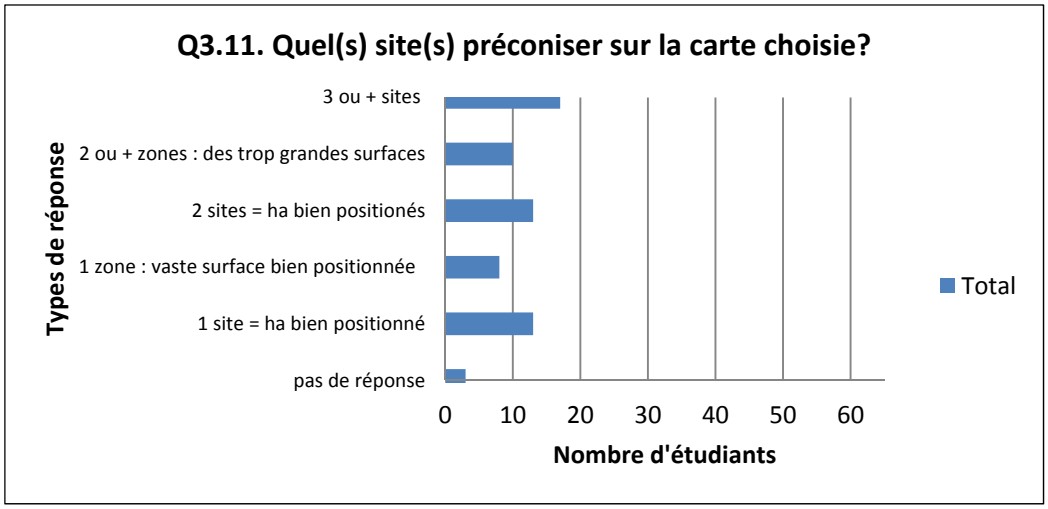


Figure 56 *Répartition des réponses relatives à la question Q3.11 sur la préconisation du site*

La préconisation du lieu final (Figure 56) pour l'implantation du vignoble montre deux types de formalisations : dans le premier type la délimitation des secteurs favorables est relativement précise, car les étudiants tiennent compte du dimensionnement imposés dans le problème (area < 100-150 > ha) : ceci est représenté avec un ou plusieurs sites en carré (carrés rouge en Figure 55). Dans le deuxième type de formalisation les délimitations sont vagues et approximatives (ovales rouges en Figure 54). Les Figures 57 et 58 présentent les deux stratégies. La localisation de site(s) en carrées est tout de même prédominante (20%).

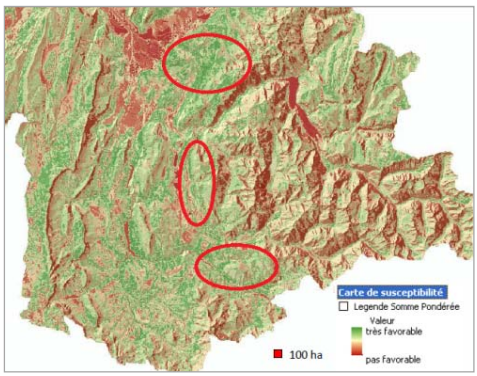


Figure 57 *Exemple de préconisation d'implantation de vignoble par 'ovales'*

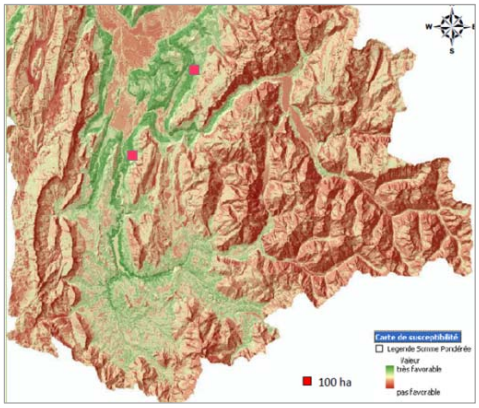


Figure 58 *Exemple de préconisation d'implantation de vignoble par 'carré'*

1.3 Bilan

Les résultats des analyses des données verbales écrites ont permis:

- sur le plan qualitatif, de dégager des thèmes généraux représentant les objets conceptuels mobilisés lors des 4 tâches observées.
- sur le plan quantitatif, d'identifier les tendances de mobilisation de ces thèmes par les étudiants. Comme précisé plus haut, les trois questionnaires s'appuient sur les composants

du schème d'activité de Vergnaud (1997) et enquêtent sur les invariants opératoires, les stratégies, les règles d'action, et les anticipations qui règlent les 4 tâches observées.

L'importance des non-réponses aux questions relatives aux règles d'action sur la formalisation des procédures d'agrégation met en évidence des lacunes et des difficultés en termes de mathématisation.

Le choix de la méthode de classement, qui relève des inférences et des anticipations, semble être guidé par une approche plus visuelle que mathématique, puisque une majorité d'étudiants considère qu'il ne faut pas « surcharger la carte ».

Le Tableau 26 résume les thèmes par tâche et par composante du schème d'activité (Vergnaud, 1990, voir Chapitre III).

Questionnaires	Invariants opératoires	Inférences	Règles d'actions	Anticipations
Q1 (T0)		xartographie algèbre procédure	méthode Manuelle Intervalles Egales et Seuils Naturels	lecture simple de la carte
Q2 (T1+T2)		la géométrie la hiérarchie des critères la géomorphologie la variable couleur la sélectivité de la carte	formule hiérarchique, en pourcentage, de l'équiprobabilité.	causes liées aux changements des poids et des effets au niveau de la géométrie des surfaces colorées
Q3 (T2+T3)	seuils et pondérations géométrie et sémiologie	la géométrie la géographie l'unité de mesure (pixel) les critères la procédure		

Tableau 26 *Synthèse des thèmes présentés selon les composantes du schème d'activité de Vergnaud (1990).*

Les résultats peuvent également être interprétés en termes de difficultés des étudiants. :
- *pour la tâche de reclassement (Q1),* les difficultés semblent être de type « règles d'actions » et « invariants opératoires » : elles se manifestent par un manque de règles d'action ou par des

actions uniquement guidées par le logiciel, une absence totale de justifications montrant une absence de réinvestissement des connaissances préalablement acquises ou se référant à la littérature. L'appel aux statistiques est limité. ;
- *pour les tâches de pondération et d'analyses des cartes résultantes (Q2),* on note des difficultés au niveau des « invariants opératoires » et des « anticipations » : il n'est pas fait référence à des connaissances antérieurs ou à la littérature, et l'impact d'un changement de poids n'est pas anticipé. (32,3%) De plus, l'appel aux mathématiques est limité (par exemple, 27,7% d'étudiants sont capables de restituer une formule simple de moyenne pondérée) ;
- *dans les tâches d'analyse visuelle sur les différentes productions cartographiques (Q3*), les difficultés se manifestent par une faible maitrise des représentations géométriques des formes et des objets, ce qui impacte sur la reconnaissance des anomalies spatiales. Ces lacunes semblent avoir des répercussions sur le dimensionnement d'objets géographiques (surfaces aptes), sur le raisonnement visuel nécessaire à la résolution du problème (sites aptes), et sur la validité du résultat.

Deux autres remarques peuvent conclure cette analyse :

- d'une part les étudiants semblent détourner la complexité du problème en raisonnant sur un nombre restreint de critères (1 ou 2 en oubliant les autres) ;
- d'autre part nous observons une réticence de la part des les étudiants à s'appuyer sur des arguments dits subjectifs : ils ne font pas de choix tranchés sur les poids et préfèrent rester très proche de l'équiprobabilité.

2. Les résultats des données verbales (orales)

Les résultats des données verbales issues des enregistrements constituent l'apport le plus significatif de notre démarche de recherche exploratoire. Les analyses conduites selon le protocole de Chi (1997) et selon les techniques d'analyse lexicale d'Andreani et Conchon (2005) ont donné lieu à des résultats qualitatifs et quantitatifs que nous détaillons ci-après.

2.1. Les résultats qualitatifs

L'analyse du corpus des données a été organisée selon un schéma de codage dont nous rappelons l'architecture en Figure 59 (voir Chapitre VI). Ce schéma de codage est dépendant de la nature des données brutes, qui correspondent aux verbatims des étudiants. Par conséquent, les résultats des analyses sont à leur tour organisés selon l'architecture descendante du schéma de codage. Nous rappelons qu'une tâche se définit pour un ensemble d'actions, sur lesquelles peuvent être appliquées des opérations, dont celles de contrôle. Les opérations mobilisent un ou plusieurs objets, chacun caractérisé par plusieurs descripteurs.

En allant du niveau global au niveau détaillé, le recensement de tous les types d'actions effectuées, l'identification des contrôles et des objets conceptuels constituent l'issue qualitative des analyses verbales.

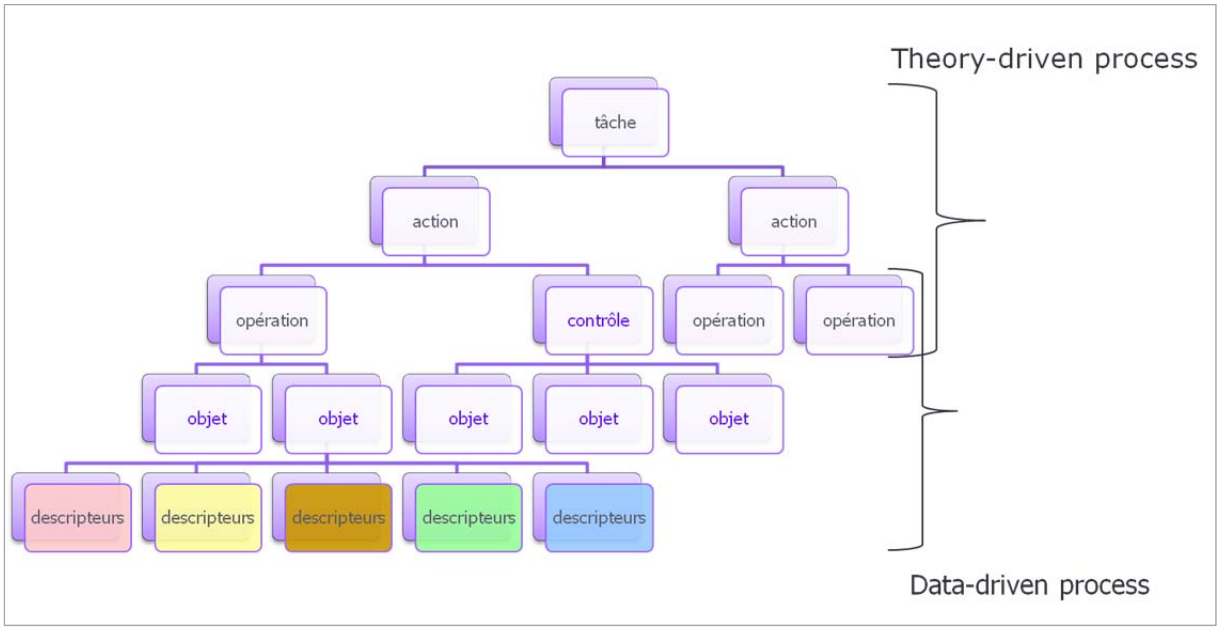


Figure 59 *Schéma de codage pour constituer la taxonomie*

A partir de la segmentation du corpus (voir Chapitre VI), nous avons formalisé les séquences des actions effectuées par les experts et les étudiants tout au long du processus cartographique. Les segments du corpus qui présentaient les mêmes caractéristiques ont été groupés sous la même appellation et le même code, nous permettant de constituer un répertoire d'actions. Au niveau des opérations et des objets conceptuels, là où le degré d'analyse est plus fin et complexe, en nous appuyant sur les recommandations de Chi (1997), nous avons établi des catégories. Chaque catégorie est caractérisée par des descripteurs. Cet ensemble constitue notre taxonomie. Bien que les catégories taxonomiques soient simplistes et ne révèlent pas toute la complexité du formalisme qui sous-tend le développement du schéma de codage (Chi, 1997), elles fournissent un panorama des composantes du processus cognitif et facilitent le dénombrement de telles composantes. Aussi, la reconstruction de toutes ces composantes permet de tracer des schémas de résolution que nous entendons comme étant « la séquence des états du problème que le sujet entreprend en appliquant des opérateurs » (Newell et Simon, 1972).

2.1.1. Le répertoire d'actions.

A l'intérieur d'une tâche, les actions constituent le grain le plus gros de l'activité et chacune est concrétisée par une ou plusieurs opération(s). Toutes les actions des processus de solution experts et étudiants ont été répertoriées. Au total, 30 actions ont été codées. Le tableau 27 présente le répertoire des typologies des actions listées pour les tâches de reclassement des données (T0) et de pondération des critères (T1) ; le tableau 28 présente les actions relatives aux taches d'analyse des cartes pondérées (T2) et du choix du site (T3).

T0= reclassement des données		T1= Pondérations et agrégations	
T00	Dévolution du problème	T11	Pondérations (en%) et calculs
T01	Définition de l'exclusion	T12	Vérification
T02	Uniformisation des données	T13	Choix de la palette de couleurs
T03	Vérification/Contrôle	T14	Ajout de masques
T04	Définition des seuils et des classes	T15	Pondérations d'équiprobabilité
T05	Création de données dérivées	T16	Extraction de valeurs max
T06	Attribution des couleurs	T17	Comparaisons entre sommes pondérées
T07	Ajout de critères	T18	Modifications importantes des pondérations
T08	Choix d'un critère pilote pour le classement		
T09	Analyse des corrélations entre critères		
T10	Définition d'une méthodologie		

Tableau 27 *Répertoire des Actions en T0 et en T1*

T2= analyse des cartes sommes		T3= choix du site	
T21	Vérification et repérage de conflits	T31	Ajout de critères supplémentaires
T22	Usage d'effets visuels	T32	Vérification sur lieux géographiques
T23	Comparaisons	T33	Choix en fonction du paramètre -dimension- du problème
T24	Ajout de critères géographiques	T34	Sélection de meilleures valeurs, reclassement
T25	Choix d'une carte selon la géométrie et la distribution des zones aptes		
T26	Choix d'une carte selon la visibilité et le contraste		
T27	Choix d'une carte selon un prédominant		

Tableau 28 *Répertoire des Actions T2 et T3*

Le répertoire des actions permet de reconnaitre et isoler chaque action tout au long de la procédure, et ce aussi bien pour les experts que pour les groupes d'étudiants. Le codage permet dans un deuxième temps de procéder, via les tableaux croisés dynamiques, au comptage des occurrences d'action pour chaque procédure.

2.1.2. Les catégories des opérations de contrôle

Chaque action est caractérisée par des opérations : nous avons observé que les opérations sont essentiellement de nature algébrique lorsqu'il s'agit d'effecteur des calculs ou d'utiliser des fonctionnalités de requêtes et sélection, de nature sémiologique lorsqu'il s'agit d'attribuer la couleur aux classes des données, de nature théorique lorsqu'il s'agit de réfléchir à la procédure et aux stratégies à mettre en œuvre, et de contrôle lorsqu'il s'agit d'anticiper les résultats ou de résoudre des impasses et des erreurs.

Nous nous sommes intéressés particulièrement *aux opérations de contrôle*. Nous avons catégorisés les contrôles-erreurs en nous basant sur la théorie d'Ohlsson « Learning from Error » (1997). En effet, nous pouvons relier « l'activité de cartographie d'aptitude à la catégorie des tâches de choix (décrite par Ohlsson), caractérisée par la sequentialité, la multiplicité et le résultat. Une action est toujours le résultat d'un choix parmi un ensemble de possibilités. Ce choix est guidé par des règles, des inférences, qui génèrent l'action. Les inférences ont le rôle de sélectionner les actions par rapport aux types de problème et à l'objectif à atteindre. Si les règles ne sont pas assez définies et précises et si elles restent génériques, alors elles s'adaptent à trop de situations et appellent des actions non pertinentes. La théorie des Erreurs d'Ohlsson, souligne que la raison pour laquelle des options incorrectes sont activées est que les conditions d'applicabilité des règles initiales ont un recouvrement trop général. Pour détecter une erreur, le sujet doit avoir conscience des conséquences sur le milieu, appelées « signaux d'erreur ». Dans certains domaines, l'interprétation des signaux d'erreurs implique une connaissance profonde du domaine. Une recommandation que l'auteur suggère est la spécialisation : restreindre les conditions d'applicabilité d'une règle à un contexte ou à des situations bien balisées. Une fois la situation et les règles de choix limitées, le sujet peut corriger l'erreur. Puisque la connaissance guide l'action, corriger une erreur permet d'améliorer une future performance par l'application d'une structure cognitive appropriée » (Ohlsson 97, traduction libre).

En nous appuyant sur les notions de choix et d'inférences détaillées par Ohlsson, nous avons pu caractériser trois catégories de contrôles d'erreurs.

1. *Les contrôles par vérification*. Ces opérations permettent de valider ou d'anticiper un choix, par exemple en comparant la même zone sur plusieurs cartes ou à la nature du terrain ou en vérifiant les résultats algébriques via la lecture de la légende. Cette catégorie est décrite par 5 descripteurs, présentées dans le tableau 29.

Codes	Descripteurs	*Exemples de Verbatim*
CV1	Validation	*« vu que on a beaucoup multiplié, les valeurs vont jusqu'à 23, je vais faire 4-5 classes » [e2]*
CV2	Anticipation	*« là c'est la CLC qui domine et elle devrait appuyer « glacier et neige » et « espaces naturels ouverts » [g1]*
CV3	Comparaison	*« fort heureusement les zones sont les mêmes (bonnes zones sur les deux cartes) » [e3]*
CV4	Morphologique	*« tout ce qui est Vercors reste en rouge et pourtant ce n'est pas si haut, est-ce que sont les falaises? Quoi que si, c'est haut »[e1]*
CV5	Notionnel	*« les valeurs de l'ombrage vont de quoi à quoi ? » « de 0 à 254 » « et ça correspond à quoi ? » « à la luminosité » « et ça sert à quoi?»[g2]*

Tableau 29 *Descripteurs relatifs aux opérations de contrôles par vérification*

2. *Les contrôles par diagnostic*. Ces opérations permettent de reconnaitre les sources d'erreur (*blame assignement*, Olhsson, 1997, p.425), telles l'usage non approprié d'une fonctionnalité, d'une requête, ou de la définition non approprié de seuils des classes ou de l'attribution des poids aux critères (voir tableau 30).

Codes	Descripteurs	*Exemples de Verbatim*
CD1	Divergence	*« il n'y a pas un problème avec la couleur ? ça veut dire quoi ça ? c'est bizarre ! [g2]*
CD2	Fonctionnalité	*« mais qu'est ce qu'il (l'outil Pente) m'a fait ? 112% ?? » [e3]*
CD3	Algèbre	*« je me sui trompé quand j'ai écrit.. je la refais encore une fois , je mets les parenthèses à l'expression ..je ne sais plus si c'est ET ou OU, il l'a fait mais tout est à 0 »[e1]*
CD4	Evaluation	*« il y a un problème là, on a toujours la même chose ça ne veut rien dire! Stop ! on a tout faux ! c'est celui-ci qui est mal classé »[g2]*
CD5	Sémiologie	*« c'est beaucoup mieux, mais nous le mieux est en vert, c'est renversé »[g2]*
CD6	Gestion	*« il y a des petits changements » « l'ombrage est où par exemple ? » « je cherche je ne sais pas où il enregistre par défaut » [g3]*

Tableau 30 *Descripteurs relatifs aux opérations de contrôles par diagnostic*

3. *Les contrôles par correction*. Ces opérations permettent d'intervenir sur l'erreur, par exemple en modifiant la fonctionnalité, l'expression, l'ordre des classes ou la hiérarchie des critères (Tableau 31).

Codes	Descripteurs	*Exemples de Verbatim*
CD1	Divergence	*« on remet l'ombrage juste pour vérifier que c'est vraiment l'orientation qui nous pose des problèmes» [g2]*
CD2	Fonctionnalité	*« maintenant j'essaie de prendre en compte les réservoirs d'eau avec l'outil distance. Je mets la couche pente comme raster de coût..non, ça n'a pas marché. Je prends la distance euclidienne.» [e3]*
CD3	Algèbre	*« ah..ce n'est pas le bon fichier en entrée, je fais des bêtises..il ne le veut pas non plus, c'est peut-être un problème de parenthèses» [e1]*
CD4	Evaluation	*« Ok ce n'est pas réaliste, il faut ajouter des classes, j'en fais 30 » [e3]*
CD5	Sémiologie	*« j'ai inversé la palette de couleurs »[e3]*

Tableau 31 *Descripteurs relatifs aux opérations de contrôles par correction*

Les descripteurs identifiés et codés, nous pouvons procéder à leur dénombrement.

2.1.3. Les catégories des objets conceptuels

A ce niveau, notre taxonomie est composée de 5 catégories, chacune représentative d'un objet conceptuel. Chaque objet est décliné par des descripteurs auxquels on a attribué un code. Il s'agit de :

L'objet *algébrique* : il rassemble tous les éléments verbaux relatifs au domaine du traitement statistique ou mathématique de l'information géographique. Cet objet est caractérisé par six descripteurs (tableau 32). Bien que les descripteurs de cet objet soient exclusivement issus des données analysées (data-driven process), nous nous appuyions sur la notion d'algèbre de cartes (Tomlin, 1990 in Egenhofer, 1997) pour confirmer la catégorie : « l'algèbre de cartes est constituée de variables, d'expressions, et de fonction arithmétiques, de puissance, exponentielles et logarithmiques booléens, combinatoires, relationnels et conditionnels, etc.. ».

Codes	Descripteurs	Exemples de Verbatim
A1	exclusion, sélection booléenne	*« on peut dans un premier temps exclure certains choses, faire un masque : la pente on va dire comprise entre 15° et 60° et l'alti entre 1000 et 3000 m »[e1]*
A2	seuils, nombre et ordre des classes, discrétisation, synthèse	*« quelle échelle pour les classes, je ne me rappelle plus..1,2,3? Je vais faire hiérarchique..»[e1*
A4	hiérarchie des critères, représentation des poids	*« donc l'alti est important, 3, la Pente aussi, 3, la distance, 2, l'orientation, 1. Je vais le faire en %, ça sera plus facile à interpréter »[e1]*
A5	somme pondérée, combinaisons	*« essaie une avec alti » « 40 (A) plus 30 (P) plus 20 (E) et plus 10 (CLC) »[g1]*
A6	mesures (aires, périmètres, pixel)	*« on pourrait choisir par rapport à la surface: définir un nombre minimal de pixel, vectoriser pour calculer l'area.. »[e1]*
A7	intersections vectorielles	*« pour croiser les données on va utiliser des outils d'intersection.. »[e2]*

Tableau 32 *Descripteurs de l'objet « algébrique »*

L'objet *couleur :* il rassemble tous les éléments verbaux relatifs au domaine de la variable visuelle couleur, qui est une des principales variables nécessaires à l'interprétation d'une carte d'aptitude. Cet objet comporte cinq descripteurs. Bien que ces derniers soient exclusivement issus des données analysées (data-driven process), nous nous appuyions sur les notions de discrimination, de contraste (MacEachren, 2005) et de propriétés et d'usage de la couleur – ton, luminosité et saturation- (TLS) (Cauvin et Al., 2007) pour corroborer notre catégorie. Le Tableau 33 présente la catégorie de l'objet Couleur.

Codes	Descripteurs	Exemples de Verbatim
V1	le ton et la valeur	*« les couleurs sont bien choisis, car le rouge indique « le haut, le fort », le vert le faible » [e2]*
V2	le contraste, la dissociation et le dégradé	*« quelle carte est la plus nette ? Là c'est la plus nette, il y a beaucoup de bleu qui ressort, l'autre est plus flou mais il y a moins de bleu » [e3]*
V3	l'harmonie des couleurs (la palette)	*« pour le raster SP1 je choisi la palette Bleu-Jaune-Rouge » [e3]*
V4	les contours et la géométrie	*«la (carte) T3 a des variations de couleur et des limites trop brutales» [g1]*
V5	l'affichage et la transparence	*« c'est au niveau des transparences que tu peux jouer, mais des transparences sur du noir et blanc »…siffle [g3]*

Tableau 33 *Descripteurs de l'objet « couleur »*

L'objet *orographique* : il rassemble tous les éléments verbaux relatifs à la description géomorphologique du terrain. Cet objet comporte cinq descripteurs (tableau 34), identifiés à partir des verbatims (data-driven process) et des notions de perception de profondeur décrites par les indices physiologiques (humains) et picturaux (techniques) proposées par Kraak (1989) (theory-driven process). En effet, l'identification de notre objet *orographique* relève de la capacité de l'observateur à percevoir et à nommer les caractéristiques du relief sur des fonds de carte. La capacité de perception est fortement dépendante des indices picturaux liés à la structure de l'objet : par exemple, les ombres, la texture et la couleur ont une incidence sur la manière dont un objet est perçu par l'œil humain (Cauvin et Al. 2007). La deuxième capacité est plutôt de type heuristique et est liée aux connaissances du milieu (montagnard, à l'occurrence) propre à l'observateur.

Codes	Descripteurs	Exemples de Verbatim
R1	toutes les références aux connaissances du milieu (alpin)	*« l'Alpes du Grand Serre est 10 fois moins enneigé que le Col de Porte qui est encaissé » [g1]*
R2	la nomenclature courante : montagne, plaine, vallée, versants	*« on n'a rien en montagne et tout en plaine » [g2]*
R3	la nomenclature spécialisée : crête, talweg, cône	*« je ne crois pas qu'il soit bon de traverser une zones rouge, ça veut dire que tu traverses un talweg, une vallée » [g3]*
R4	les représentations du relief : courbes de niveau ou MNT	*« on n'a pas une carte des isolignes ? [g1]* *« je vais faire un ombrage pour voir le relief.. »[e1]*
R5	la lithologie, la falaise	*« il (le calcul) enlève les falaises, mais regarde au Saint-Eynard il les laisse (en vert) et c'est trop raide.. »[e1]*

Tableau 34 *Descripteurs de l'objet « orographique »*

L'objet *géographique* : il rassemble toutes les expressions relatives aux entités géographiques de la région analysée. Cet objet comporte 6 descripteurs (tableau 35). Nous l'appelons 'géographique' car dans notre contexte expérimental, nos sujets, non-spécialistes en géographie, ont défini comme critères « géographiques » de l'analyse d'aptitude, tous ceux étant liés aux infrastructures, à l'urbanisation, à la couverture du sol à l'échelle locale. Nous avons également inclus dans cette catégorie toutes les expressions relatives aux représentations cartographiques des entités (cartes topographiques, BD Topo...).

Codes	Descripteurs	Exemples de Verbatim
G1	les lieux connus : stations de ski, villes, localités..	*« en dessus de 2000 il reste plus grande chose, là tu vois le Vercors il n'y a plus rien, il reste l'Oisans, Belledonne, Les Grandes Rousses et le Taillefer… je connais bien ! » rire [e2]*
G2	le réseau routier	*«regarde juste les routes » [g2]*
G3	le réseau hydrographique	*« parce que là tu es à côté de l'eau, tu peux mettre des pompes » [g5]*
G4	les représentations : carte Topo, carte de fond	*« il me faut un fond de carte, je mets le Scan 100 » [e2]*
G5	les espaces verts : forêts, espaces protégés	*« il me faut les espaces protégés » [e2]*
G6	les infrastructures : remontées mécaniques	*« tu ne peux pas mettre tes remontés comme ça tout le long de ton truc, et comment tu fais pour redescendre, il faut des trucs qui convergent vers les remontées » [g3]*

Tableau 35.*Descripteurs de l'objet « géographique »*

L'objet *zone analysée* : il rassemble toutes les expressions qui montrent l'observation d'une ou plusieurs zones dans un but d'évaluation de l'aptitude. Cet objet est le plus abstrait des objets conceptuels catégorisés. Il se réfère à l'unité d'analyse (d'observation, spatiale, géographique) (Cauvin et Al., 2007) : il s'agit des classes d'aptitude, qui sont le résultat des sommes pondérées moyennées, et sont caractérisées par des formes étalées et des dimensions variées, des couleurs, indiquant la valeur obtenue pour chaque cellule (pixel). L'analyse des classes d'aptitude, spatialement indiquées comme zones, passe par différentes stratégies : l'observateur effectue un travail de synthèse en récapitulant les agréations, il compare la présence ou l'extension des mêmes zones sur plusieurs cartes pondérées, cherche des conflits, des effets de seuils ou des anomalies en vérifiant la nature du terrain. Cet objet conceptuel est mobilisé par l'observateur lorsqu'il doit prendre une décision et évaluer l'aptitude. Cette évaluation se concrétise à travers 6 descripteurs. Le Tableau 36 présente la catégorie de l'objet zone analysée.

Codes	Descripteurs	Exemples de Verbatim
An1	zone observée et correspondance entre les critères, les poids et les buts du problème	*« quand les pentes sont très inclinées il faut que leur poids soit moins important » [e1]*
An2	zone observée et correspondance avec la légende, les couleurs et les valeurs	*« on a la valeur 8 (légende) en blanc et 1 en noir, low c'es pas bien et high c'est bien » [g3]*
An3	zone observée et correspondance avec la nature du terrain	*« là c'est Bourg d'Oisans, les 2 Alpes…d'ailleurs regarde, c'est là (Zoom) et c'est en vert! »[e1]*
An4	zones observées et sélectivité de la carte	*« cette carte a un peu moins de zones en rouge, plus précise, c'est un peu mieux, puis il y a celle-là qui rajoute des zones, tu vas la le truc là ça va augmenter, donc pas celle-ci » [g5]*
An5	zones observées comparées sur différentes cartes de susceptibilité	*« l'autre est plus flou mais il y a moins de bleu, ça restreint plus les zones et fort heureusement les zones sont les mêmes (bonnes zones sur les deux cartes) » [e3]*

An6	zone observée et besoin d'informations supplémentaires	*« là on est sur pas mal de zones en vert, c'est difficile, il faudrait faire encore un masque avec les zones à plus hauts valeurs et puis comparer avec la couche éboulis et espaces protégés » [e1]*

Tableau 36 *Descripteurs de l'objet « zone analysée »*

La formalisation des ces catégories a permis de manière générale de mettre en lumière la connaissance des concepts et les stratégies de contrôle mobilisées lors de cette activité, ainsi que de distinguer et nommer chaque élément du processus cognitif afin de pouvoir entreprendre les analyses quantitatives.

2.2 Les résultats quantitatifs

Les résultats quantitatifs sont issus du dénombrement dans les grilles d'analyse (voir Fichier Excel de l'Annexes VI) de chaque élément du processus cognitif pour les 9 profils des sujets observés : 3 experts (e1, e2, e3) 3 groupes d'étudiants géologues (g1, g2, g3) et 3 groupes d'étudiants ingénieurs (g4, g5, g6). Le dénombrement a été formalisé dans des tableaux croisés dynamiques ce qui a permis les calculs des occurrences des actions, des opérations de contrôle et des objets.

Les résultats des dénombrements sont présentés ci-après par tache et par profil.

2.2.1 Analyse de la tâche T0 : standardisation et classement des données.

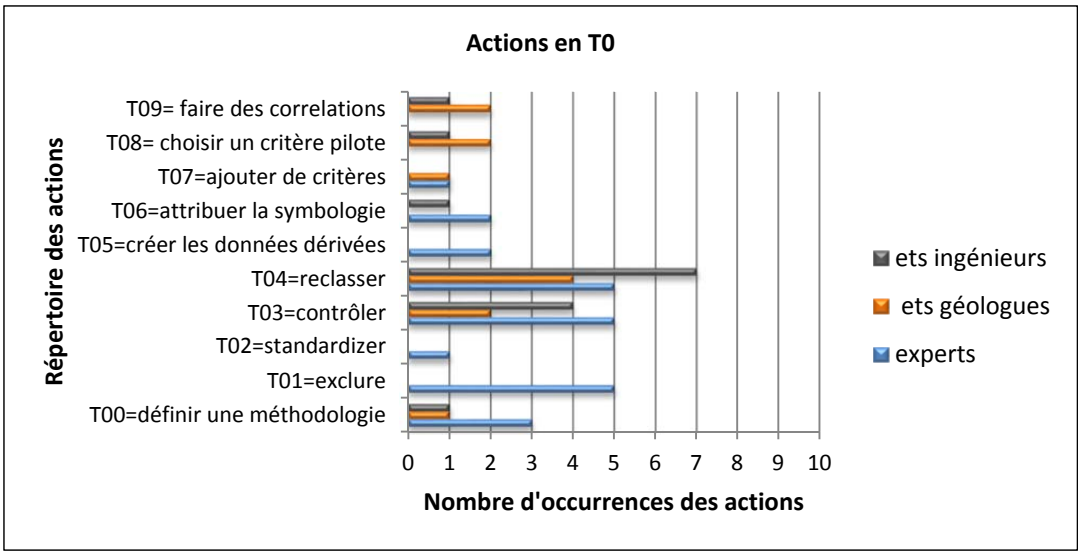


Figure 60 *Nombre d'occurrences d'actions en T0*

La Figure 60 montre que l'action *T00* est nettement plus active chez les experts que chez les étudiants et la *T01* et la *T02* sont effectuées exclusivement par les experts. Ces trois premières actions de préparation et planification de la démarche de résolution marquent une différence importante entre les experts et les étudiants ; qui semble influencer toute la suite de la procédure. Les étudiants ingénieurs se concentrent sur la définition des classes, tandis que chez les étudiants géologues on remarque la recherche d'un critère dominant qui impose la démarche de classement pour les autres critères.

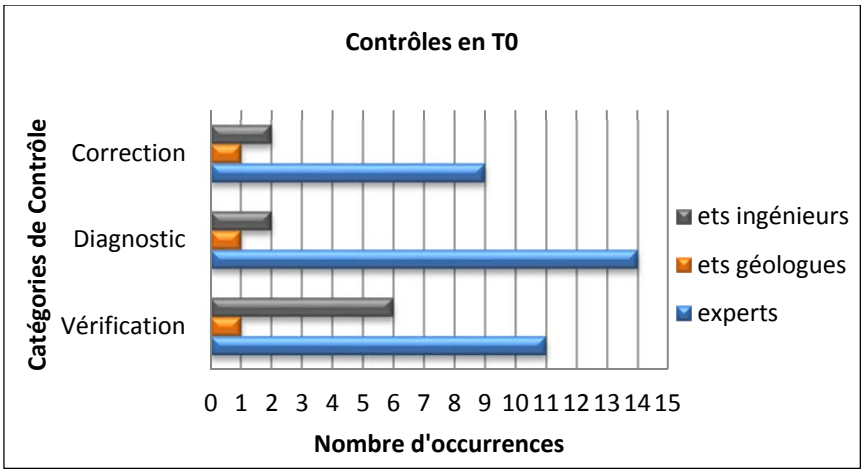


Figure 61 *Nombre d'occurrences de contrôles en T0*

La Figure 61 montre que dans cette phase les contrôles sont clairement plus mobilisés chez les experts que chez les étudiants : les trois types de contrôle sont activés avec une prédominance des contrôles de *diagnostique* qui, suite aux *vérifications*, permettent d'identifier les erreurs et les incohérences. L'activation importante des contrôles dans cette phase préliminaire de la cartographie d'aptitude, pose les prémisses pour une procédure plus simple de résolution de problème.

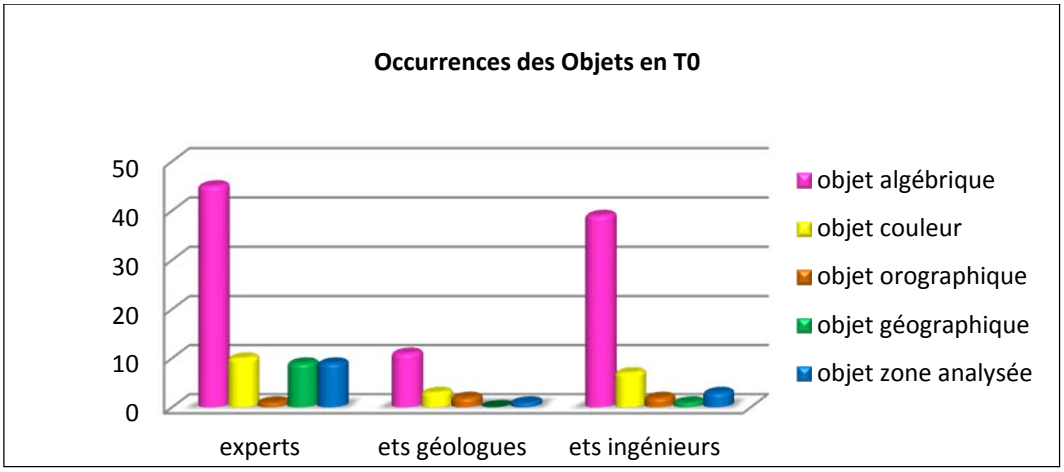


Figure 62 *Nombre d'occurrences d'objets en T0*

Les actions et les contrôles entrepris appellent les objets conceptuels, qui sont, par conséquent très nombreux chez les experts, notamment l'objet *algébrique* (Figure 62) qui régit toutes les actions de sélection booléenne, définition de seuils et des classes. Le même objet est par ailleurs plus présent chez les ingénieurs, pour lesquels l'action de classement très activée, que chez les géologues. L'analyse plus approfondie de la catégorie objet *algébrique* (voir Annexe

VII montre que les descripteurs le plus sollicités sont le A1 (exclusion) et A2 (seuils et classes)

2.2.2 Analyse de la tâche T1 : pondérations et agrégations des données

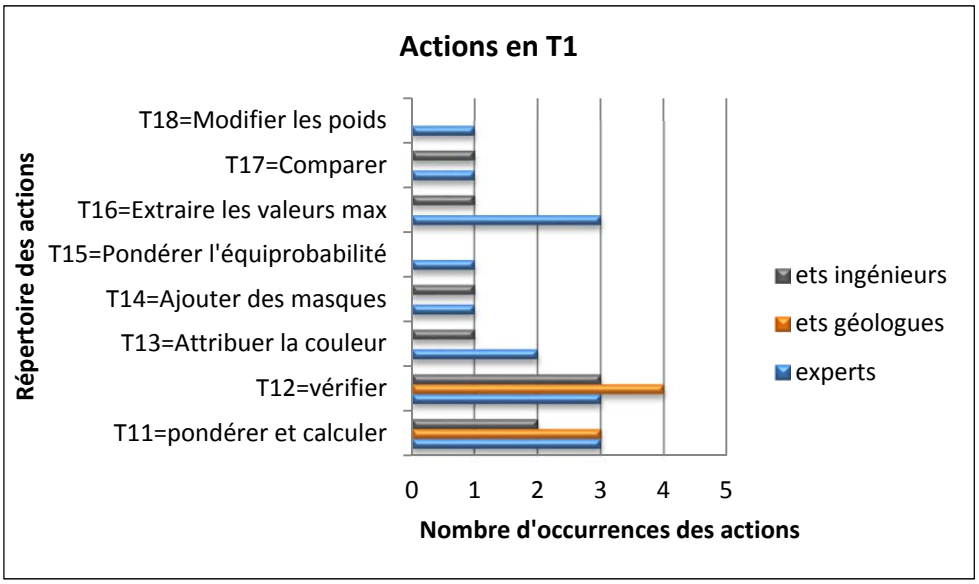


Figure 63 *Nombre d'occurrences d'actions en T1.*

La Figure 63 montre que les actions de cette phase semblent avoir une distribution plus uniforme par rapport aux actions de la phase précédente : en effet, on remarque globalement les mêmes occurrences et les mêmes types d'actions chez les experts et les étudiants ingénieurs. La *T16*, l'extraction ou reclassement des valeurs max sur une carte somme, fait exception et marque la différence entre les experts et les étudiants : une fois de plus les experts essayent d'affiner leur analyse en ciblant l'objectif du problème, qui correspond dans ce cas, à l'identification des cellules les plus aptes. Il est intéressant de remarquer que les étudiants géologues n'activent dans cette phase que deux actions, la pondération et somme, comme la tâche le requiert, et la vérification *(T12).* Les incohérences et imprécisions, accumulées dans la tâche de standardisation des données les incitent à vérifier, diagnostiquer et essayer de résoudre les erreurs, comme le montre la Figure 64 sur les contrôles.

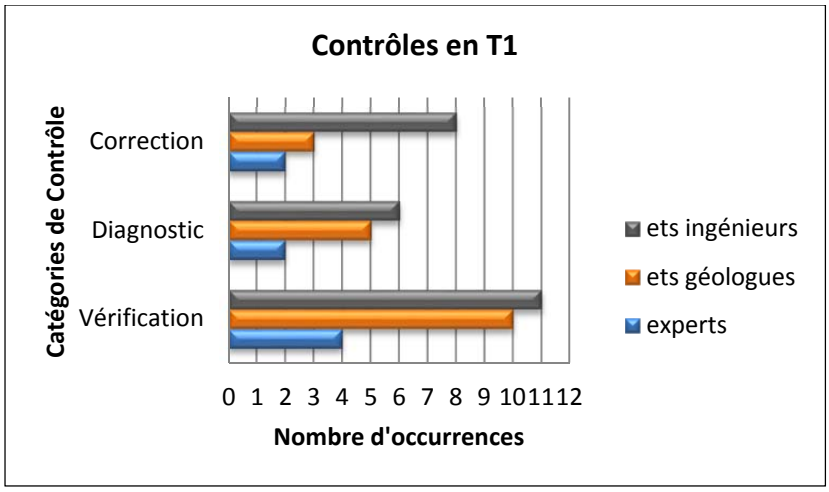


Figure 64 *Nombre d'occurrences de contrôles en T1*

La Figure 64: montre que parmi les descripteurs de la catégorie de *vérification*, les étudiants mobilisent surtout la validation et l'anticipation d'un résultat (voir Annexes VII.).

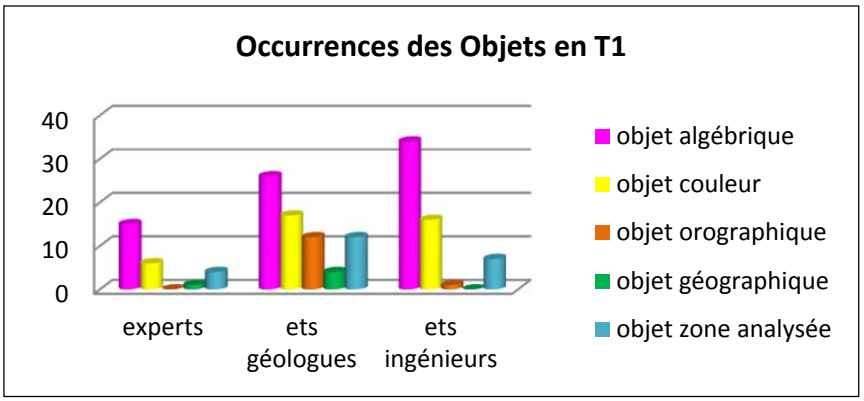


Figure 65 *Nombre d'occurrences d'objets en T1*

Si l'objet *algébrique* reste prioritaire dans cette phase (Figure 65), on observe l'émergence de l'objet *couleur* qui a un rôle déterminant sur les cartes résultant des sommes pondérées. Parmi les descripteurs de la catégorie objet couleur, les plus mobilisés sont le *ton/valeur (V1)* et la *palette de couleur (V3).*

2.2.3 Analyse de la tâche T2 : analyse et choix des cartes des sommes pondérées

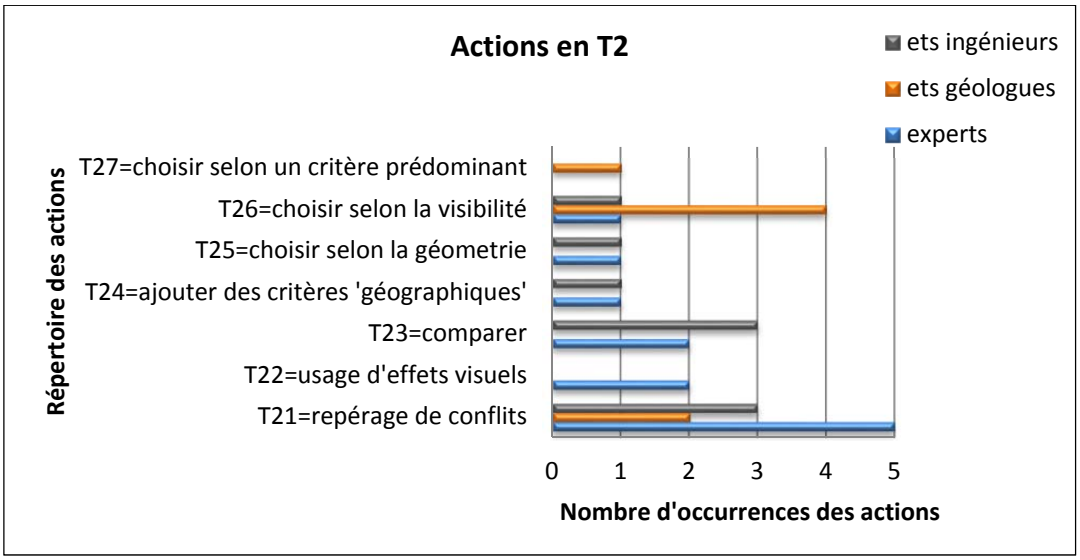


Figure 66 *Nombre d'occurrences d'actions en T2*

Les Figures 66, 67 montrent que dans cette phase d'analyse et évaluation visuelle de la carte d'aptitude, la *T21*, le repérage de conflits et anomalies est très présent chez les experts. La *T22*, l'usage d'outils d'effets visuels, tels que le zoom, la transparence, est uniquement présent chez les experts : le besoin d'examiner et préciser les détails de la carte est avant tout stratégique chez les experts qui, par leur compétences, font appel aux outils technologiques. Dans cette tâche d'analyse et de choix de la carte pondérée la plus apte à répondre au problème, les étudiants géologues se distinguent des autres profils, par l'évaluation de la carte sur la base de sa lisibilité ou d'un critère dominant. Ils se distinguent également pour une mobilisation très réduite des contrôles de vérification (Figure 67).

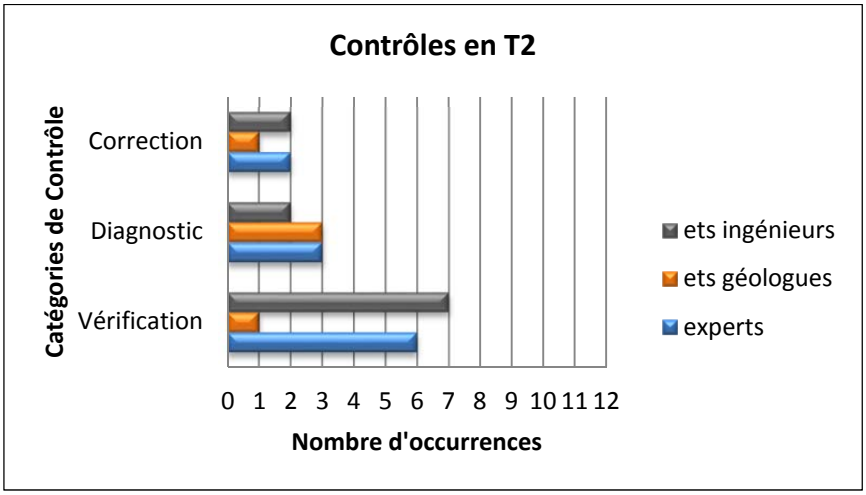


Figure 67 *Nombre d'occurrences de contrôles en T2*

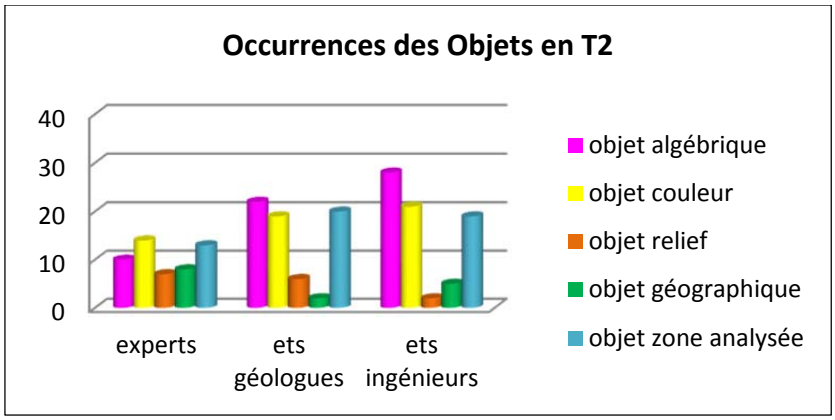


Figure 68 *Nombre d'occurrences d'objets en T2*

Il est intéressant de noter que dans cette phase d'analyse et de prise de décision qui consiste à choisir la meilleure carte d'aptitude, pratiquement tous les objets sont mobilisés. A côté des objets *algébrique* et *couleur*, l'objet *zone analysée* a ici bien évidemment toute sa place (Figure 68). L'analyse d'une zone par rapport sa conformité avec la nature du terrain (descripteur An3) est la plus activée (voir Annexes VII).

2.2.4 Analyse de la tâche T3 : préconisation du site

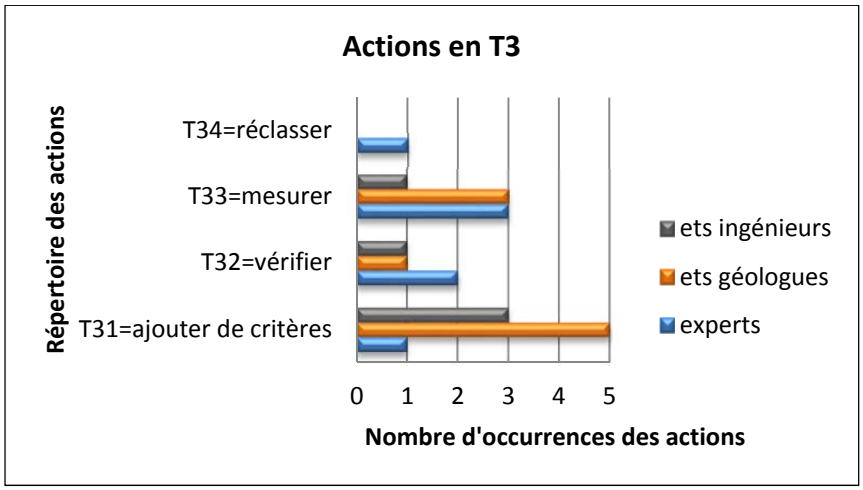


Figure 69 *Nombre d'occurrences d'actions en T3*

Cette phase ultime de la procédure impose aux sujets d'analyser le détail de la carte d'aptitude pour designer un ou plusieurs sites potentiellement aptes à l'implémentation de la station de ski. Même si la phase est courte et le nombre d'action est limité, on peut identifier des tendances. La Figure 69 montre que la *T31*, *ajout des critères*, est très activée par les étudiants géologues qui semblent avoir encore besoin d'informations pour finaliser leur choix : un choix difficile à faire si les conditions de sélection posée en amont n'ont pas été bien définies. La *T33, mesure géométrique des zones* (calculs de périmètres, diamètres, areas, etc.) n'est paradoxalement pas mise en œuvre par les étudiants ingénieurs. La *T34*, *reclassement de seuils d'aptitude*, est mobilisée exclusivement par les experts qui confirment leur besoin de restreindre les possibilités de choix.

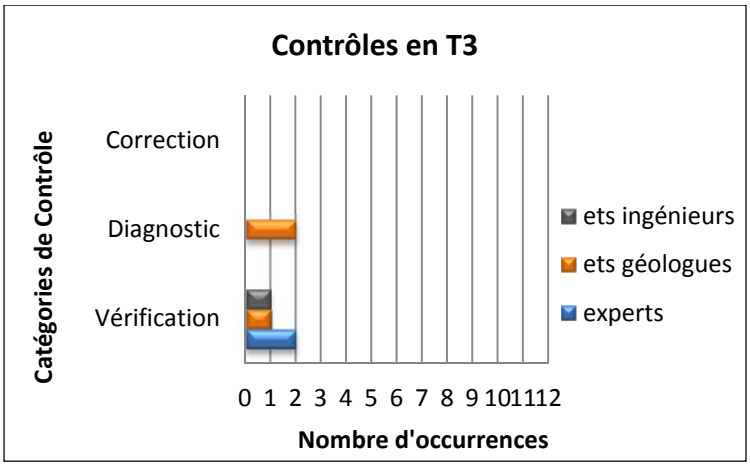


Figure 70 *Nombre d'occurrences de contrôles en T3.*

La Figure 70 montre que les contrôles ne semblent pas avoir un rôle prioritaire dans cette phase, néanmoins, les experts continuent d'effectuer des *vérifications.*

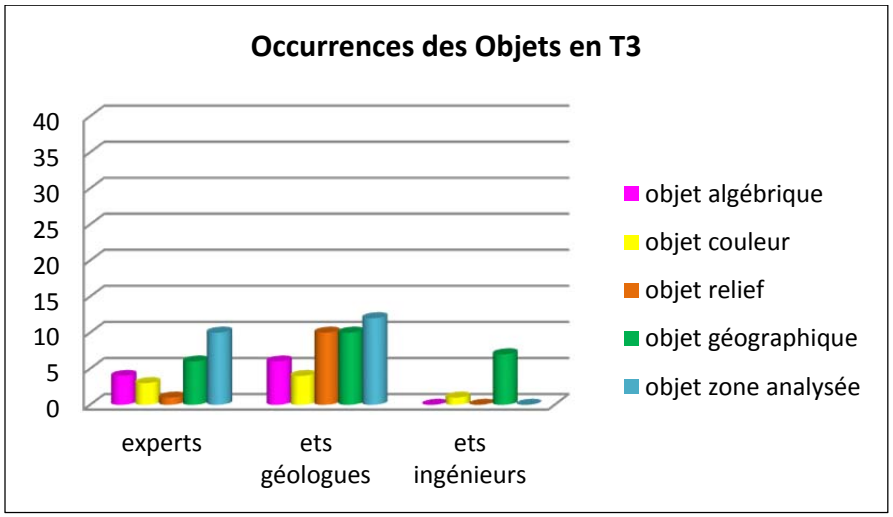


Figure 71 *Nombre d'occurrences d'objets en T3*

Dans cette phase de décision, l'objet le plus appelé est *l'objet zone analysée,* car il s'agit exactement de l'analyse des surfaces et des formes colorées de la carte pour trouver le site propice. Or, il est intéressant de remarquer la présence de l'objet géographique chez tous les profils : la mise en relation d'une zone identifiée comme apte avec la réalité géographique semble supporter la validation d'un site. Les deux descripteurs de l'objet géographiques le plus mobilisés sont, les *repères villes, localités (G1)* et le *réseau routier (G2)* (voir Annexe VII).

2.3 Bilan

L'analyse qualitative des données verbales a permis d'identifier les éléments du processus cognitif mené par les experts et les étudiants lors de l'élaboration d'une carte d'aptitude. Pour les quatre principales tâches observées de la procédure de cartographie d'aptitude, 30 actions, 16 opérations de contrôles et 28 objets conceptuels ont été établis et organisés selon une taxonomie.

L'analyse quantitative a permis de montrer que certains éléments du processus cognitifs peuvent être propres à chaque groupe de sujets (experts et étudiants). Par exemple, on remarque la présence exclusive de certaines actions chez les experts (les *T01, T22*, *T34*) ou

chez les étudiants (la *T27*), le nombre important de contrôles des experts dans la tâche de standardisation(T0) par rapport aux contrôles des étudiants, ou encore des objets conceptuels plus activés que d'autres dans certaines tâches (par ex. l'objet algébrique nettement prépondérant en T0) ou par certain profils (par ex. les objets algébrique et couleur mobilisés par les étudiants en T2). En revanche, des similitudes dans les types d'actions ou d'objets ont été observées. Par exemple le même nombre d'objets algébriques mobilisés dans la tâche de standardisation (T0) et les actions effectuées dans la tâche d'analyse des cartes (T2) chez les experts et chez les étudiants ingénieurs. Les similitudes de comportement peuvent suggérer l'obtention de résultats cartographiques similaires chez les étudiants et les experts. Cette hypothèse est mise à l'épreuve d'une part avec l'analyse qualitative des cartes d'aptitude réalisées par chaque groupe et d'autre part par l'analyse détaillée des leurs comportements.

3 Évaluation des cartes produites

L'évaluation des cartes d'aptitudes présentées par les étudiants et par les experts s'est faite sur la base d'une grille d'analyse comportant 7 indicateurs de qualité jugés sur une échelle de 0 à 3 : 1) l'adéquation à sa destination, 2) la simplicité, 3) l'exactitude, 4) la fiabilité, 5) la lisibilité, 6) la sélectivité, 7) l'esthétique (voir Chapitre VI). Les cartes ont été évaluées par trois examinateurs spécialistes du domaine, selon la méthode décrite dans le Chapitre VI: Le score final correspond à la somme des notes données par les examinateurs ; sur la base des scores obtenus, un classement a pu être établi. Les tableaux 37, 38 et 39 présentent la liste des cartes évaluées, organisée par ordre décroissant des scores..

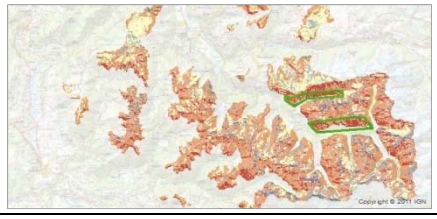
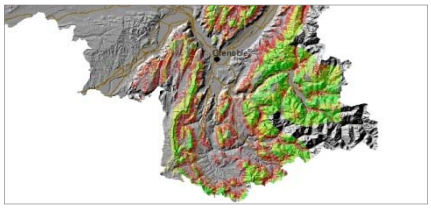
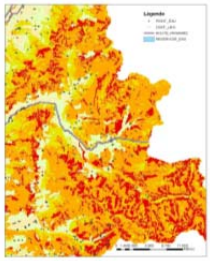
Sujet	**Score total**	**Carte**
Expert (e2)	47/63	
Expert (e1)	44/63	
Groupe ingénieurs (g6)	42/63	

Tableau 37 *Les trois cartes ayant obtenus les trois meilleurs scores.*

Les scores reportés dans le tableau 37 indiquent que le trois cartes listées sont de bonne qualité. Plus précisément, elles respectent les critères de lisibilité, de sélectivité et d'esthétique de façon presque optimale (notes 2/3 ou 3/3). Les critères de fiabilité et exactitude ont reçu des notes plus faibles (notes 1/3). Ceci confirme les précautions évoquées par les réalisateurs des trois cartes qui disent avoir besoin de plus d'informations pour finaliser leur résultat.

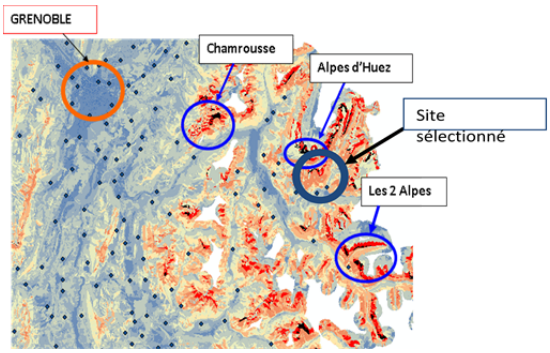
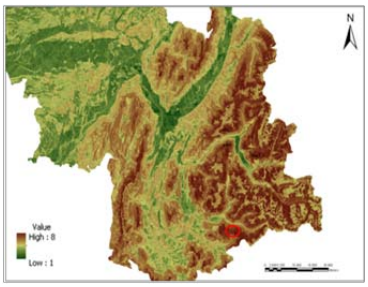
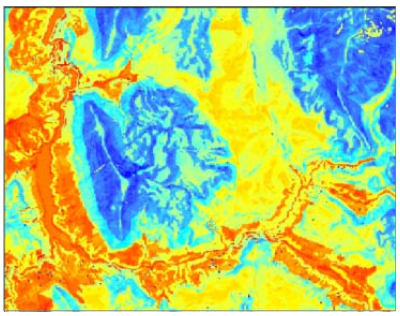
Sujet	Score total	Carte
Groupe ingénieurs (g4)	31/63	
Groupe géologues (g1)	27/63	
Expert (e3)	26/63	

Tableau 38 *Les trois cartes ayant obtenus les scores moyens*

Les trois cartes du tableau 38 ont globalement obtenu des notes faibles (1/3) pour tous les indicateurs : elles n'en satisfont aucun complètement. Elles sont lisibles, mais pas vraiment exploitables en tant qu'aide à la prise de décision, dans la mesure où elles ne sont pas assez sélectives et fiables.

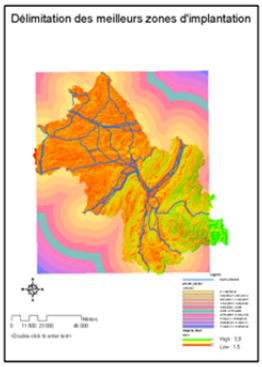
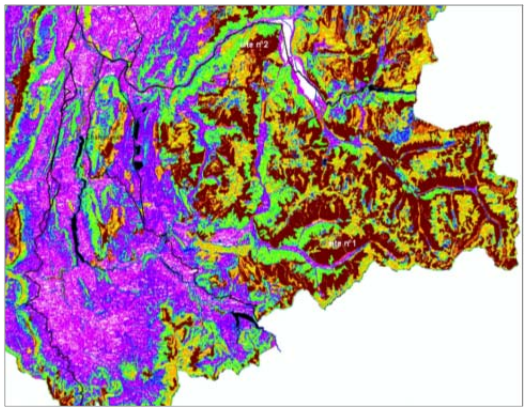
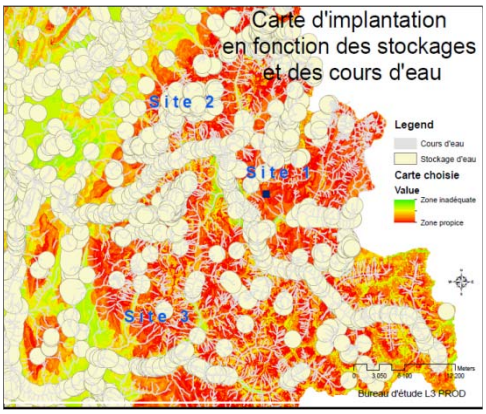
Sujet	Score total	Carte
Groupe géologues (g3)	8/63	
Groupe ingénieurs (g5)	4/63	
Groupe géologues (g2)	2/63	

Tableau 39 *Les trois cartes ayant obtenu les scores les plus faibles*

Les trois cartes du tableau 39 sont illisibles, ne respectent aucun critère esthétique et sont inexploitables.

Les trois groupes de cartes peuvent représenter trois niveaux de réussite de cartographie d'aptitude pour un problème de localisation de site. Afin d'apporter un éclairage supplémentaire sur les différences qui peuvent caractériser une procédure et sa réussite, des

analyses qui comparent les résultats des données verbales et des cartes ont été conduites. Les paragraphes ci-après présentent les résultats de cette démarche.

4. Comparaison des résultats

L'intérêt d'identifier et de mesurer les éléments les plus fins du codage des processus cognitifs pour chaque sujet est de pouvoir effectuer des comparaisons entre d'une part les différents types groupes d'étudiants et d'autre part entre les groupes d'étudiants et les experts. L'association entre la carte produite et les éléments de la procédure ne constitue pas en elle-même un véritable résultat. Il s'agit plus simplement d'un constat, une indication de causes à effets sur les stratégies mises en œuvre et l'aboutissement du problème cartographique. Il s'agit, par exemple, de constater qu'un groupe ayant réalisé une carte d'aptitude de bonne qualité a mobilisé certains éléments du processus cognitif, ou qu'un groupe ayant réalisé une carte inexploitable a mobilisé d'autres éléments cognitifs.

L'objectif est d'analyser en quoi les éléments mobilisés amènent à des résultats pertinents ou pas. Pour cela nous utilisons deux approches qui nous permettent de mettre en relation la carte et le processus de raisonnement. La première est basée sur la construction de modèles taxonomiques (voir Figure 73). Cette modélisation représente l'enchainement d'actions et d'objets conceptuels sur les quatre tâches principales de cartographie d'aptitude pour la résolution d'un problème de localisation. Les enchainements ont été appelés « lignes » et ils ont trois objectifs : 1) offrir une vision d'ensemble sur la procédure (des tâches observées), que les graphiques ne parviennent pas à restituer ; 2) connecter précisément chaque objet conceptuel mobilisé à son opération ou action ; 3) comparer visuellement les éléments. La seconde correspond à une approche plus classique qui repose sur la construction de graphiques. Ils indiquent, par tâche et par sujet le nombre de descripteurs des catégories des contrôles et des objets conceptuel. Afin de rendre la lecture plus aisée, seuls les résultats marquants relatifs aux différences et aux similitudes de comportement sont présentés (l'ensemble des graphiques sont présentés en Annexes VII).

1. L'approche par modélisation taxonomique.

La Figure 72 présente le détail du modèle taxonomique « en ligne ». Dans cet extrait, issu de la ligne du groupe d'étudiants ingénieurs (g6) (voir Figurer 73), la tâche principale T0 (standardisation et classement des données) et constitué de 4 actions (*T04, T06, T09, T010*). Chaque action est caractérisée par des descripteurs d'objets conceptuels, représentés avec le code et la couleur définis dans la catégorisation (voir paragraphe 2). Chaque descripteur est représenté autant de fois qu'il est employé dans l'action. Seulement les opérations de contrôle sont représentées, quand elles sont identifiées (par exemple CV2 dans la Figure 72).

Figure 72 *Extrait de modélisation en ligne pour un groupe d'étudiants (g6)*

La Figure 73 illustre trois lignes complètes, associées aux productions cartographiques. Il est intéressant de remarquer que la carte de plus mauvaise qualité (g2) est le résultat de la procédure (la « ligne ») la plus courte : les différences les plus importantes avec les deux autres lignes se situent au niveau de la T0.

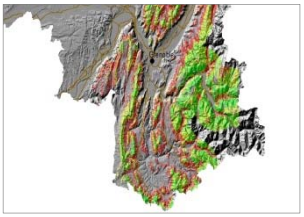
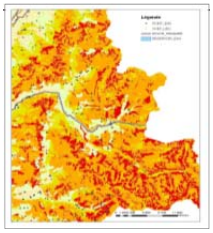
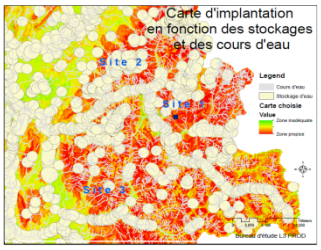
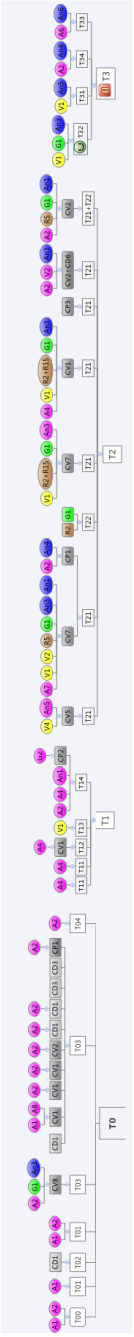
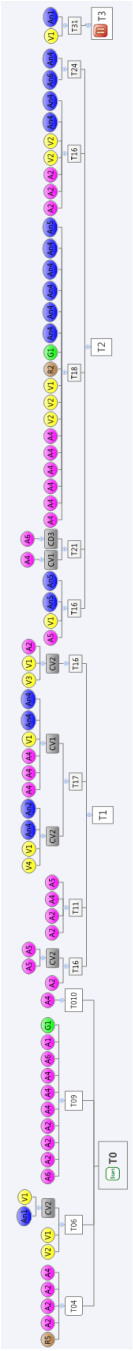
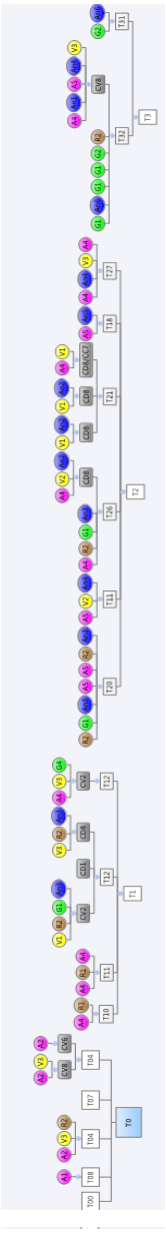
Carte	Carte	Carte
		
Ligne Expert (e1)	Ligne étudiants ingénieurs (g6)	Ligne étudiant géologues (g2)
		

Figure 73 *Modélisation taxonomique en ligne*

2. Approche par graphiques

Dans la **tâche T0, les comparaisons significatives** sont les suivantes :

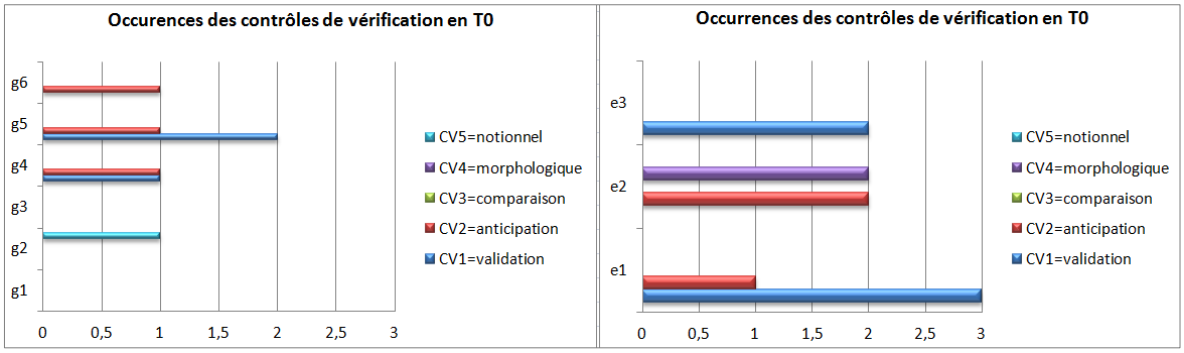


Figure 74 *Occurrences d'opérations de contrôles par vérification mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3)*

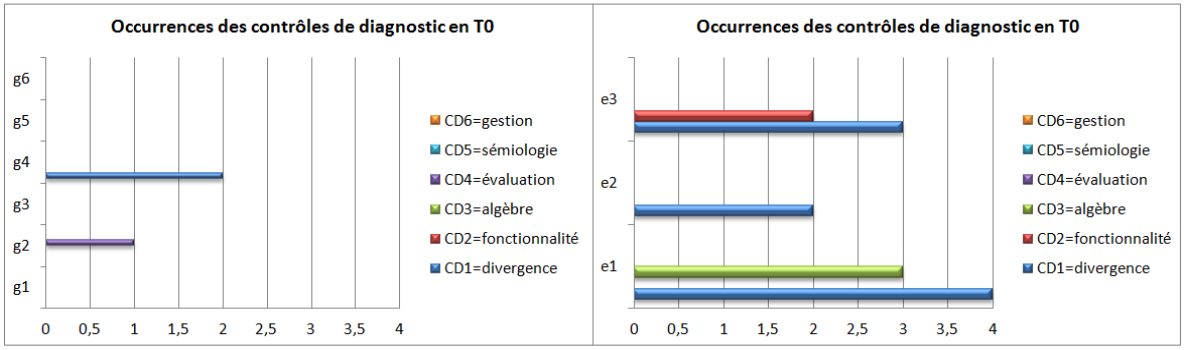


Figure 75 *Occurrences d'opérations de contrôles par diagnostic mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3)*

Les Figures 74 et 75 montrent respectivement la répartition des descripteurs de vérification et de diagnostic pour les étudiants et pour les experts. On remarque que les experts (e1-e3) et les étudiants ingénieurs (g4-g6) cherchent la validation de leurs résultats (par exemple, en analysant les légendes des couches classées) et l'anticipation de leur manipulations (par exemple, en verbalisant le type de resultat attendu qu'il soit cartogaraphique ou algébrique). Les contrôles de diagnostic, tels que la divergence par rappport au resultat attendu, la vérification de la fonctionnalité ou de la formule utilisée sont exclusivement utilisés par les experts (Figure 75).

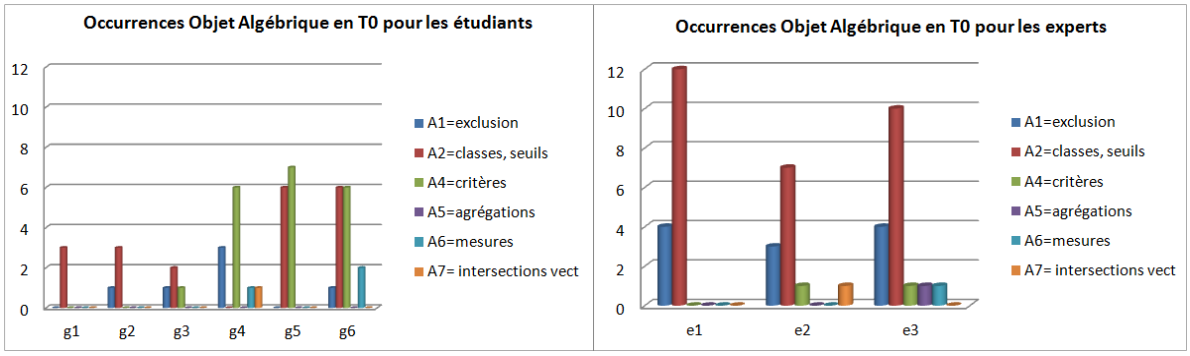


Figure 76 *Occurrences des descripteurs de l'objet algébrique mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3)*

Pour les objets conceptuels, on observe dans les graphiques de la Figure 76, que la mobilisation des concepts relatifs à la définition des seuils de validité et d'exclusion des critères est similaire chez les experts : elle est deux fois plus élevée que pour les étudiants.

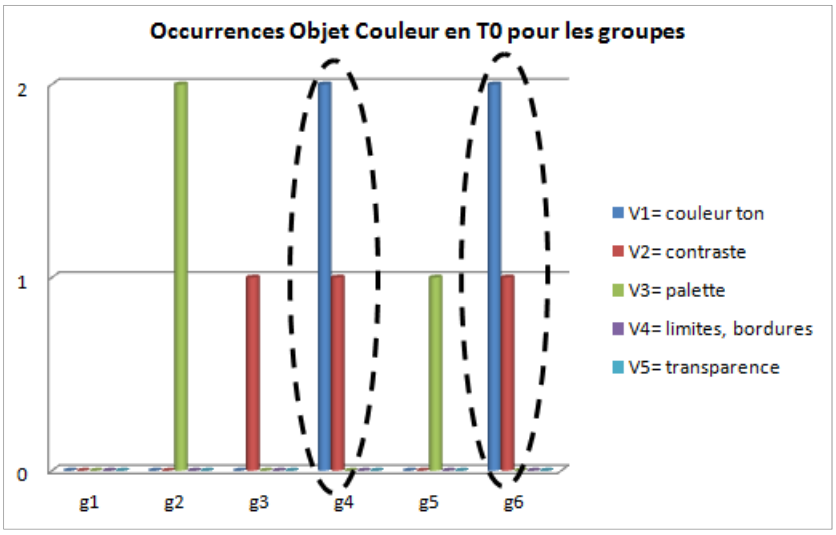


Figure 77 *Occurrences des descripteurs de l'objet couleur mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6)*

Le graphique de la Figure 77 montre que les concepts liés à l'objet visuel couleur sont similaires pour deux groupes d'étudiants ingénieurs, (g4 et g6). Ces deux groupes, qui sont les auteurs des deux meilleures cartes étudiants, s'intéressent à la couleur en termes de valeur et de contraste. Les groupes d'étudiants g2 et g5, auteurs des plus mauvaises cartes d'étudiants, s'intéressent à ce stade préliminaire de la procédure, plutôt à l'attribution de la palette de couleurs.

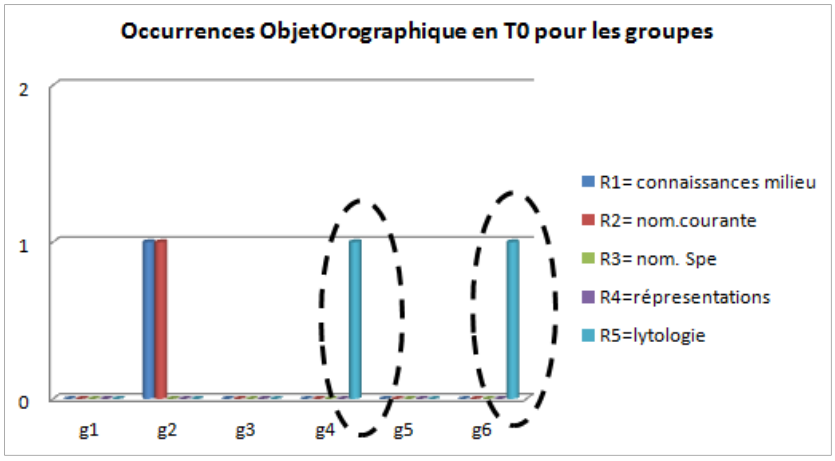


Figure 78 *Occurrences des descripteurs de l'objet orographique mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6)*

Le graphique de la Figure 78 présente encore une nette similitude entre les groupes d'étudiants g4 et g6, sur la mobilisation des concepts liés à l'orographie.

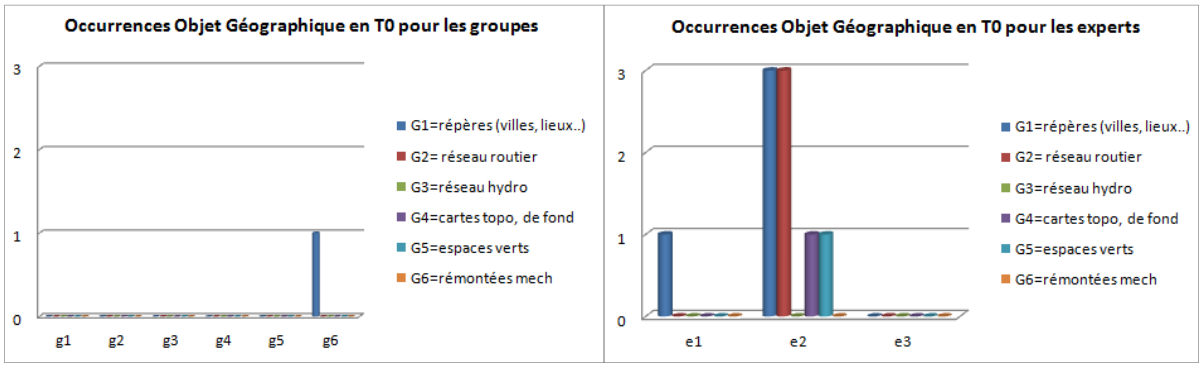


Figure 79 *Occurrences des descripteurs de l'objet géographique mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3)*

Le graphique de la Figure 79 met en évidence que, seulement le g6 s'est préoccupé des entités géographiques, telles que les repères, les agglomérations ou les localités, de manière assez proche au comportement expert.

Dans la **Tâche T1, les comparaisons significatives** sont les suivantes :

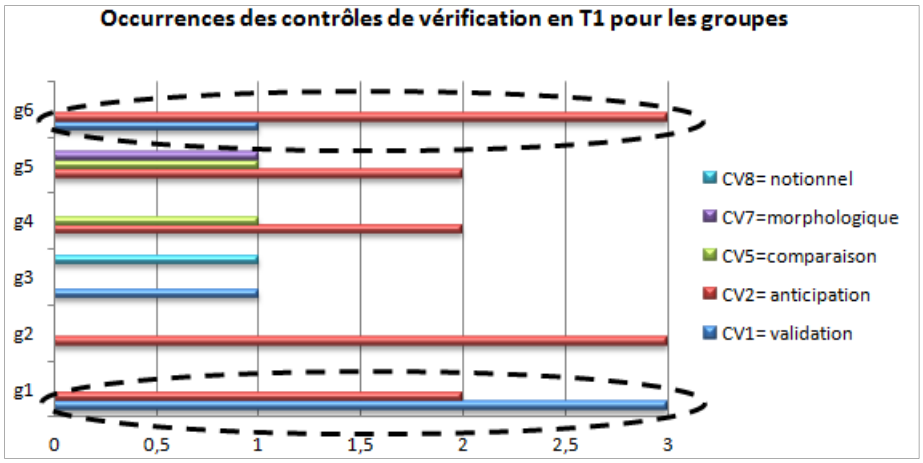


Figure 80 *Occurrences des descripteurs des contrôles par vérification pour les groupes d'étudiants (g1-g6) en T1*

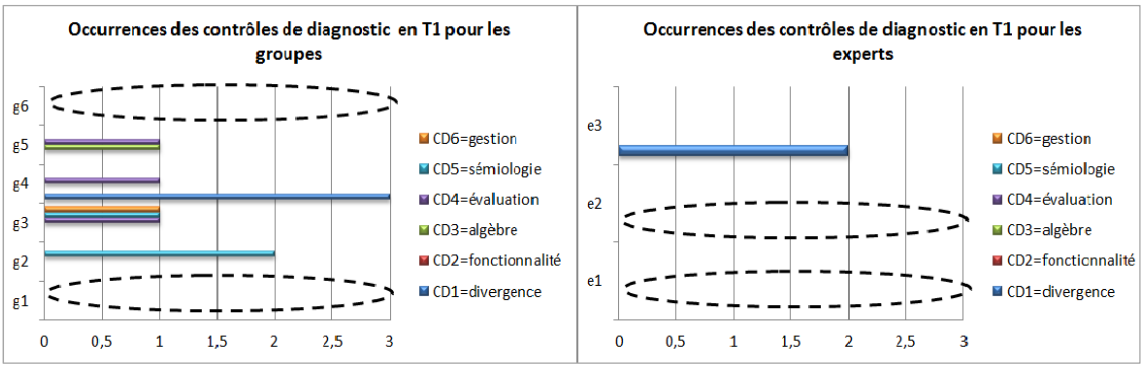


Figure 81 *Occurrences des descripteurs des contrôles par diagnostic pour les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3) en T1*

Pour les opérations de contrôle, on observe, à la lecture de la Figure 80 un comportement similaire pour deux groupes d'étudiants issus de formations différentes (g6) et (g1) sur les contrôles de vérification et plus particulièrement en ce qui concerne la validation et l'anticipation sur les pondérations attribuées aux critères ainsi que les sommes effectuées. Si le g6 est le groupe pour lequel la réalisation cartographique est la plus performante, il est intéressant de noter que le g1 produit une carte d'aptitude acceptable. La vérification de la pertinence des sommes pondérées et des restitutions cartographiques en anticipant ou validant les résultats dans cette phase de la procédure très mathématisée, semble assurer la poursuite du processus de résolution sans trainer des erreurs importantes. Une autre stratégie similaire, comparable entre étudiants et experts, est observable dans le graphique de la Figure 81 qui montre la mobilisation des opérations de contrôles de diagnostic. Ici ce n'est pas la présence

d'un type de contrôle qui est à remarquer, mais plutôt son absence : deux groupes d'étudiants (g1) et (g6) et deux experts (e1 et e2) ne sont pas incités à diagnostiquer des erreurs, car ils semblent arriver à cette tâche avec peu d'incohérences.

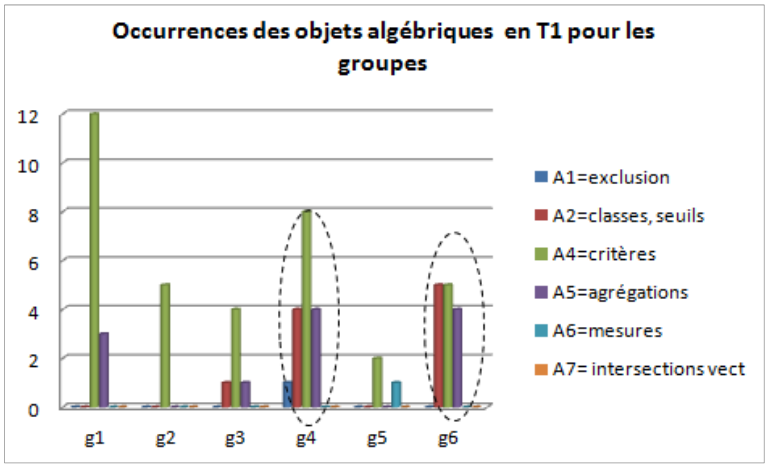


Figure 82 *Occurrences des descripteurs de l'objet algébrique en T1 pour les groupes d'étudiants (g1-g6)*

Pour les objets conceptuels, on remarque que dans cette tâche, deux catégories sont essentiellement sollicitées : l'objet algébrique et la couleur. Le graphique de la Figure 82 montre la similitude de comportement entre deux groupes d'étudiants ingénieurs (g4 et g6) sur la mobilisation de concepts liés encore à la définition des seuils des classes, aux importances des critères et à la formalisation des agrégations des critères (par ex . formules des sommes pondérées en % ou en décimale, ect..).

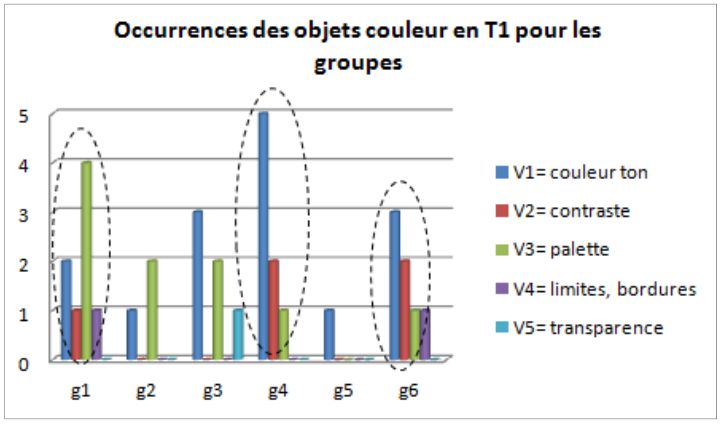


Figure 83 *Occurrences des descripteurs de l'objet couleur en T1 pour les groupes d'étudiants (g1-g6)*

Le graphique de la Figure 83 met en évidence que la recherche de l'association teinte- valeur, de la netteté des limites et surtout du contraste sont les objets visuels les plus mobilisés par les groupes d'étudiants (g1, g4 et g6) qui ont fourni les meilleures cartes d'aptitude. Il est intéressant de noter que la mobilisation d'objets algébriques et visuels est bien plus faible chez les autres groupes dans cette tâche décisive de la cartographie d'aptitude.

Dans la **Tâche T2, les comparaisons significatives** sont les suivantes :

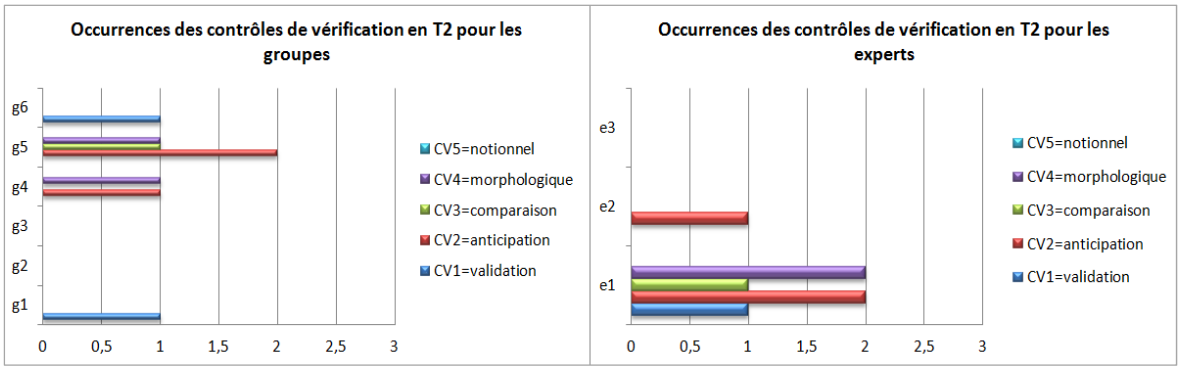


Figure 84 *Occurrences des descripteurs des contrôles par vérification pour les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3) en T2*

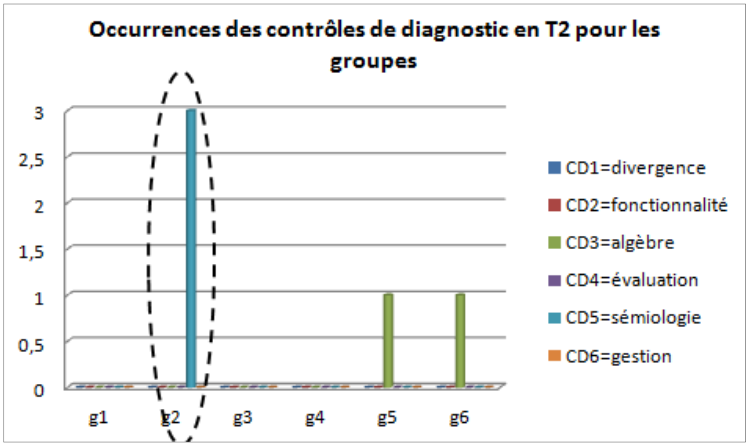


Figure 85 *Occurrences des descripteurs des contrôles par diagnostic pour les étudiants (g1-g6) en T2*

La tâche d'analyse et de choix des cartes réalisées (T2), requiert une mobilisation des stratégies de contrôles spécialement liées aux vérifications sur les cartes résultant des sommes pondérées. Le graphique de la Figure 84 montre chez un expert (e1) une mobilisation presque exhaustive des différents descripteurs de la catégorie de vérification : dans cette tâche d'analyse et d'évaluation de la carte, l'expert utilise tous les moyens –conceptuels- disponibles pour valider sa démarche. On repère le contrôle lié à la vérification de la carte au moyen d'éléments géomorphologiques, qui est très présent chez l'expert géologue (e1). A ce stade de l'analyse de la carte, il est important de remarquer l'absence de vérification pour certains groupes d'étudiants, tel que les géologues g2 et g3, qui par la suite, n'ont pas réussi à fournir une carte d'aptitude lisible. Plus particulièrement, le g2 n'active que des contrôles

d'ordre diagnostic et précisément de divergence, comme nous pouvons l'observer dans la Figure 85. Ce groupe est dans une démarche d'essaie-erreur et tente de comprendre la nature des incohérences observées sur sa carte.

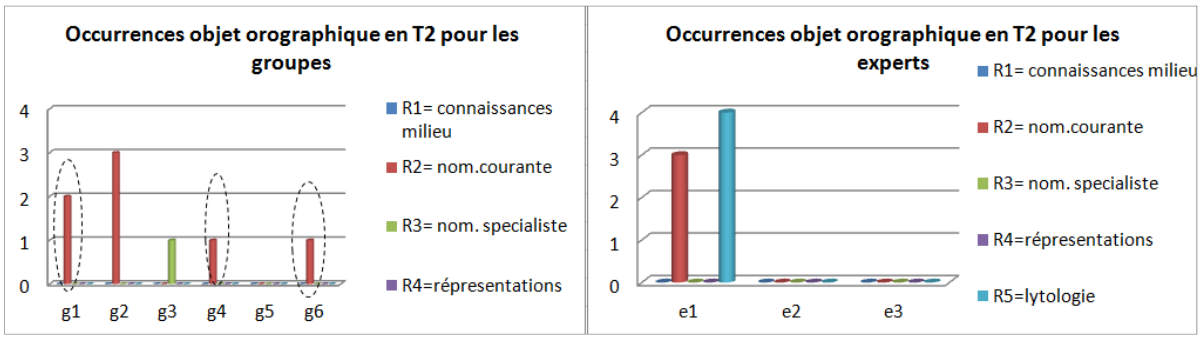


Figure 86 *Occurrences des descripteurs de l'objet orographique mobilisé en T2 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e2)*

La T2 pour sa spécificité d'analyse visuelle, procédurale et mathématique, implique la mobilisation des tous les objets conceptuels. Néanmoins des particularités sont à remarquer sur l'objet orographique et son descripteur, liées à la verbalisation d'appellations courantes (montagne, fond de vallée, flanc..) qui est mobilisé par un expert et par trois groupes d'étudiants (g1, g4, g6) (voir Figure 86). Aussi le descripteur lié à la connaissance du milieu est particulièrement activé dans cette phase per l'expert géologue (e1).

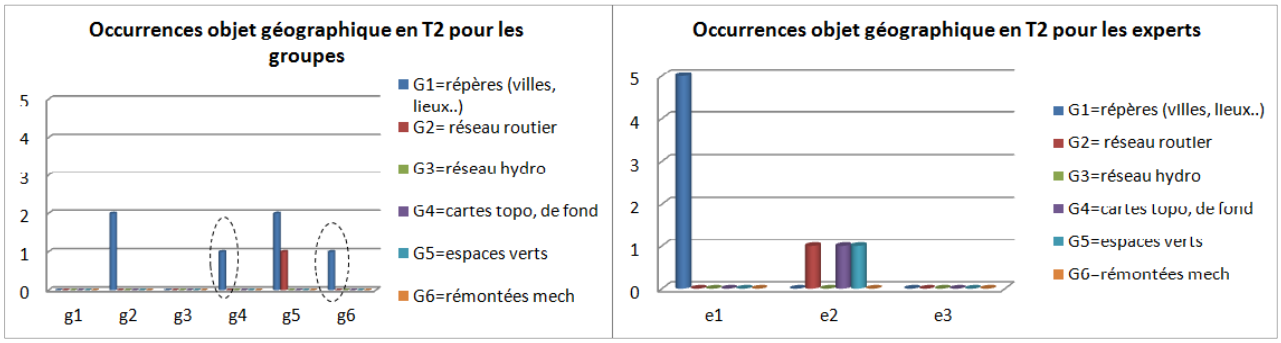


Figure 87 *Occurrences des descripteurs de l'objet orographique mobilisé en T2 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e2)*

A l'instar de l'objet orographique, l'objet géographique, à travers son descripteur lié à la connaissance des localités, est très mobilisé dans cette phase par l'expert géologue (e1) et par les deux groupes étudiants ingénieurs (g4 et g6) qui maintiennent la ressemblance de leurs

comportements (voir Figure 87). Le comportement du g2 est à remarquer : le groupe étant dans une attitude d'essai-erreur, il active tous les moyens pour sortir de l'impasse**.**

Dans la **Tâche T3, les Comparaisons significatives** sont les suivantes :

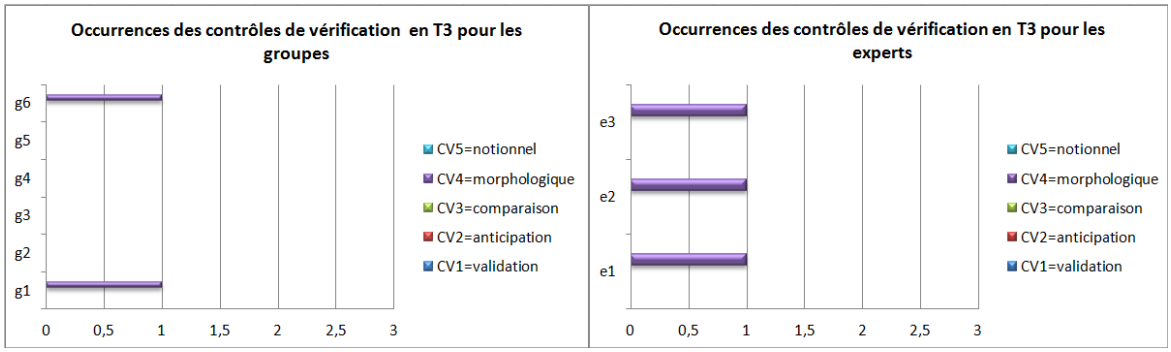


Figure 88 *Occurrences des descripteurs des contrôles par vérification pour les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3) en T3*

La dernière tâche observée implique la mobilisation de stratégies pour choisir un ou plusieurs site(s) potentiellement aptes à l'implantation d'une station de ski. Les contrôles qui suscitent de l'intérêt sont essentiellement ceux qui découlent de la vérification, car à ce stade ultime de la procédure, le temps n'est plus ni au diagnostic ni à la correction. Le graphique de la Figure 88 montre que la vérification des zones définies comme favorables par la carte d'aptitude se fait exclusivement à travers une confrontation avec la nature du terrain. Le descripteur 'morphologie', correspondant aux stratégies de corrélation entre zones favorables et morphologie du terrain, est le seul contrôle activé. Il est intéressant de noter qu'il est à la fois activé par tous les experts et que par deux groupes d'étudiants : le g6 confirme que sa démarche est, parmi les démarches étudiantes, la plus proche de la démarche expert ; le g1 confirme sa capacité à rattraper les lacunes initiales (voir T0) grâce à une approche analytique très dynamique en T1, T2 et T3.

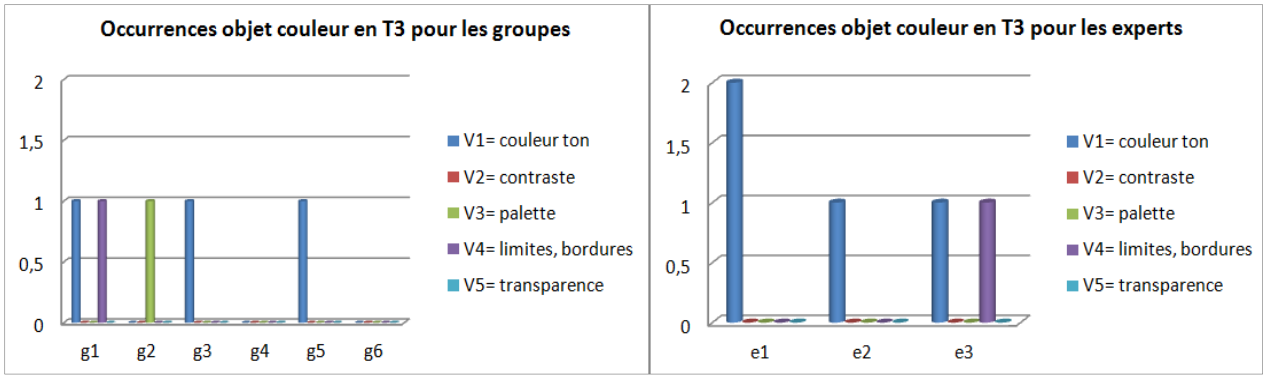


Figure 89 *Occurrences des descripteurs de l'objet couleur mobilisées en T3 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3).*

Dans cette phase de recherche analytique et de prise de décision, tous les objets conceptuels sont impliqués. Des comparaisons intéressantes sont à signaler, dans la Figure 89, au niveau de l'objet couleur: le descripteur 'valeur-teinte' révèle une attention visuelle ciblée sur les surfaces désignées par des teintes différentes selon leur résultat de favorabilité. Ce descripteur est mobilisé chez tous les experts, aussi bien que par le meilleur groupe d'étudiants géologues (g1) et pas par les meilleurs groupes d'étudiants ingénieurs (g4 et g6).

La recherche de différences et des similitudes dans les occurrences des éléments cognitifs aide à tracer, les grandes lignes, des profils de stratégies de résolution 'gagnantes' ou 'défaillantes' : comme nous le préciserons dans le chapitre suivant (Discussions), les stratégies 'gagnantes' correspondent à l'enchainement d'actions et d'opérations qui amènent à la réalisation d'une carte d'aptitude permettant de prendre une décision.

De façon générale, l'identification des lacunes chez les différents sujets permet de mieux comprendre où et comment certaines erreurs ont pu se produire. A l'inverse, l'identification de patterns communs, qu'ils soient dans les actions, les contrôles ou les objets, pour des procédures dont l'issue est satisfaisante, permet de valider, en tout cas sommairement, des concepts et des stratégies nécessaires à l'aboutissement de la résolution du problème.

5. Conclusions

Les résultats issus des différentes analyses permettent de répondre aux questions de recherche initiales, que nous synthétisons ci- après :

1) quelles opérations et quels objets conceptuels sont identifiables dans le processus de résolution de problème de localisation de site mis en ouvre avec des méthodes de cartographie d'aptitude, par des experts et par des étudiants (novices) ?
2) quelles sont les différences et les similitudes dans la mobilisation des stratégies de résolution et des objets conceptuels entre les deux profils étudiés (experts et étudiants)?

1. En réponse à la première question, nous apportons des résultats d'ordre qualitatif sur quatre tâches fondamentales de la procédure :

T0 =la standardisation et discrétisation des données ;

T1 = la pondération et l'agrégation des données ;

T2 = l'analyse visuelle des cartes résultant des sommes pondérées ;

T3= la préconisation du (des) site(s) pour l'impléntation de la station de ski.

Ces résultats ont été formalisés progressivement par la définition :

- de thèmes conceptuels génériques, correspondant à des invariants opératoires, des inférences et des règles d'action ;
- d'un répertoire exhaustif de la typologie d'actions effectuées au cours des quatre tâches (30 Actions) ;
- des catégories des opérations de contrôle et des objets conceptuels (16 contrôles et 28 objets).

2. En réponse à la deuxième question, nous apportons des résultats d'ordre quantitatif pour les quatre tâches analysées. Ces résultats ont été formalisés progressivement par :

- l'évaluation de la qualité des cartes produites ; les cartes d'aptitude ont été classées par ordre décroissant du score obtenu lors de l'évaluation. Cette évaluation a facilité la distinction de 'stratégies gagnantes' et 'défaillantes', permettant la mise en relation entre procédures et objectifs du problème ;

- le dénombrement des éléments cognitifs composant le schéma de codage (actions, opérations de contrôles et objets conceptuels) ; l'analyse des occurrences a mis en évidence des patterns, qui témoignent des tendances à mobiliser, à certains moments de la procédure, certains éléments cognitifs plutôt que d'autres ;

- la comparaison des occurrences des éléments cognitifs et la recherche de différences et similitudes entre les profils des sujets (groupes d'étudiants et experts) ; la découverte des similitudes a permis d'identifier les comportements semblables, à la fois gagnants ou défaillants.

Une synthèse des résultats est donnée dans les Tableaux 40 et 41
Le tableau 40 présente, par Tâche, les Actions, les Contrôles et les Objets les plus récurrents pour l'ensemble d'experts et d'étudiants. Le Tableau 41 présente, la distribution des éléments du processus cognitif les plus récurrents par type de profil (experts, étudiants ingénieurs, étudiants géologues). La discussion et l'interprétation de ces résultats est présentée dans le Chapitre VIII.

Tâche	Action	Contrôle	Objet
T0 =la standardisation et discrétisation des données	T04= définir des seuils et des classes T03= vérifier/contrôler T01= définition de l'exclusion	vérification diagnostic	algébrique
T1 = la pondération et l'agrégation des données	T12= vérifier T11= pondérer (en%) et calculer T16=extraire des valeurs max	vérification	algébrique couleur
T2 = l'analyse visuelle des cartes résultant des sommes pondérées	T21= vérifier et repérer des conflits T23= comparer	vérification	algébrique couleur zone analysée
T3= la préconisation du (des) site(s)	T31= ajouter de critères supplémentaires	vérification	géographique

Tableau 40 *Synthèse des éléments cognitifs les plus récurrents pour l'ensemble d'experts et d'étudiants.*

Tâche	Eléments	Experts	Etudiants Ingénieurs	Etudiants Géologues
T0	Actions	T01=exclure T03=contrôler T04=reclasser	T03=contrôler T04=reclasser	T04=reclasser T08=définir un critère pilote T09= corréler
	Contrôles	CV1=validation CV2=anticipation CV4= morphologique CD1=divergence CD3= algèbre	CV1=validation CV2=anticipation CD1=divergence	CV5= notionnel
	Objets	A2=classes, seuils A1=exclusion	A2=classes, seuils A4=critères	A2= classes, seuils
T1	Actions	T11= pondérer et calculer T12= vérifier T16=extraire valeurs max	T12=vérifier T11=pondérer et calculer	T12=vérifier T11=pondérer et calculer
	Contrôles	CV1= validation CV5= comparaisons	CV2=anticipation CV5= comparaisons	CV2= anticipation CV1= validation
	Objets	A4=critères A2=classes, seuils V3=palette de couleur V1=ton- valeur	A2=classes, seuils A4=critères V1=ton- valeur V2=contraste An4= restricitivité de la carte	A4=critères V3=palette de couleur V1=ton- valeur
T2	Actions	T21=repérer de conflits T22=utiliser des effets visuels T23=comparer	T21= repérer de conflits T23= comparer	T26=choisir par rapport à la visibilité T21= repérer de conflits
	Contrôles	CV2=anticipation CV4=morphologique	CV2=anticipation CV4=morphologique	CV1=validation
	Objets	V1=valeur – ton G1= repères An3=classes-morphologie R5=lithologie R2=nomenclature courante	A4=critères V1=valeur – ton V2=contraste An4= restricitivité de la carte An2=corrélations légende- valeurs	A4=critères V2=contraste R2=nomenclature courante An3=corrélations classes-morphologie
T3	Actions	T33=mesurer T32=vérifier	T31=ajouter de critères supplémentaires	T31=ajouter de critères suppl T33=mesurer
	Contrôles	CV4=morphologique	CV4=morphologique	CV4=morphologique
	Objets	V1=ton- valeur An3=c classes morphologie G2= réseau routier G1= repères	G1= repères G2= réseau routier	A6=mesures R3=nomenclature spécialisée G1= repères

Tableau 41 *Synthèse des éléments cognitifs par profil*

CHAPITRE VIII : DISCUSSION

Ce chapitre présente les discussions qui nous permettent d'interpréter les résultats issus de notre investigation expérimentale (Chapitre VII), en vue de leur généralisation. La question fondamentale de notre recherche a porté sur les systèmes cognitifs sous-tendant les raisonnements et les stratégies de résolution d'un problème spatial à l'aide d'un SIG. L'hypothèse sous-jacente était qu'une meilleure compréhension du fonctionnement de ces systèmes permet de mieux concevoir des aides didactiques ciblés.

L'investigation s'est appuyée d'une part sur les cadres théoriques relatifs aux mécanismes visuels et cognitifs présentés au chapitre IV et d'autre part sur le dispositif expérimental exploratoire décrit au chapitre V. Le principal résultat de notre recherche est constitué par l'identification des composants du raisonnement, à partir desquels nous pouvons reconnaitre *des schémas cognitifs.* Ensuite, l'identification des différences entre les schémas cognitifs mobilisés par les étudiants et par les experts lors de leurs activités, nous permet, de suggérer des *aides didactiques* et de proposer de *nouvelles approches pédagogiques.*

Nous discutons les dimensions cognitives, didactiques et pédagogiques, en réponse aux trois questionnements annoncées en introduction. Dans une première partie, nous tentons de répondre à la question (1) « Comment étudier les raisonnements des utilisateurs, et quels éléments du raisonnement identifier ? » ; dans une deuxième partie il s'agit d'apporter des éléments de réponse à la question (2) « Comment utiliser la connaissance sur les raisonnements pour suggérer des aides didactiques ? ». Nous présentons dans la troisième partie des dispositifs d'apprentissage en réponse à la question (3) « Comment concevoir des nouveaux dispositifs d'apprentissage des SIG plus performants et en adéquation avec les demandes du monde professionnel ? ». Nous terminons la discussion en analysant les limites de notre investigation expérimentale.

1. Des composants du raisonnement aux schémas cognitifs

Pour pouvoir être étudiée et mesurée, la notion de 'raisonnement' a été décomposée et ses composants ont été explicités dans les questions de recherche posées dans le Chapitre IV. Les résultats ont donc essentiellement porté sur les trois éléments cognitifs que nous avons définis comme composants du raisonnement :

1. les *actions* conduites par les sujets pour résoudre le problème de localisation ;

2. les opérations qui caractérisent chaque action, et dont celles relatives aux *contrôles d'erreurs* sont particulièrement significatives ;

3. les *objets conceptuels* mobilisés dans chaque opération (et action)

Les résultats sur ces trois éléments peuvent être interprétés selon une perspective cognitiviste, fondée sur les précisions que la littérature nous fournit (Chapitre IV). Nous rappelons que ces trois éléments sont régis par les schémas mentaux (ou cognitifs). Les schémas sont des représentations mentales abstraites qui résument et organisent de façon structurée des événements, des objets, des situations. Ils servent de modèle, de cadre pour traiter l'information et diriger les comportements et sont de type déclaratif, analogique/imagé et procédural.

Des nombreuses actions que nous faisons et des décisions que nous prenons sont guidées par la connaissance organisée en schémas. Parmi les gestions de contrôles que nous avons définis, certains sont des contrôles sur une performance entrainant la correction des erreurs. Ces contrôles sont des actions déterminées par des schémas (structures) qui ont engendré des décisions erronées. En effet, toute action requiert un choix, et la cause la plus courante d'une erreur est un choix inapproprié (Ohlsson, 1997). Quand une erreur est constatée, la recherche de l'origine de cette erreur peut être poussée un peu plus loin en analysant pourquoi un mauvais choix est fait. Selon sa 'Théorie d'apprendre par les erreurs', Ohlsson (1997) explique que les actions sont gérées par des règles. Dans une première étape du mécanisme d'action, toutes les conditions objectif-situation sont analysées selon les règles d'inférence et un ensemble d'actions, potentiellement aptes à satisfaire les règles, sont listées. Dans une deuxième étape du mécanisme, une seule action doit être choisie pour être mise à exécution. La sélection est probabiliste et dépend du poids de l'action. En effet, le poids est une propriété quantitative qui représente l'expérience passée : plus une règle est associée à des résultats positifs, plus elle (et par conséquent l'action qu'elle gère) a du poids et donc une forte

probabilité d'être appliquée. En vue de ces considérations, l'auteur précise les raisons qui rendent les erreurs plus communes chez les novices que chez les experts : des actions incorrectes sont activées car les règles pertinentes ont un recouvrement trop général ; elles sont des composantes de la situation qui ne sont pas précisément définis. La conséquence d'une règle générique est qu'elle devient active dans beaucoup de situations, pour lesquelles, l'action qu'elle évoque n'est pas appropriée, correcte ou utile (Ohlsson, 1997). Une des spécificités de l'expertise est justement d'avoir acquis la capacité de restreindre l'applicabilité de règles pertinentes, en ajoutant des nouvelles conditions aux composants de la situation.

La définition du champ d'application du problème et de ses paramètres est une démarche que les experts engagent dans l'analyse qualitative du problème (Chi et Al., 1981 in Petcovic et Libarkin) (Chapitre IV). Les auteurs, qui s'intéressent aux études sur la résolution de problèmes de physique par des experts, supposent que cette approche a lieu chez les experts dans les premières phases du processus de résolution, car l'analyse qualitative du problème implique l'activation et la confirmation d'une structure axée sur un principe (principle-oriented), un schéma. Une fois activé, le schéma lui-même spécifie d'autres tests pour vérifier sa pertinence (Bobrow et Norman, 1975). Lorsque le schéma est confirmé, ce qui signifie que l'expert a décidé qu'un principe ou un théorème est adéquat, la connaissance contenue dans le schéma fournit la formalisation permettant d'aboutir à la solution. La résolution du problème commence d'une manière ascendante (bottom-up process), en analysant des caractéristiques et en activant le schéma approprié. Une fois que le bon schéma a été activé, la connaissance contenue dans le schéma, qu'elle soit procédurale ou déclarative, est utilisée pour traiter le problème de manière descendante (top-down process). Le schéma déclaratif génère des configurations de problèmes potentiels et les conditions d'application des procédures qui sont ensuite testés avec ce qui est présenté dans l'énoncé du problème. Le schéma procédural génère les méthodes potentielles à utiliser pour le problème donné (Chi et Al., 1981).

Sur la base de ces considérations qui précisent les liens entre *actions, contrôles (d'erreurs), objets et schémas,* un nouveau questionnement peut être soulevé :

Quels schémas cognitifs reconnaissons-nous chez les experts et chez les étudiants ? Ces schémas sont-ils efficaces pour résoudre un problème de cartographie d'aptitude ?

Des pistes de réponse sont proposées ci-après, en fonction du profil des sujets de nos expériences.

1.1. Schémas cognitifs relatifs à l'activité des experts#

L'analyse de l'activité des experts a montré qu'ils développent leurs procédures de résolution de problème de cartographie d'aptitude selon les principaux paradigmes des méthodes d'analyse multicritère, tels que prescrits par la littérature (voir. Chapitre II). Néanmoins, deux démarches qui ne sont pas spécifiquement mentionnées dans la littérature spécialisée en MCSA, ressortent de l'analyse des comportements. Il s'agit de : 1) l'action qui a pour but l'exclusion des données 'inutiles' dans les premières étapes de la procédure de résolution (action T01) et 2) les opérations de contrôles d'erreurs (vérification, diagnostic, correction) activées systématiquement tout au long de la procédure.

En termes de schémas cognitifs, ces démarches peuvent être reparties ainsi :

- Un schéma 'principle-oriented' qui définit les conditions de la situation et les règles (inférences) à adopter : l'expert s'approprie le problème.
- Des schémas déclaratifs et procéduraux qui peuvent être corrélés aux stratégies méthodologiques.
- Des schémas imagés, corrélés plus particulièrement aux stratégies de contrôle, lorsqu'un résultat est affiché en légende ou sur l'image cartographique.

Nous décrivons ci après les schémas déclaratifs et procéduraux qui peuvent être corrélés aux stratégies méthodologiques :

1) exclusion-extraction : l'habilité à définir des limites de validité du champ d'application du problème se traduit par différentes actions. La réduction de la masse de données afin d'utiliser seulement celles potentiellement nécessaires à l'analyse du problème, et de créer des '*masques*', en est une. Selon Thorndyke et Stasz, (1980 in Kent) et Gilhooly (1988) l'action de restriction des zones d'études à des sous-ensembles d'informations cartographiques est largement observée chez des experts dans une tâche de rappel suite à l'étude d'une carte topographique. Selon la Chunking Théory (Thorndyke et Stasz 1980) ceci favorise les stratégies de morcèlement d'informations en blocs.

2) sous-objectifs' : les experts coupent le problème en plusieurs étapes chacune caractérisée par des objectifs secondaires, qui comportent chacun une solution potentielle. Ces solutions sont testées à chaque étape pour en vérifier la viabilité ;
3) 'algébriques' : beaucoup de schémas de mathématisation de l'information, liés aux méthodes multicritères (classement, catégorisation, agrégation, pondération) peuvent être identifiés tout au long de la procédure. La littérature ne traite pas précisément ces stratégies en termes de schémas cognitifs dans le cas d'étude d'une carte d'aptitude, mais plutôt en systèmes de codage d'actions et d'opérations analytiques (Nyerges, 1995), ce qui s'apparente à notre démarche. Pour cette raison nous traiterons, plus précisément, les stratégies de mathématisation à travers l'axe des opérations et des objets ;
4) 'erreur- prévention': les experts adoptent une stratégie itérative qui permet d'atteindre une réponse rapide et approximative, suivie d'une auto-évaluation et d'une suite progressive d'itérations ce qui focalise de plus en plus la solution.

Nous détaillons ci-dessous les schémas imagés (MacEachren, 1995) corrélés plus particulièrement aux stratégies de contrôle, lorsqu'un résultat est affiché en légende ou sur l'image cartographique :

1) 'ordre linéaire' ou 'up=more' (haut=plus) dans la vérification en légende : les experts vérifient systématiquement les résultats mathématiques et graphiques (en couleur) des opérations effectuées, qui sont affichés en légende du haut en bas, en allant des valeurs les plus hautes aux plus basses;
2) 'attacking' (accrochage): les experts cherchent des lieux connus les plus proches des zones analysées, ils les utilisent comme repères ;
3) 'ombre et lumière' : les experts analysent le relief créé par les effets visuels non-perspectifs (ombrage) (voir Chapitre II), et l'utilisent pour vérifier leur connaissance et la nature du terrain.

Mais cette répartition des schémas n'a pas d'intérêt si elle n'est pas placée dans une perspective de qualité de la carte d'aptitude. Comme nous l'avons expliqué précédemment (Chapitre VII), la qualité est évaluée en termes d'efficacité lorsque la carte, réalisée selon les principes analytiques et sémiotiques propres aux méthodes d'analyse multicritères, doit permettre de prendre une décision, comme dans notre cas.

Une dernière considération mérite alors d'être apportée au sujet de la production cartographique finale fournie par les sujets de notre expérience. Les trois cartes d'aptitude réalisées par nos trois experts, ont été soumises à évaluation selon la grille de qualité utilisée pour les étudiants. Deux cartes (E2) et (E1) ont obtenu respectivement le premier et deuxième score de notre évaluation (voir Chapitre VII). E2 correspond à la carte produite par l'expert cartographe : dans cette carte, seules les zones potentiellement aptes par rapport à un critère prédominant, l'altitude, sont visibles (masques) ; l'aptitude des zones est déclinée en une palette de couleur bleu-marron-rouge allant des valeurs les plus faibles des résultats de la somme pondérée, aux plus hautes. Aussi, les sites choisis sont entourés par des bordures vertes. La carte de fond est une carte TOPO IGN qui recouvre, en transparence, une couche de relief. La carte, dont la charge cognitive est réduite et le choix du graphisme approprié, affiche un message clair et lisible. Par conséquent, le lecteur identifie sans hésitation les sites préconisés en réponse au problème d'aptitude.

E1 correspond à la carte produite par l'expert géologue : comme pour E2, dans cette carte seules les zones au dessus du seuil de validité du critère prépondérant (l'altitude) sont cartographiées. Cet expert aussi a eu une approche par « masque », ce qui correspond tout à fait à l'action d'exclusion. Le choix graphique a porté sur une palette de couleur rouge-jaune-vert, dont les valeurs les plus hautes (meilleures zones) sont en vert. Il est intéressant de noter qu'ici, la carte de fond est la couche ombrage-relief du MNT, avec des valeurs de gris très hautes, ce qui fait ressortir de façon très nette la géomorphologie. Il est également très intéressant de remarquer qu'ici, l'expert n'a pas fait son choix de site propice: faute d'informations supplémentaires et de traitements plus approfondis. Par conséquent cette analyse multicritère ne lui a pas permis de prendre une décision. Cette issue du problème, 'sans solution' nous parait très constructive : d'un point de vue pédagogique, elle nous permet de montrer aux étudiants que la prise en charge de problématiques environnementales au moyen des SIG peut emprunter différents chemins et qu'il n'y a pas une seule et unique solution. D'un point de vue didactique, cette issue nous pousse à réfléchir aux paramètres du problème qui peuvent être affinés et enrichis par des données supplémentaires (risques avalanches, cadastre..) ; et enfin elle nous conforte sur la robustesse de l'expertise scientifique qui nous enseigne la rigueur et la prudence sur les résultats.

La Carte E3 correspond à la carte réalisée par l'expert en projet SIG. Contrairement aux deux précédentes cartes, E3 a obtenu un score d'évaluation de la qualité moyen. Cette image cartographique présente des caractéristiques bien plus semblables à celles des cartes produites par les étudiants que par les experts : il n'y a pas de masque par rapport à un critère

prédominant, toute la donnée initiale (MNT de l'Isère) est traitée ; la palette de couleur choisie pour indiquer l'aptitude des zones est rouge-jaune-bleu, le bleue représentant les valeurs les plus hautes des sommes pondérées (meilleures zones). Un site est ici préconisé, mais ce choix est discutable, d'autant plus que la sélectivité de la carte n'est pas assurée (beaucoup de zones en bleu). De manière générale, l'issue de cette carte ne permet pas de répondre de façon satisfaisante au problème de localisation. L'analyse du processus de résolution et des résultats cartographiques de cet expert montre des différences avec les démarches mises en œuvre par ses deux collègues. Cette différence peut sans doute se justifier par le profil de l'expert E3 : en tant qu'ingénieur-projet SIG ses compétences portent sur la maitrise des architectures des bases des données et des fonctionnalités SIG, plutôt que sur l'analyse spatiale et la cartographie. Malgré l'écart entre les productions cartographiques de l'expert E3 et des experts E2 et E1, les résultats des analyses verbales montrent que l'expert E3 a mobilisé énormément de contrôles tout au long de son processus de résolution ; tel que Ohlsson (1997) l'explique, cet expert fourni un exemple où la situation est itérativement réexaminées et redéfinies lorsque les règles appliquées ne sont pas efficaces.

Dans une perspective de '**Objectif, Situation ⟶ Action'**, où un résultat cartographique qui répond à un problème est dépendant d'une série d'actions (processus), les différences observées chez les experts sont révélatrices : les deux premiers experts ont entamés des procédures, des choix, activés des schémas, dont l'issue a été une réponse cartographique correcte et utile. Ces stratégies dites 'gagnantes', indiquent chez deux des trois experts, comme chez certains groupes d'étudiants, des procédures qui ont abouti à des cartes d'aptitude exploitables. Les stratégies 'gagnantes' peuvent constituer une sorte de référentiel pour modéliser des situations d'apprentissage qui aident les étudiants à faire évaluer leurs schémas cognitifs.

En résumé de l'analyse de l'activité des experts lors de la résolution d'un problème de cartographie d'aptitude, nous reconnaissons les quelques traits cognitifs fondamentaux, propres à l'expertise, synthétisés par Petcovic et Libarkin (2007) à partir des travaux de Bransford et al (2000), Hmelo-Silver (2002) et Chi et al. (1981), à savoir :

- reconnaissance de patterns dans l'information, grâce à la familiarité avec le sujet
- inter-corrélation des connaissances
- capacités métacognitives : l'auto-évaluation, la compréhension et la prise de décision basées sur ce qui est ou pas connu (back-tracking strategies)

- flexibilité dans la réflexion et la mise en œuvre du processus de résolution.

Nous reviendrons dans les paragraphes suivants sur nos propositions d'adaptation de démarches des experts à des fins pédagogiques.

1.2. Schémas cognitifs relatifs à l'activité des étudiants

Les deux groupes d'étudiants, géologues et ingénieurs, sont caractérisés par des profils très différents.
Les géologues en Licence Professionnelle ont des parcours de formation en Licence de Sciences de la Terre ou BTS de Géologie, ont une connaissance de la cartographie thématique, notamment la carte géologique et sont initiés aux SIG car, étant en alternance dans des entreprises (TOTAL, BRGM, Bureaux d'études) ils sont confrontés à l'usage et aux traitements de l'information géo-scientifique. Dans la plupart des cas, leurs missions relèvent de la gestion de base de données et de la digitalisation de l'information (images, scans..). Ils sont conscients du rôle des SIG dans leur métier et, par conséquent, motivés à en acquérir la maîtrise. Mais, à ce stade de leur formation, ils sont novices au traitement d'analyse spatiale avec les fonctionnalités SIG et surtout dans la conduite de projet. Ils n'ont pas l'habitude de travailler en équipe, de se concerter ou de prendre des décisions collégiales.

Les ingénieurs débutent leur formation en Ingénierie de l'Environnement après deux ans de cycle préparatoire. Ils ont une culture scientifique et technique construite sur 30 heures de cours hebdomadaires de sciences pour l'ingénieur dont les mathématiques constituent un tiers des enseignements. Malgré ces solides bases en STEM (*science, technologie, ingénierie, mathématiques)*, ils ne sont pas (encore) sensibilisés aux problématiques environnementales et aux démarches de conduite de projet. Contrairement aux étudiants de la Licence Professionnelle, les jeunes ingénieurs ne connaissent ni les SIG ni la cartographie. Ils ont peu de connaissances dans le domaine de l'information géographique et n'ont conscience du rôle que ces deux moyens peuvent jouer dans la prise de décision. L'UE SIG étant optionnelle, on observe un certain manque de motivation et intérêt envers ces apprentissages dont ils n'évaluent pas bien la portée.

Les deux profils ont des traits qui peuvent avantager ou entraver la réussite de la résolution du problème de cartographie d'aptitude auquel ils ont été confrontés : si les géologues sont avantagées par une certaine familiarité avec la carte et une approche thématique aux

problématiques environnementales, les ingénieurs ont de leur côté une forte capacité à mathématiser les problèmes, ainsi qu'une certaine aisance avec l'outil informatique (quel qu'il soit) ; les géologues semblent manquer de rigueur dans la procédure et leurs décisions découlent d'approches qualitatifs (ils discutent beaucoup de la qualité et de la typologie des critères), les ingénieurs présentent des démarches plus scolaires dans un but de résultat et non d'analyse.

Les spécificités des deux groupes sont reconnaissables dans les comportements observés et dans les résultats de l'analyse des données.

Les deux profils s'écartent des démarches-experts sur deux points : d'abord, ni les géologues ni les ingénieurs ne font leur analyse multicritère en commençant par la définition des seuils de validité du problème : ils ne font pas de sélections ou de masques et mobilisent, en général, beaucoup moins d'opérations de contrôles lors de la procédure. Néanmoins, entre les deux groupes, les ingénieurs, en règle générale, montrent des attitudes plus proches des démarches d'experts.

1.2.1 Les étudiants ingénieurs

En termes de schémas déclaratifs et procéduraux, correspondant aux démarches méthodologiques, on remarque chez les ingénieurs :

- 'découpage en sous-objectifs' : ils arrivent à découper le problème, même si le niveau de granularité n'est pas le même que celui observé chez les expert ;
- 'algébrique' : ils mobilisent beaucoup d'objets mathématiques, car il semble que toute leur réflexion passe par la mathématisation : par exemple, les critères sont discutées et traités sur un plan mathématiques (valeurs et seuils) et rarement sur un plan thématique (caractéristiques, pertinence, justification, corrélations avec d'autres critères). Cette propension à la mathématisation a des dérives : certains groupes ont cumulé des calculs d'ordre de classement et des pondérations tellement complexes qu'au final, ils ne sont pas en conditions d'interpréter et expliquer le résultat cartographique ;
- 'essai-erreur' : ils vérifient beaucoup d'actions car ils n'arrivent pas à bien définir les conditions des situations (Ohlsson, 1997).

En termes de contrôles, les étudiants ingénieurs en mobilisent beaucoup au cours des phases de création et interprétation des cartes pondérées, car ils sont en train de revenir sur les conditions de la situation qui ont été mal définies en début de la procédure. On remarque des schémas imagés de type :

- ‘up= more’ (haut=plus) : sur la vérification des valeurs affichées en légende
- ‘front-back’ (avant-arrière) : ils se concentrent sur le contraste des couleurs pour isoler les zones à analyser auxquelles ils ont préalablement affecté des tons de couleur qui ressortent de la scène (ex. rouge ou marron foncé) ;
- ‘dark-light’, ‘dark= more’ (foncé –clair foncé=plus) : ils analysent les tons de couleurs plus foncés qui correspondent aux meilleures zones
- ‘attacking’ (accrochage): ils cherchent des repères qui sont de nature plutôt géographiques (lieux, stations de ski, ..) mais, contrairement aux experts, ce schéma est activé qu’en fin de procédure, sur des actions de préconisation de site(s).

Le produit de l’activation de ces schémas (et de bien d’autres probablement, que nous n’avons pas investigués), de la mobilisation de différents objets conceptuels ainsi que des raisonnements qui en découlent sont des cartes d’aptitude dont la qualité est plutôt satisfaisante : parmi les trois cartes d’aptitude présentées par les trois groupes d’ingénieurs, une carte (G6) a obtenu une évaluation sur la qualité très proche de celles des deux premiers experts. On peut parler dans ce cas, de stratégie ‘gagnante’, même si les actions peuvent être mieux finalisées et réfléchies. Une deuxième carte (G4) présente un bon degré de sélectivité et, malgré des erreurs d‘évaluation de certains critères, elle permet d’identifier des zones aptes. Elle répond donc à son rôle d’aide à la décision. Il est intéressant de remarquer que les deux groupes G6 et G4 présentent de très fortes similitudes dans l’utilisation des objets conceptuels aux mêmes stades de la procédure de résolution (Chapitre VII). A l’opposé, une des trois cartes (G5) a montré une mauvaise qualité en termes d’analyse spatiale et de sémiologie : cette carte est inexploitable d’un point de vue de la sélectivité et ne peut pas supporter une prise de décision. Ici aussi, il est intéressant de souligner que les objets conceptuels que le groupe G5 mobilise ne correspondent *presque jamais (sur les 4 Tâches analysées)* aux objets conceptuels utilisés par les deux autres groupes. La succession d’actions et de choix menée par ce groupe peut se dire défaillante et des similitudes dans les comportements sont à chercher avec les groupes qui n’ont pas réussi leur carte d’aptitude chez les étudiants géologues.

1.2.2 Les étudiants géologues

Les trois groupes d'étudiants géologues montrent, globalement, moins d'actions engagées sur l'ensemble de la procédure; surtout, dans la phase initiale du problème, là où les experts analysent toutes les conditions possibles du problème, les étudiants géologues se focalisent sur la définition d'un critère prédominant (l'altitude ou l'exposition des versants) autour duquel ils construisent ensuite leur analyse. Ils mobilisent dans cette phase très peu de contrôles : la conséquence à cette lacune est qu'ils trainent des erreurs et des incohérences sur les phases successives. Le nombre de contrôles pendant les phases d'agrégation des sommes pondérées et d'analyse des cartes s'explique par la présence d'erreurs issues de la définition inappropriée des conditions de situation. Paradoxalement, c'est dans la dernière phase, celle de la préconisation du site, qu'on observe, chez les géologues, le plus grand nombre d'occurrences d'objets conceptuels : ils semblent mettre en ouvre toutes les stratégies pour pouvoir émettre une réponse au problème.

En termes de schémas cognitifs, déclaratifs et procéduraux, ils mobilisent :

- 'sous-objectifs' : ils arrivent à découper le problème en grandes phases et à préconiser des objectifs pour chaque phase, bien que la définition des paramètres (conditions) de chaque phase reste vague ;
- 'algébrique' : pour toutes les actions de reclassements des critères et de pondération; ces éléments montrent plus de prudence dans la manipulation des concepts mathématiques, et par conséquent des fonctionnalités SIG, que leurs collègues ingénieurs.
- 'essai-erreur' : ils vérifient beaucoup d'actions car ils n'arrivent pas à bien définir les conditions des situations (Ohlsson, 1997).

En termes de contrôles, les schémas imagés sont :

- 'dark-light', 'dark= more' (foncé-clair, foncé=plus): ils analysent les teints de couleurs plus foncés qui correspondent aux meilleures zones ;
- 'attacking' (accrochage) : ils cherchent les repères, mais uniquement dans la phase finale du problème ;
- 'ombre et lumière' : ils cherchent à détecter le relief et à reconnaitre la géomorphologie pour vérifier la pertinence de leurs meilleures zones.

Deux des trois cartes produites par les étudiants géologues ont abouti à des résultats décevants. La carte (G2) est totalement inexploitable : la démarche analytique n'a pas produit une carte sélective, et si l'identification des meilleures zones est déjà assez laborieuse pour le lecteur à cause de l'étendue de ces dernières, l'ajout en superposition à la carte pondérée, d'autres éléments d'analyse (stockages d'eau) rend la carte illisible. Le groupe (G2) montre un comportement assez différent des autres groupes : il commet une erreur dans le classement du critère prioritaire et met du temps à comprendre qu'il y a erreur et à le diagnostiquer. Le groupe n'active pas assez tôt des contrôles de vérification. En revanche, le groupe montre un nombre de contrôles de diagnostic important, car il est continuellement à la recherche de(s) l'erreur(s) qui empêche(nt) d'avancer dans la résolution. Cette impasse lui fait mobiliser des objets conceptuels différents de ceux des autres groupes aux mêmes stades de la résolution du problème (Chapitre VII). Le groupe (G2) a produit la pire carte analysée dans notre expérimentation. Nous en tirons des considérations, en traçant quelques lignes principales de cette stratégie défaillante, qui est aussi intéressante qu'une stratégie gagnante : les étudiants n'ont pas su définir des sous-objectifs au problème, et n'ont pas pu établir les conditions de la situation et typiquement, comme Ohlsson (1997) l'explique, leurs règles ont des limites d'applicabilité trop vastes. La non-perception de l'erreur initiale est un exemple concret de cette situation mal limitée.

La carte (G3) présente une sélectivité réduite à cause des meilleures zones très nombreuses et étendues : cela découle d'une démarche analytique peu réfléchie. Le groupe (G3) a effectuée des tests (tentatives) de sommes pondérées avec des agrégations et des poids pratiquement aléatoires) pour s'arrêter à des pondérations très proches de l'équiprobabilité. Par conséquent, les seuils des classes définis dans la discrétisation des critères ont pris une grande importance et impacte le résultat cartographique. Or, les conditions de la situation pour ces seuils sont, une fois de plus, pas bien délimitées, ce qui produit des classes peu sélectives. D'un point de vue de la lisibilité, la carte (G3) a été détériorée par l'ajout d'information analytiques supplémentaires, inadaptées au contexte et à la sémiologique (les buffers des distances). Le comportement du groupe (G3) ne présente pas des attitudes significatives : il montre des similitudes avec le groupe (G1), même si les contrôles du (G3) sont plutôt d'ordre diagnostic.

La carte (G1) est la meilleure carte produite par les étudiants géologues. Elle est lisible et esthétique et le choix de palette de couleur est approprié et évocateur (vert – marron, vert pour les zones moins propices, en plaine et vallée et marron pour les meilleures zones, en montagne). Toutefois, cette carte n'est pas pour autant optimale. En effet, elle n'est pas très

sélective dans la mesure où les zones des meilleures classes sont assez répandues. Seulement l'utilisation de l'outil de zoom permet de discerner les limites entre les différentes classes d'aptitude, représentées par un dégradé de marron. Aussi la prédominance du critère altitude apparait flagrante, car la distinction des classes d'aptitude suit, globalement, les courbes de niveaux. Malgré ces remarques, cette carte est le produit d'un groupe (G1) qui, même si dans la phase initiale du problème semble avoir mobilisé moins d'objets conceptuels par rapport aux autres meilleurs groupes (G4 et G6), montre une grande capacité de contrôle de ses actions et plus précisément de vérification. Ceci lui permet d'avancer par sous-objectifs et affinements itératifs. Dans les phases d'analyse des cartes des sommes pondérées et de choix de(s) site(s), le G1 est le seul groupe d'étudiants géologues à activer des contrôles de vérification.

Au regard de cette analyse, des profils et des comportements, fondés sur des éléments cognitifs ressortis des résultats de l'expérimentation, ont pu être tracés. Ces profils présentent des stratégies communes et des différences et amènent à des issues cartographiques plus ou moins performantes. L'étude de ces profils est un moyen pragmatique pour prendre conscience des façons d'appréhender un problème et d'en construire la solution.

2. Des connaissances sur les raisonnements à la proposition des aides didactiques

Les différences entre le type d'objet (ou de contrôle ou d'action) mobilisé par les experts ou par les étudiants, ainsi que les phases de la procédure où ces objets ont été mobilisés, sont utilisées pour concevoir des aides qui amènent les étudiants vers les stratégies expertes identifiées comme importantes pour les apprentissages. Les aides sont des moyens didactiques (lorsqu'ils se focalisent sur le contenu des enseignements) et pédagogiques (lorsqu'ils se focalisent sur les méthodes d'enseignement) qui interviennent à des moments précis du cours pour faciliter ou activer des apprentissages. Dans le cas de notre étude, les aides correspondent à des modifications ponctuelles et ciblées, que nous introduisons dans le dispositif de formation conçu en phase expérimentale (le scénario). Ces propositions nous semblent particulièrement adéquates car elles sont réfléchies en s'appuyant sur les résultats du protocole expérimental, et pour certaines sur un premier test effectué dans les deniers mois de cette thèse. Nous pouvons considérer les aides selon les catégories de la taxonomie des objets conceptuels (Chapitre VII) et les points défaillants repérés chez les étudiants dans chaque

catégorie. Proposer des aides didactiques à partir des lacunes sur les objets conceptuels (non) mobilisés, comporte forcement une réflexion sur les actions et les opérations, dont particulièrement celles de contrôle, qui peuvent être faites pour activer de tels objets.

Nous présentons ci-après quelques exemples d'aides à la mobilisation des objets conceptuels (tels que ceux de notre taxonomie) dans la conception d'un scénario de cartographie d'aptitude.

1. La catégorie de l'objet '*algèbre*' devrait comporter un important travail sur les méthodes de discrétisation de la donnée géographique : plus de temps devrait être consacré au test des différentes méthodes, des variations des seuils devraient pouvoir être visualisées sur la carte et un critère (au choix) devrait pouvoir être classés avec toutes les méthodes pour en discuter la validité et les limites.

   Quelques formules des sommes pondérées devraient être écrites au tableau pour matérialiser les composantes et pour faire prendre conscience de la spatialisation des valeurs ; aussi les résultats arithmétiques affichés en légende seraient plus transparents et compréhensibles.

   Quelques sommes pondérées devraient être testées avec des coefficients multiplicatifs extrêmes, et les variations des résultats cartographiques, calculés par distribution statistique des cellules. Cela aiderait à prendre conscience de l'impact de l'importance relative sur les critères.

   Des mesures de surfaces ou de périmètres devraient être effectuées sur les cellules des meilleures classes, afin d'évaluer les dimensions en taille réelle.
2. La catégorie de l'objet '*couleur*' nous ramène à des considérations sur la sémiologie graphique : bien que des consignes sur les règles de sémiologie graphique à respecter soient données au début du cours, les résultats (cf. Chapitre VII) montrent que ses consignes sont rarement prises au sérieux. Il faut souligner que dans l'environnement graphique d'ArcGIS (les propriétés, symobologie), les étudiants trouvent à leur disposition plusieurs palettes de couleurs très riches et attrayantes. L'application de différentes gammes de couleur est donc souvent régie par des choix et des gouts personnels. Une façon de sensibiliser les étudiants à ces règles serait de leur soumettre les différentes cartes produites par les promotions de géologues et ingénieurs dans le cadre de notre expérimentation, et de leur faire évaluer la qualité avec notre grille d'évaluation. Les différences d'évaluation ouvriraient la discussion sur l'importance

de la sémiologie. Aussi les étudiants devraient essayer de prendre des décisions de localisation de site avec les cartes de plus mauvaise qualité.

3. La catégorie de l'objet '*géographie*' est essentiellement concernée par les stratégies d''attacking' (Chapitre VIII) qui sont assez rares chez les étudiants. Dans le cas de notre problème d'implémentation de station de ski, il serait peut-être nécessaire de fournir aux étudiants la couche avec les stations de ski existantes, d'une part pour stimuler leur capacité à se repérer, et d'autre part pour augmenter la sélectivité de leur carte d'aptitude vu que toutes les stations de ski actuelles seraient à exclure.
4. La catégorie de l'objet '*orographie*' se matérialise à travers l'observation du relief sur la couche 'ombrage' : la reconnaissance de la géomorphologie peut être améliorée par l'usage de globes virtuels, tels que Google Earth ou ArcGlobe, proposé par ArcGIS. La reconstitution du terrain en 3D, le réalisme de l'imagerie et les outils de visualisation (zoom, simulateur de vol..) fournis par les globes virtuels, sont aujourd'hui un atout incontournable pour confirmer (ou pas) les résultats des analyses spatiales. Le réalisme crée par ces environnements aide les étudiants à prendre conscience de l'impact pragmatique, tangible de leur projet de localisation de site : les zones les plus aptes à répondre au problème donné, désignées par leur carte d'aptitude, sont effectivement réelles.
5. La catégorie de l'objet '*zone analysée'* interpelle l'attention des sujets (étudiants et experts) sur les classes d'aptitude issues des sommes pondérées. Les sujets ont attribué une gamme de couleur à ces classes qui se présentent en zones de couleur différentes. L'analyse se fait sur ces zones de couleur et elle doit amener à une évaluation de la sélectivité et de la pertinence de la carte ainsi qu'au choix d'un site. Cette analyse peut être faite par des opérations arithmétiques simples, qui aident à prendre consciences de la nature numérique de ces zones. Par exemple, les étudiants devraient effectuer des calculs de distribution de pixels (correspondant à une classe) pour réfléchir à la sélectivité de la carte. Ils devraient aussi pouvoir réaliser des calculs de surfaces sur les pixels et les traduire en unité de mesure métrique, cela peut les aider à considérer le réel dimensionnement des zones à étudier. Enfin les étudiants devraient travailler une fois de plus sur les seuils des classes, en effectuant des extractions des valeurs maximales (retenir que les classe > d'un certain seuil) afin de jouer sur les limites des meilleures zones. De façon générale il faut donner aux étudiants la possibilité de passer de l'exercice académique à la réalité de terrain.

Ces suggestions sont définies à partir de quelques points de difficultés et d'écarts par rapport aux experts, répertoriés chez les étudiants, mais d'autres peuvent être considérés. Un autre problème est de stimuler les opérations de contrôle chez les étudiants. Une proposition concrète est de créer une situation d'échange des productions cartographiques lors des étapes clés de la procédure (par exemple, reclassement, pondération, agrégation). « Travailler avec les données produites par les autres » devrait inciter les étudiants non seulement à contrôler minutieusement les méthodes de classement, les seuils des classes…, mais aussi à argumenter, discuter et à négocier les éventuelles modifications.

3. Des suggestions pour concevoir des nouveaux dispositifs d'apprentissage (SIG)

La conception de dispositifs d'apprentissage pour les SIG constitue l'objectif ultime de notre recherche. Pour l'atteindre, il nous a fallu traiter des éléments à granularité disparate : des tâches, des compétences génériques, des objectifs d'apprentissage, des concepts, des actions, des comportements. C'est finalement dans la combinaison de tous ces ingrédients que nous construisons la réponse à cette question. De nouveaux dispositifs d'apprentissage peuvent être conçus grâce à l'identification des compétences métiers, des mécanismes cognitifs qui régissent ces compétences et aux stratégies didactiques et pédagogiques qui les mobilisent.

Dans une perspective pédagogique, un résultat de cette recherche est constitué par l'apport de modèles pédagogiques. Un premier modèle est fourni avec le scénario du protocole expérimental décrit au Chapitre V et détaillée en Annexes V. Ce scénario a été conçu selon les principes de pédagogie active d'Apprentissage Par Problème et a servi de base d'observation pour nos expérimentations. Sur la base des résultats des observations, des améliorations ont été proposées et un deuxième modèle a été conçu. Il est détaillé en Annexe IX. Parmi les modifications apportées quelques unes correspondent aux aides didactiques proposés dans le paragraphe 2. Dans le cadre de l'approche par Apprentissage Par Problème, les améliorations ont concerné:

- des moments de mise au point sur l'atteinte ou pas des sous-objectifs du problème ont été planifiés, pour éviter aux étudiants de trainer des erreurs tout au long de la procédure de résolution ;
- une alternance cohérente entre cours transmissifs (explications et démonstrations) et cours de restructurations (en réponse aux difficultés énoncées par les étudiants) a été

mise en place : afin d'accélérer les temps d'appropriation des techniques SIG, des démonstarations ont été introduites ;

- une réduction du nombre des membres d'un groupe : 4 personnes ont constitué le nombre maximal de participants, afin de garantir l'implication et la motivation de tout le monde.

D'autres suggestions restent à considérer :

- le réglage du temps et du rythme de travail imposé aux étudiants : la période du cours devrait avoir une durée comprise entre trois et cinq semaines, le volume horaire total serait idéalement de 20 heures, réparties en 2 séances de 2h par semaine, afin de permettre aux étudiants d'effectuer le travail individuel, de s'approprier des contenus des ressources documentaires et de préparer les questions pour le tuteur ;
- l'intégration du scénario dans une démarche globale de projet transversal, combinant relevés de terrain, analyses spatiales et pratiques métiers. En effet « le recours à la contextualisation par le biais de dispositifs différents permet d'exercer des habiletés transversales dans des situations variées, augmente les possibilités de transfert des apprentissages et stimule l'engagement des étudiants dans des tâches qui se veulent signifiantes. L'interdisciplinarité telle qu'elle est conçue ici consiste à placer le groupe d'apprenants dans une situation complexe qui exige qu'ils mobilisent et intègrent, de manière cohérente, des savoirs et savoir-faire multiples (techniques, scientifiques, méthodologiques, manuels) relevant de plusieurs disciplines ainsi que des habiletés transversales non disciplinaires et cela en une seule et même activité d'apprentissage ». (Didaskalia, 2004).

Le deuxième scénario a été testé en Février 2013, dans le cadre d'une initiation à l'analyse spatiale avec ArcGIS, dispensée à des étudiants de 'Licence Professionnelle Protection et Prospection de Ressources Souterraines' (LPPRS) de l'Université Joseph Fourier de Grenoble. Les conditions de formation et les profils des étudiants géologues sont identiques à ceux de notre protocole expérimental. Ce cours n'ayant pas fait l'objet d'une évaluation expérimentale, des résultats en termes de qualité des cartes réalisées ont pu être établis. Il est intéressant de souligner que les cartes d'aptitude des trois groupes d'étudiants géologues de la promotion 2013 présentent, par rapport à la promotion 2012, une nette évolution de l'outil cartographique pour la prise de décision. A titre d'exemple, les Figures 90 et 91 montrent un

extrait d'une des présentations finales du projet où la carte d'aptitude est drapée sur le globe virtuel (ArcGlobe).

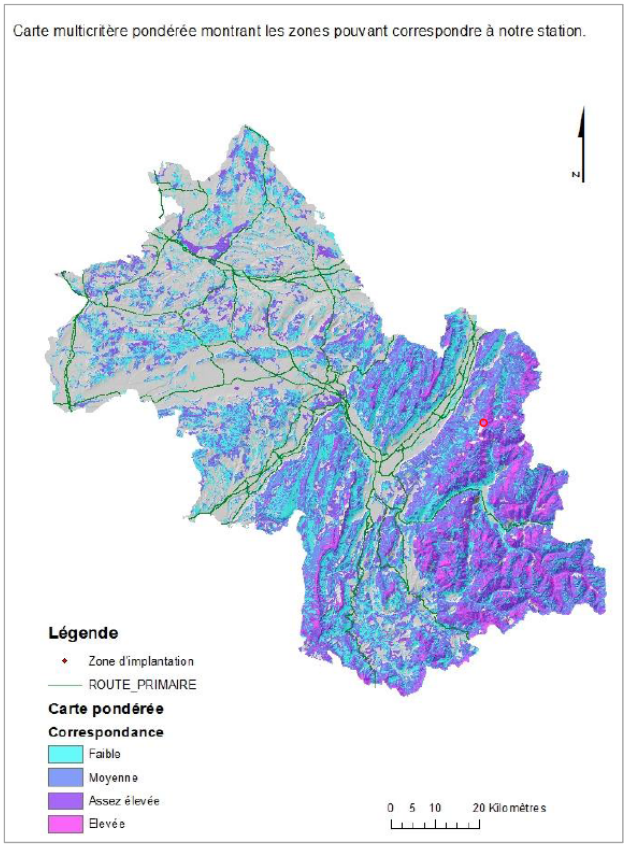


Figure 90 *Carte d'aptitude par un groupe de la promotion LPPRS 2013.*

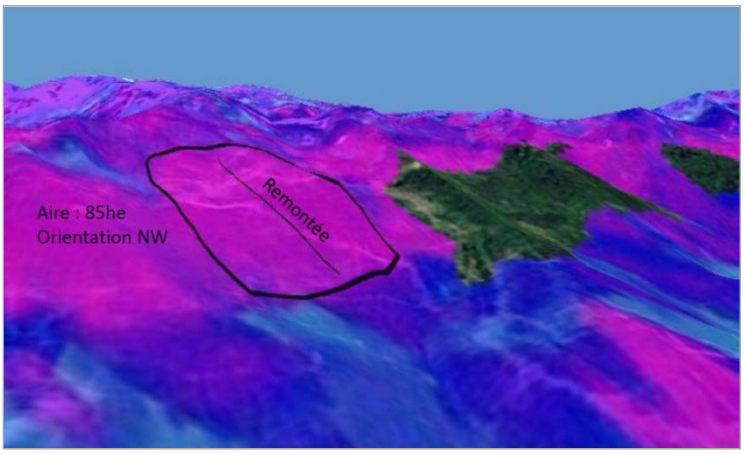


Figure 91 *Site préconisé par un groupe de la promotion LPPRS 2013.*

Nous ne tirons pas de conclusions sur la performance de ce deuxième scénario, d'autres tests et des expérimentations seraient à envisager. Malgré ces précautions, la bonne qualité des

trois projets sur trois groupes, encourage notre détermination à affiner et régler les paramètres de la scénarisation.

Pour finir, nous soulignons que la finalisation de ce genre de dispositif peut difficilement aboutir en quelques mois, des recours itératifs et de validations sont nécessaires pour une mise en œuvre qui devient efficace après deux ou trois ans de pratique (Didaskalia, 2004). La Figure 92 présente une schématisation de cette approche itérative et en boucle.

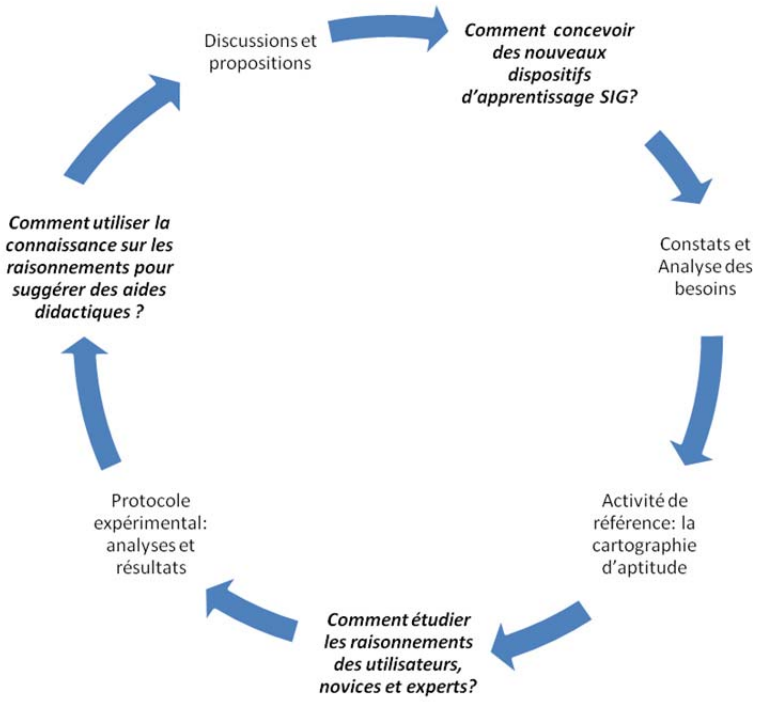


Figure 92 *Cycle de l'approche itérative en boucle*

4. Limites et Conclusion

Les résultats que nous avons discutés sont issus du protocole expérimental dont les limites sont à souligner.

Le protocole expérimental de notre recherche a impliqué 68 sujets, 2 enseignants-tuteurs et 2 chercheurs. Il a comporté environ quatre mois de recueil de données et quatre mois d'analyses. Il a été le produit de la combinaison d'approches innovantes, issues de la didactique et de la pédagogie active, et de cadres expérimentaux issus de la psychologie cognitive. Cette combinaison de différentes approches mérite quelques remarques.

Le premier aspect à souligner est que les sujets n'ont pas opéré exactement dans les mêmes conditions : les experts ont été enregistrés tout au long de leur activité, pour une période d'environ 4 heures, et ont résolu le problème de localisation avec la cartographie d'aptitude de manière individuelle ; les étudiants, quant à eux, ont été enregistrés au cours des moments clés de la résolution du problème et de la réalisation cartographique, pendant des activités de groupe. De plus, bien que le volume horaire attribué à la résolution du problème était le même pour les deux groupes d'étudiants, les étudiants géologues ont résolu le problème au cours d'un module qui s'est déroulé sur une période de deux semaines, tandis que les étudiants ingénieurs ont travaillé sur le problème pendant neuf semaines.

Pour des contraintes professionnelles, les experts ne pouvaient pas nous accorder plus qu'une demi-journée ; pour des raisons curriculaires, les périodes de cours imposées aux deux promotions n'étaient pas extensibles ou modifiables : à nous de trouver, à travers le scénario, la bonne articulation des contenus, des objectifs d'apprentissage et des exigences expérimentales pour que les deux situations soient comparables. Si, avec les experts, la question du temps n'est pas déterminante, car les temps courts pour résoudre ce type de problématique, sont plutôt un paramètre proche des situations réelles, les différences du temps imparti sont donc à considérer surtout au sujet des étudiants géologues. Ceux-ci ont peut-être été pénalisés par les rythmes serrés qu'on leur a imposé : les cours s'enchainant pratiquement d'un jour sur l'autre, ils ont surtout manqué de temps de replis et de réflexion. La question du temps n'est pas anodine : elle a un impact important sur le déroulement des apprentissages, elle coordonne tout l'ensemble des paramètres qui entrent en jeu dans la scénarisation d'un cours et elle doit donc être évaluée avec attention. On remarque le contre-exemple de la situation des géologues chez les étudiants ingénieurs : les semaines de cours ont tellement étalés les enseignements que, à chaque cours, les enseignants devaient réviser

systématiquement sur ce qui avait été fait la semaine précédente, ce qui à engendré des retards sur le programme et sur le recueil de données. L'évaluation et la répartition du temps pour une activité d'initiation à l'analyse spatiale avec les SIG, fera l'objet des suggestions pédagogiques proposées ici

Le deuxième aspect concerne l'analyse des données verbales individuelles et de groupe. En nous appuyant sur les recommandations de Chi (1997), nous avons recueilli les données auprès des experts selon deux méthodes : l''explanation protocol' et le 'thinking-aloud protocole', qui ne sont pas incompatibles, mais qui amènent à des considérations différentes. La première met en évidence les connaissances activées ; la seconde met en évidence les procédures employées. A partir du discours des experts, qui était libre et stimulé par les échanges avec le chercheur, les deux approches nous ont été utiles pour identifier les concepts et les opérations qui constituent une sorte de référent d'expertise. La production verbale individuelle des experts venait de soi, étant donné qu'ils étaient seuls (observés par le chercheur) devant l'ordinateur à réaliser leur carte d'aptitude. Lors de la production verbale collective des groupes d'étudiants, les interactions venaient de soi du moment où nous avons décidé que nous aurions observés les utilisateurs novices en situation 'authentique'. Cette situation est d'autant plus pertinente vue qu'elle est soutenue par les principes de la pédagogie active, l'Apprentissage Par Problème, que nous avons adoptée (Chapitre V). Dans cette approche le rôle du groupe est incontournable à la construction des savoirs : le groupe est une aide pour chacun de ses membres à identifier ce qui doit être appris. Il est également l'endroit où, après une phase d'étude individuelle, les étudiants font le bilan de leur apprentissage. A l'intérieur du groupe, chaque étudiant est confronté naturellement à des « conflits », lorsque les explications sont contradictoires. La gestion de ces conflits favorise la qualité et la profondeur de l'apprentissage (Bourgeois & Nizet, 1997). On retrouve les mêmes opinions relatives à l'activité de groupe chez Okada et Simon (1997, in Armstrong and Densham, 2008) dans le cas spécifique de la prise de décision : « le groupe enrichi le processus de résolution, parce qu'il explore un panel plus large d'alternatives et alimente plus d'hypothèses qu'un décideur individuel. Aussi il stimule la demande interpersonnelle d'explications, ce qui amène à la co-construction de la connaissance ». Le processus de comparaison et d'évaluation des cartes produites est une phase particulièrement critique dans un contexte de prise de décision collective (en groupe). Lorsque différents critères sont utilisés et différentes pondérations sont allouées, les choix doivent être négociées parmi les membres du groupe

(Armstrong et Densham, 2008). Les interactions du groupe reflètent donc les raisonnements, les stratégies ou les méconnaissances qui accompagnent tous ces choix.

En conclusion, à travers notre méthode expérimentale, nous avons identifié les éléments cognitifs qui caractérisent ces raisonnements et nous les avons associés à des structures mentales, des schémas, que l'on pourrait définir 'collectifs'. Ces schémas 'collectifs ' peuvent être comparés entre eux. Pareillement, nous avons identifiés des schémas cognitifs 'individuels ' issus des expérimentations avec les experts, qui peuvent représenter des stratégies de référence pour les novices.

Les résultats de cette recherche ont pu être discutés selon une dimension cognitive (paragraphe 1), didactique (paragraphe 2), et pédagogique (paragraphe 3).

Les postures du chercheur et de l'enseignant sont à ce stade confondues : aux résultats du protocole, s'associent les observations de la vie de la classe.
D'un point de vue de la recherche, nous considérons que les résultats du protocole expérimental, expressément conçu pour observer, capturer et comparer les composants de mécanismes cognitifs dans une activité spécifique, (Chapitre VII), nous apportent de nouvelles connaissances sur les processus qui régissent la réalisation d'une carte d'aptitude. Les considérations que nous évoquons sont à consolider par des expériences ultérieures, ciblées et approfondies.
Sur le plan pédagogique, nous considérons que les observations issues de la mise en œuvre du dispositif dans son ensemble (situation d'apprentissage, pédagogie active, observation de classe…) nous ont fourni une visibilité sur les capacités des étudiants à s'adapter à des conditions nouvelles d'apprentissage. Par exemple, des attitudes constructives ou réfractaires des étudiants, l'adhésion ou le refus à la démarche pédagogique, des intentions de réussite ou d'acquisition de compétences nouvelles ont pu être observés. Tous ces aspects, difficilement quantifiables, contribuent à une vision complète et complexe des contextes d'enseignement et impulsent des pistes concrètes d'applications didactiques et pédagogiques.

CHAPITRE IX : CONCLUSION

Dans cette recherche exploratoire, trois objectifs généraux avaient été fixés :

1. définir une taxonomie des composants des raisonnements mobilisés lors de l'activité de cartographie d'aptitude;

2. identifier les différences entre les démarches des experts et les démarches des étudiants ;

3. proposer des aides didactiques et pédagogiques à destination des étudiants.

Ces trois objectifs ont été atteints, avec les limites, les critiques et les propositions que nous présentons, dans ce chapitre.

1. Des critiques et des nouvelles questions

Cette thèse a représenté un défi ambitieux : elle a voulu parcourir, en trois ans, un chemin d'exploration large et complexe. Dès les premiers mois de travail, une préoccupation centrale de ce parcours, a été la définition d'hypothèses et d'indicateurs précis sur lesquels il était possible de construire notre expérimentation et notre démarche didactique. Ce tâtonnement a alimenté la nécessité, dans un premier temps, d'analyser les secteurs professionnels pour y identifier ceux majoritairement concernés par des pratiques métiers en géomatique. Dans un deuxième temps, nous avons dû 'identifier les éventuelles difficultés des apprenants à s'approprier ces pratiques métiers et notamment les activités de cartographie d'aptitude. La notion de 'difficulté' a été précisée à travers l'identification de raisonnements et de stratégies défaillantes. Des indicateurs de raisonnement ont pu être établis. Les cadres théoriques relatifs aux mécanismes de perception et raisonnement visuels (MacEachren, 1995), ainsi que ceux relatifs aux modèles mentaux (Johnson-Laird, 1983) ont appuyé notre démarche de recherche, qui s'est voulue extrêmement exploratoire. Ceci a eu des conséquences sur le plan expérimental :

- le volume important de données à traiter, qui n'a pas pu être achevé dans le temps imparti. Nous imaginons que des résultats sur l'enchainement des stratégies individuelles auraient pu être obtenus de l'analyse des interactions verbales des binômes ;

- des résultats peu généralisables : les résultats de l'analyse quantitative sont critiquables car ils reposent sur un nombre faible d'observations. Pour être généralisables, il faudrait mener l'observation sur un nombre plus important de sujets, à la fois experts et novices ; et ceci à partir d'hypothèses qui soient en relation avec les composants du raisonnement. Aussi, il serait nécessaires de ré-conduire des expériences sur deux voir trois années, avec les mêmes typologies de profils utilisateurs, les mêmes conditions pédagogiques, pour évaluer si les tendances se confirment.

Un deuxième ensemble de critiques est à constater sur le plan plus proprement pédagogique : indépendamment de nos questions de recherche, nous avons voulu créer une situation d'enseignement authentique, observable dans les meilleures conditions possibles, en éliminant tous les biais d'une situation d'enseignement traditionnelle. Nous avons décidé de passer d'une forme transmissive du savoir, centrée sur l'enseignant, à une forme d'appropriation des connaissances, centré sur l'étudiant, en suivant la méthode de pédagogie active dites d'Apprentissage Par Problème. Cette approche est à la fois innovante et déroutante autant pour les étudiants que pour les enseignants. En effet, des tuteurs novices en APP, des étudiants réfractaires à ces nouvelles méthodes, et au mieux déconcertés, des temps impartis mal estimés, ont fait que cette première expérience, conduite dans le cadre de notre protocole expérimentale, a été risquée. Contrairement à nos intentions initiales, la mise en œuvre de cette méthode active n'a pas été un facteur moteur mais, sans être un véritable obstacle, elle a engendré hésitations et désordres chez les étudiants ingénieurs. Les spécialistes des pédagogies actives (Raucent et Al., 2010) affirment que la déconstruction fait partie du développement et de la construction de la connaissance. Seulement, pour être efficace, un tel processus nécessite une certaine habitude aux pratiques et une certaine période d'adaptation. N'ayant eu ni pratique ni période d'adaptation, et étant donc impacté par l'application inexpérimentée de cette méthode pédagogique, une question devient légitime : *si nous avions prodigué des enseignements classiques, quels objets conceptuels, contrôles et actions aurions-nous observé chez les étudiants?*

Conscients de ces entraves, des compromis, notamment en termes de temps impartis et objectifs d'apprentissage, ont été acceptés dans la conception du deuxième scénario proposé l'année suivante (Chapitre VIII).

Une troisième critique concerne le manque de protocole expérimental sur les observations conduites avec la promotion d'étudiants en Licence Professionnelle 2013. Comme expliqué plus haut, le cours donné à cette promotion, a bénéficié des améliorations conçues sur la base de l'interprétation des résultats et des retours des étudiants. Au-delà du fait que cette promotion nous a semblé plus sérieuse et motivée, les attentes ont été tellement satisfaites, qu'il aurait été très constructif de pointer sur les éléments cognitifs qu'ils ont réussi à mobiliser pendant les moments critiques de la procédure de résolution. Il est évident que leurs stratégies sont plutôt gagnantes et qu'elles se rapprochent des stratégies experts ; *est-ce que ce sont nos étayages didactiques qui ont facilité la mobilisation de ces stratégies gagnantes ?*

Ces deux dernières questions peuvent s'intégrer à des nouvelles perspectives.

2. Des pistes de recherche

A l'issue de cette thèse des nouvelles pistes de recherche se dessinent. Si cette recherche a dégagé des thèmes de réflexion, beaucoup de détails d'investigation restent à éclaircir ; pour cela, l'implication des cadres théoriques cognitivistes peut être précisée et renforcée.

Une première piste est issue de la psychologie cognitive. Les apports de cette discipline à l'observation et à l'analyse des comportements d'utilisateurs, afin de pouvoir reconstituer les schémas cognitifs qui interviennent dans les raisonnements spatiaux et visuels pour l'analyse cartographique sont fondamentaux. Comme nous l'avons expliqué plus haut, l'étude des schémas permet de comprendre et faire évoluer les raisonnements (MacEachren, 2005). Ces approches psycho-cognitiviste semblent être, dans la géomatique française, sous-exploitées. Comme nous l'avons évoqué dans le chapitre IV, dans les pays anglo-saxons, qui héritent des décennies d'interdisciplinarité entre les sciences cognitives et d'autres champs de recherche (Simon,1962, Larkin,1980, Tversky,1993), l'introduction des approches et des méthodes cognitivistes dans les Sciences de l'Information Géographique est très courante. Des résultats significatifs ont été obtenus, notamment sur la compréhension des mécanismes cognitifs experts dans l'interprétation de cartes topographiques (Kent, 2010), et des réponses concrètes aux problématiques d'extraction de l'information d'interfaces visuelles ont été données (Jankowski et Andrienko, 2001, Fabrikant et Al., 2011). Sous l'encadrement des approches physico-cognitivistes, des questions de recherches plus approfondies et précises que celles posées dans le cadre de l'exploration globale conduite dans cette thèse, peuvent être

adressées. Les questions peuvent concerner des observations sur des tâches circonscrites, conduites avec des méthodes de recueil de données adaptées : des questionnaires plus complexes à choix multiples, des pré-tests et post-tests, des enregistrements individuels, des enregistrements d'activité sur écran et de la traçabilité des opérations, des logiciels de traitement de données verbales. Sans rien enlever au travail méthodique de codage des données verbales, qui est indispensable pour saisir les contenus profonds des raisonnements, tous ces supports contribuent à préciser et finaliser les analyses. Aussi, des protocoles expérimentaux avec un groupe test et un groupe témoin, classiques en sciences cognitives, peuvent être prévus. L'utilisation de groupes tests et témoins supporterait, par exemple, des hypothèses relatives à l'efficacité d'aides didactiques : la mobilisation d'une stratégie est induite par les aides (groupe test), lorsque les aides ne sont pas conçus (groupe témoin), la stratégie n'est pas activée.

La complémentarité de différentes méthodes et techniques cognitivistes permettrait d'obtenir des résultats traitables d'un point de vue statistique et donc généralisables.

Une deuxième piste concerne le développement d'outils cognitifs. Un des aspects que nous n'avons pas approfondi durant cette thèse, relève de l'ergonomie des interfaces SIG, et plus précisément de celles d'ArcMap-ArcGIS, l'environnement que nous avons utilisé. Ce questionnement n'a pas été approfondi pour deux raisons :

- premièrement, car l'étude des problématiques liées au design des Interfaces Homme Machine (IHM) n'était pas un des objectifs de cette thèse, d'autant plus que le domaine de recherche en IHM et un domaine à part entière, dont nous ne sommes pas spécialistes;
- deuxièmement, dans notre cas, avant de pouvoir faire des propositions d'ergonomie, il était indispensable de connaitre les structures cognitives (encore les schémas) qui permettent ou pas l'interprétation des environnements graphiques présentés sur les interfaces.

Or, au regard des résultats obtenus et des ressentis des étudiants, il semblerait que certaines difficultés notionnelles soient augmentées par la complexité de l'environnement informatique. ArcGIS est actuellement désigné comme le SIG le plus performant du monde de la géomatique. Mais le haut niveau de ses prestations et la richesse de ses fonctionnalités s'obtiennent au prix d'une architecture fonctionnelle: des multiplicités de menus contextuels accessibles des barres d'outils, des fenêtres d'algorithme, des chemins différents pour

atteindre la même fonctionnalité. Beaucoup d'enseignants, plutôt dans des démarches transmissives, considèrent inutile de laisser les étudiants piétiner dans l'appropriation de ces outils : des démonstrations sont alors systématiquement produites pour faciliter l'accès aux traitements. S'il faut accepter que des phases, chronophages, de découverte technique des outils soient nécessaires pour la prise en main d'ArcGIS, il faut être conscient qu'un obstacle plus profond entrave la construction de la connaissance chez des novices : (l'ergonomie de) l'arborescence des plus de 250 géo-traitements (la Toolbox). Comme nous l'avions présenté plus haut (Chapitre III), l'accès aux géo-traitements se fait via des boites dont l'organisation est thématique et pas analytique : l'utilisateur doit construire son parcours de résolution avec les nombreuses fonctionnalités distribuées d'une boite à l'autre. Pour un utilisateur non expérimenté, à la difficulté de savoir quel procédé appliquer à son problème, s'ajoute la difficulté d'identifier la fonctionnalité correspondante et appropriée. Une solution relativement simple et pragmatique est la création d'arborescences personnalisées, des fonctionnalités spécifiques au traitement envisagé : ArcGIS permet la création de boites 'vides' dans lesquelles l'utilisateur peut insérer les fonctionnalités nécessaires à la résolution de son problème. L'enseignant pourrait, au préalable, constituer des boites spécifiques au problème spatial abordé. Ceci pose la question : *comment peut-on faciliter la tâche des enseignants qui veulent utiliser ArcGIS (notamment pour la réduction du menu) ?*

La Figure 92 illustre une partie de développement de l'arborescence de la Toolbox d'ArcMap, organisée thématiquement et par ordre alphabétique. L'encadré, en haut à droite de la figure, montre une proposition de Toolbox bridée ne comprenant que les principales fonctionnalités nécessaires à réalisation d'une carte d'aptitude avec des méthodes d'analyse multicritère. Même en voulant créer un parcours de concepts et méthodes de résolution (allant du haut vers le bas), le logiciel impose l'organisation alphabétique : les analyses de Surfaces sont alors placées après les méthodes de Superposition, ce qui ne correspond pas à la procédure de résolution.

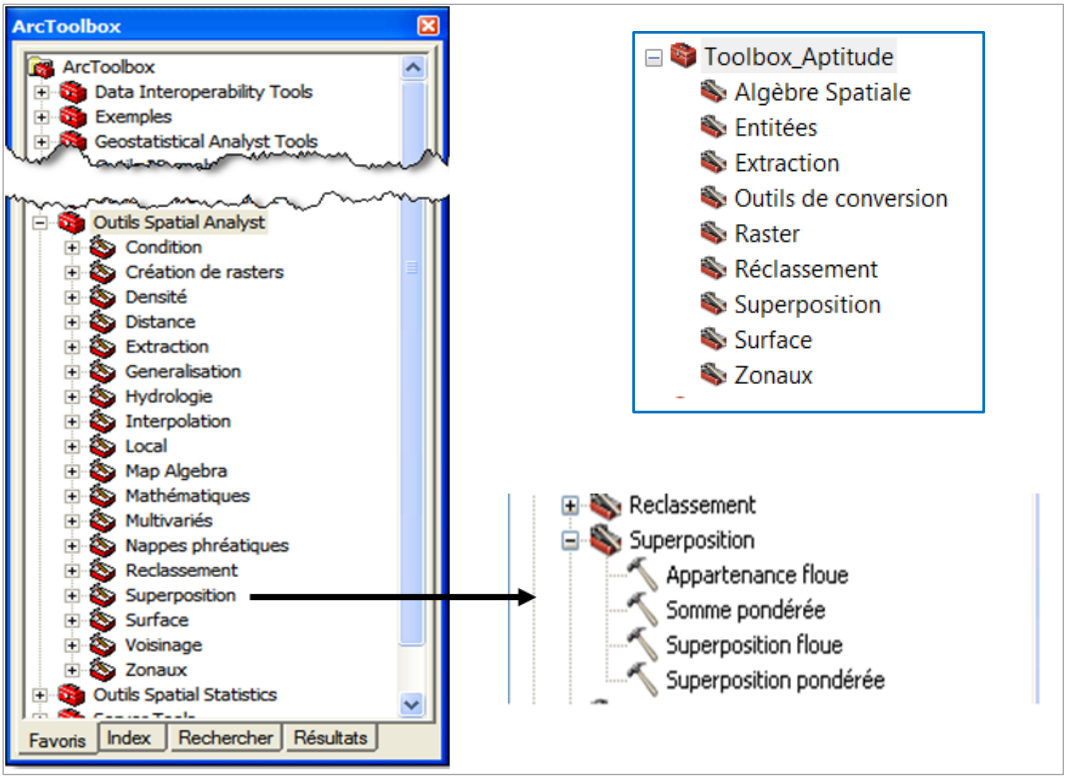


Figure 93 *Un extrait de la Toolbox : les fonctionnalités sont organisées thématiquement et par ordre alphabétique. Dans l'encadré bleue de droite une proposition de Toolbox bridée comprenant que les principales fonctionnalités nécessaires à réalisation d'une carte d'aptitude.*

Une piste de recherche qui pourrait apporter des réponses à cette problématique peut être trouvée en didactique professionnelle, dans les travaux de Rogalski (2006, 2007) sur la conception d'outils d'aide pour le développement de compétences. Dans le cadre des ses recherches sur la formations d'opérateurs dans les environnements dynamiques (usines de production), Rogalski et Samurçay (1992) proposent un modèle d'organisation de connaissances opérationnelles, KEOPS[17], qui élargit la notion de champ conceptuel de Vergnaud (1991) aux domaines professionnels. Il comporte : (K) une structure des connaissances (un système de notion, «ou « concepts » organisée en niveaux) ; (E) un ensemble de données d'expériences (problèmes, solutions) ; (O) des outils cognitifs (logiciels d'aide, présentations externes : schémas, synoptiques, abaques, méthodes de résolutions de problèmes) ; (PS) une structuration des problèmes (classification, concepts en jeu, modes opératoires) (Samurçay et Rogalski, 1992). Les outils cognitifs faisant partie de ce modèle,

[17] Samurçay et Rogalski, Formation aux activités de gestion d'environnements dynamiques : concepts et méthodes. Education Permanente (1992).

sont des artefacts dans lesquels il est possible d'intégrer les concepts pragmatiques et /ou la structure conceptuelle de la situation (appelée sémantique) consiste à jouer sur la syntaxe (les représentations externes) afin d'acquérir la sémantique par l'action, ou inversement (Rogalski, 2007).

Dans le cas de l'utilisation de la Toolbox d'ArcGIS, une réflexion peut être menée sur comment faire évoluer le répertoire de fonctionnalités actuelles, vers un véritable outil de développements cognitifs : les liens entre la sémantique, la syntaxe et la conceptualisation, en vue de la modélisation des situations-problème par secteur professionnels, sont à approfondir.

Une troisième piste concerne les apports de la recherche en eye-tracking (oculométrie). Grâce aux progrès techniques, les études sur la fixation oculaire, l'eye-tracking, permettent de déterminer les mouvements des yeux et notamment les fixations (pauses pendant lesquelles l'œil encode une information, représentées par les cercles) et les saccades (rapides mouvements entre les fixations, représentées par les lignes). En étudiant les mouvements oculaires lors de l'exploration de scènes visuelles, on a révélé certaines propriétés des mouvements oculaires et les facteurs les influençant. Dans le domaine des Sciences de L'Information Géographique, les recherches conduites par S.I. Fabrikant (2005-2011) s'interrogent sur comment les géomaticiens, les experts en géo-visualisation et les cartographes peuvent s'assurer que leurs choix de conception ergonomique et sémiotique produisent des interfaces réellement efficaces pour que l'utilisateur puisse en extraire les informations. Itti et Koch (2001) présentent un cadre computationnel pour modéliser la saillance visuelle, basé sur les principes neurobiologique de l'attention visuelle. Ce modèle est utilisé comme référent pour comparer les données issues des mouvements oculaires des utilisateurs observés.

Il est prouvé que les utilisateurs novices ont tendance à extraire l'information en se basant sur la saillance perceptuelle plutôt que sur la pertinence thématique (Fabrikant et Goldsberry, 2005). Une question centrale concerne comment l'attention visuelle de novices est modifiée lorsque les items thématiquement pertinents sont rendus encore plus perceptibles par une saillance améliorée par le design. Une autre question concerne la comparaison entre l'attention visuelle des experts et celle des novices : on pourrait s'attendre que les spécialistes d'un sujet, orientent leur attention vers les portions du display thématiquement relevant, en délaissant ce qui est rendu saillant (Fabrikant et Goldsberry, 2005). L'exploration des stratégies de recherche visuelle dans un contexte géographique a fait l'objet d'une large

littérature et s'est intéressée à différents environnements géo-visuels, tels que les cartes météo, les cartes thématiques animées, les cartes de relief en 3D (Fabrikant et Al., 2004, 2005, 2011). Ce courant est de plus en plus au centre des intérêts scientifiques dans les domaines de la Cognition visuelle et de la Géo-visualisation, (Pré-Conférence de la Commission GeoVIS, ICC 2013). Au regard de ces évolutions technologiques et méthodologiques, il nous paraitrait pertinent de pousser l'exploration des mécanismes d'attention visuelle sur une carte d'aptitude qui supporte la prise de décision, dont la particularité, dans notre cas d'étude, est que les sujets observables sont à la fois les concepteurs et les décideurs. Des éventuelles données sur les mouvements oculaires pourraient même devenir des outils d'aides didactiques à la conception de carte d'aptitude : il serait intéressant de montrer aux étudiants des cartes de saillance, issues de l'observation de cartes d'aptitude, pour leur faire prendre conscience de l'efficacité (ou pas) des choix sémiotique et analytique effectuées.

Une continuité logique à cette approche par l'oculométrie et la saillance visuelle attentionnelle serait apportée par les recherches en neurosciences sur les relations vision-cerveau, et notamment celles conduites avec les méthodes d'exploration du fonctionnement normal et pathologique du cerveau, l'IRM fonctionnelle (IRMf). L'IRMf est une technique qui produit des images reflétant les variations locales de débit sanguin, de volume sanguin et d'oxygénation induites par l'activité mentale. Les avantages principaux de l'IRMf, qui rendent compte de sa popularité croissante, sont sa résolution temporelle (seconde) et spatiale (millimètre) et la possibilité d'acquérir chez un même individu des images multiples et répétées, de manière totalement non invasive, sans injection de traceur.

Des géographes américains de l'université de l'Oregon, Lobben et Al. (2005) ont intégré cette technologie dans leurs recherches, en soulignant l'impact d'une telle collaboration entre disciplines. « Il pourrait y avoir d'importantes implications pour certains questionnements très difficiles à résoudre, qui se chevauchent entre la psychologie, la physiologie et la cartographie / SIG comme par exemple, quelles tâches utilisent les mêmes régions du cerveau, alors que les tâches elles-mêmes semblent être très différent, ou quelles tâches utilisent différentes régions du cerveau, même si les tâches semblent être très similaires » (traduction libre, Lobben et Al., 2005). Des expérimentations avec IRMf sur des tâches de rotation d'objets, de navigation dans des environnements virtuels ou encore de mémoire cartographique et reconnaissance de lieux ont été menées (Lobben et Al., 2005). Dans le cas d'un processus de résolution d'un problème de localisation avec la cartographie d'aptitude, des observations des différentes tâches en IRMf apporteraient des briques ultérieures à la connaissance des mécanismes

cognitifs qui sous-tendent cette procédure : *seraient-elles utilises pour faire évoluer des modèles mentaux (novices vs experts)? Seraient-elles utiles pour concevoir des stratégies d'enseignement-apprentissage ?*

Quoi qu'il en soit, la véritable perspective réside dans la *recherche pluridisciplinaire*, qui, réunissant les points forts de chaque discipline, entraîne des résultats plus significatifs, fiables et valides (Lobben et Al., 2005).

Cette thèse est née du sentiment que la cartographie et les SIG dans les Sciences de l'Information Géographique, pourraient tiré profit de la collaboration entre plusieurs disciplines. En apportant des connaissances de la psychologie cognitive, de la didactique de sciences, et des sciences de l'éducation, cette thèse a voulu contribuer à une meilleure compréhension de certains processus d'apprentissages et d'appropriation des SIG.

BIBLIOGRAPHIE

Abel, M. et Al. How to model visual knowledge: a study of expertise in oil-reservoir evaluation, in: Lecture Notes in Computer Science, Berlin, Springer, p. 455-464, 2004.

Andreani, J-C. et Conchon, F. Méthodes d'analyse et d'interprétation des études qualitatives : état de l'art en marketing. Actes du 4e Congrès International sur les Tendances du Marketing en Europe, Paris, 2005.

Andrienko, G. et Andrienko, N. Interactive Maps for Visual Data Exploration. International Journal Geographical Information Science, 13 (4),355-374, 1999a.

Andrienko, G. Andrienko N., Keim D., Kraak M-J. , MacEachren A., Wrobel S., Editorial. Challenging problems of geospatial visual analytics. Journal of Visual Languages and Computing, 22 251–256, 2011.

Andrienko, G. Andrienko N., Keim D., Kraak M-J. ,.Jankowski, MacEachren A., Wrobel S. Geovisual analytics for spatial decision support: setting the research agenda, International Journal of Geographical Information Science 21 (8) (2007) 839–857.

Andrienko, N et Andrienko, G. *Exploratory analysis of spatial and temporal* data, Springer, Berlin, 2006.

Armstrong, M. P et Densham, P. J. Cartographic support for locational problem-solving by groups. International Journal of Geographical Information Science, 22:7,721-749, 2008.

Artigue, M. Ingénierie didactique. Recherches en Didactique des Mathématiques, 9/3, 283-307, 1990.

Astolfi, J.-P. *L'école pour apprendre,* ESF, Paris, 1992.

Baker, T. R. et Bednarz, S. W. Lesson Learned from Reviewing Research in GIS Education. Journal of Geography, 102*:* 231-233, 2003.

Baker, T., Kerski, J. Hyunh, N.T., Viehrig, K. et Bednarz, S.W. Call for an Agenda and Center for GIS Education Research. Review of International Geographical Education Online ©RIGEO Volume 2, Number 3, Winter 2012.

Balzarini, R. Proposition d'ingénierie pédagogique pour l'intégration des SIG en Géosciences appliquées : l'@telierSIG_Géosciences , Mémoire Master 2 Ingénierie de développement territorial Géo-SIT, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier Grenoble, 2010.

Balzarini, R., Davoine, P-A., Ney, M. Des variables didactiques pour éduquer l'analyse visuelle. Colloque SAGEO, Liège 2012

Balzarini, R., Davoine, P-A., Ney, M. GIS in Geosciences Training: an experience in pedagogical-engineering. In Proceedings of International Cartographic Conference, Paris, 2011.

Banai R. Fuzziness in geographical information systems : Contributions from the analytical hierarchy process. *International Journal of Geographical Information Systems*,7 :315–329, 1993.

Barkowsky, T.et Freska, C. Cognitive Requirements on Making and Interpreting Maps.Spatial information theory : A theorical basis for GIS. Proceedings of COSIT 97. pages 347-361ed. S. Hirtle, A. Frank Springer Berlin, Heidelberg, 1997.

Barrows, H.S. et Tamblyn, R. *Problem-Based Learning: An Approach to Medical Education* New York, Springer, 1980.

Baudin, T., Egal E., Lahondère, D. La cartographie géologique, de l'acquisition à la modélisation 3D : évolution des pratiques et des métiers. *Géologues* n° 164, mars 2010.

Bear, M.F. et Al. *Neurosciences : à la découverte du cerveau*. Editions Pradel, 2007.

Beaulieu, V. « Etude de la visualisation géographique dans un environnement d'exploration interactive de données géo-décisionnelles ». Thèse. Université de Laval, Québec, 2009.

Bednarz, S.W. Geographic information systems: A tool to support geography and environmental education? GeoJournal 60: 191–199, 2004.

Béguin, M. et Pumain, D. *La représentation des données géographiques*. Armand Colin, Paris, 2007.

Ben Mena, S. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. BASE Vol.4, 2000.

Bensaid, A. et Al. L'analyse multicritères comme outil d'aide à al décision pour la localisation des zones à fortes pression anthropique : le cas du département de Naâma en Algérie. Revue Télédétection, vol. 7, n° 1-2-3-4, p. 359-371, 2007.

Bertin, J. *La graphique et le traitement graphique de l'information*, Paris, Flammarion, 1977.

Bertin, J. *Sémiologie graphique*, Paris, Mouton/Gauthier-Villars, 1967.

Black, A.J. Spatial Ability and Earth Science Conceptual Understanding. Journal of Geoscience Education, v. 53, n. 4, 402-414, September, 2005.

Blaser, A.D, Sester, M. Egenhofer, M;J. Visualization in an early stage of the problem-solving process in GIS. Computers & Geosciences 26 57 66, 2000.

Bloom, B. et Al. *Taxonomy Of Educational Objectives*:*Handbook 1, The Cognitive Domain.* New York,Toronto: Longmans, Green, 1956.

Bone, T. et Johnson, D. Human Factors in GIS Use: A Review and Suggestions for Research. Proc ISECON, v24, Pittsburgh, 2007.

Bonham-Carter, G.F. Geographic Information System for Geoscientists : modelling withGIS, Computer methods in the Geosciences, vol. 13, Pergamon Press, 1994.

Bourgeois, E. et Nizet, J. *Apprentissage et formation des adultes* Paris, PUF, 1997.

Bransford, J.D., et Al. editors, How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School. National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C. 2000.

Brousseau, G. *Théories des situations didactiques.* La Pensée sauvage, éditions, Grenoble.1998.

Brown, A.L. Design experiments: Theoretical and methodological challenges in creating complex interventions in classroom settings. The Journal of the Learning Sciences, 2(2), 141-178, 1992.

Bruns, H.T. et Egenhofer, M.J. User Intrfaces for Map Algebra.Journal of the Urban and Regional Information Systems Association, Vol.9, N.1,44-54, 1997.

Carver, S. Integrating multi-criteria evaluation with geographical information systems. International journal of geographical information systems, Vol. 5, No.3, 321-339, 1991.

Cauvin, C. *Cartographie thématique.* Hermès Science Publications, 2007.

Cavazza, M. *Les Modèles mentaux.* Edt Masson, Paris, 1993.

Cave, K.R. et Wolfe, J.M. Modeling the role of parallel processing in visual search. Cognitive Psychology, 1990.

Chabris, C. F. et S. M. Kosslyn, Representational Correspondence as a Basic Principle of Diagram Design, S.-O. Tergan et T.Keller (Eds) *Knowledge and Information Visualization*, Chap. 2, LNCS 3426, 36-57, 2005.

Chakhar, S. «Cartographie décisionnelle multicritère : formalisation et implémentation ». These. LAMSADE, Paris- Dauphine, 2006.

Chang, KT, Lenzen, T, Antes, J. The effect of experience on reading topographic relief information: analyses of performance and eye movements. The Cartographic Journal, 22:88–94, 1985.

Chase, W. G. et Simon, H. A. The mind's eye in chess. In W. G. Chase (Ed.), *Visual information processing* (pp. 215-281). New York: Academic Press, 1973.

Chauvigné, C. Une nouvelle approche des compétences comme analyseur pédagogique. In proceedings of AIPU Conference, Montpellier, 2008.

Chen, X. et Bishop, I.D. User Evaluation of Options for Geo-visualisation. Proc 13th Intl Conference on Virtual Systems and Multimedia. VSMM 2007, Brisbane, Australia, Sept 2007.

Chesneau, E. Un processus automatique d'amélioration des contrastes colorés sur les cartes des risques. M@ppemeonde 96, 4, 2009.

Chevallard, Y. La notion d'ingénierie didactique, un concept à refonder. 15e École d'Été de Didactique des Mathématiques Clermont-Ferrand, août 2009.

Chi, M. T.H.et Slotta, J. D. The ontological coherence of intuitive physics. Commentary on A. diSessAs "Toward an epistemology of physics.? Cognition and Instruction, 10: 249-260, 1993.

Chi, M.T.H. Categorization and Representation Physics Problems by Experts and Novices. Cognitive Science 5, 121-152, 1981.

Chi, M.T.H. Quantifying Qualitative Analyses of Verbal Data: A Practical Guide. The Journal of the Learning Sciences 6(3):271–315, 1997.

Clark, D.et Al. University Students' Conceptualization and Interpretation of Topographic Maps, International Journal of Science Education, 30:3, 377-408, 2008.

Clot, Y. Méthodologie en clinique de l'activité. L'exemple du sosie. In S. Delefosse (Ed.), *Les méthodes qualitatives en psychologie*, Paris: Dunod, pp125-148, 2001.

Cockrell, K. et Al. A context for learning: collaborative groups in the problem-based environment. The Review of Higher Education, 23(3), 347-363, 2000.

Collard, L. « Risques sportifs, prises de risques et science de l'action motrice. Aspects sociologiques". Thèse. Université Paris V, 1997.

Coltekin ,A, .Fabrikant, S.I, Lacayo, M. Exploring the efficiency of users'visual analytics strategies based on sequence analysis of eye mouvements recordings. International Journa of Geographical Information Science, Vol.24, N.10, Octobre 2010.

Coulet, J-C. et Chauvigné, C. Passer d'un référentiel de compétence à une ingénierie de formation. Education permanente, n° 165, 101-113, 2005.

Crossland, M.D., Wynne, B.E., Perkins, W.C. Spatial decision support systems: An overview of technology and a test of efficacy. Decision Support Systems 14, 219-235, 1995.

D'Ercole et Metzger P. La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain. Cyber Géo , 2009

Dai, F.C. et Lee, C.F. Terrain-based mapping of landslide susceptibility using a geographical information system: a case studyCan. Geotech. J. 38: 911–923, 2001.

De Jong, T. Cognitive load theory, educational research, and instructional design: some food for thought. Instr Sci 38:105–134, 2010.

DeChiara, D., DelFatto, V., Laurini, R., Sebillo, M., Vitiello, G. A chorem-based approach for visually analyzing spatial data. Journal of Visual Languages and Computing 22, 173–193, 2011.

Dessus, P. Systèmes d'observation de classes et prise en compte de la complexité des événements scolaires.CAIRN 1 - n° 23, 103 -117, 2007.

Develotte, C., Mangenot, F., Nissen, E. Un Cadre d'analyse multidimensionnel de débats en ligne asynchrones. Actes du colloque Epal 2009 Université Stendhal - Grenoble 3, 5-7 juin 2009.

Di Biase, D. et Al. *Geographic Information Science and Technology. Body of Knowledge*. Published in 2006 by Association of American Geographers. Copyright © .

diSessa, A. et Cobb, P. Ontological innovation and the role of theory in design experiments. Journal of the Learning Sciences, 13(1), 77-103, 2004.

Dochy, F et Al. Effects of problem-based learning: a meta-analysis. Learning and Instruction, 13, 533-568, 2003.

Donlon, J.J. et Forbus, K.D. Using a Geographic Information System for Qualitative Spatial Reasoning about Trafficability. Proceedings of QR99, Loch Awe, Scotland, June, 1999.

Drobne, S. et Lisec, A. Multi-attribute Decision Analysis in GIS: Weighted Linear Combination and Ordered Weighted Averaging. Informatica, 33 459–474, 2009.

Duch, B. Problems: A Key Factor in PBL http://www.udel.edu/pbl/cte/spr96-phys.html. 1996.

Dumolard, P. Les SIG au coeur de la géographie ? La géographie au coeur des SIG ? Géographes associés n° spécial. Savoir penser et partager l'information géographique : les SIG, 30, 151-167, 2006.

Dury, C. Apprentissage par problèmes, à distance. Présentation et analyse d'un dispositif de formation. Recherche en soins infirmiers, N° 79, 2004.

Dykes, J., MacEachren, A.M., et Kraak, M.-J. *Exploring Geovisualization*, Elsevier, Amsterdam, 2005.

Eastman, J.R. Idrisi for Windows, Version 2.0: Tutorial Exercises, Graduate School of Geography—Clark University, Worcester, MA. 1997.

ECTS Users' Guide: Directorate-General for Education and Culture. Available online at: http://ec.europa.eu/education/programmes/socrates/ ects/doc/guide_en.pdf. Brussels, 2005.

Edelson, D. C. Design research: what we learn when we engage in design. Journal of the Learning Sciences, 11(1), 105-121, 2002.

Eley, M. Component Processing Skills In The Interpretation Of Topographic Maps . Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization Volume 29, Number 1 / Spring 1992.

Fabre, M. *Situations-problèmes et savoir scolaire*, PUF, 1999.

Fabrikant, S.I et Glodsberry, K. Thematic relevance and perceptual salience of dynamic geovosualization displays.Proceedings, 22th ICA/ACI International Cartographic Conference, Coruna, 2005.

Few, S. Visual Pattern Recognition. Perceptual Edge, Cognos-Innovation Center, 2007.

Fontanabona, J. Mieux comprendre comment un élève donne du sens aux cartes. Cahiers de géographie du Québec, vol. 43, n° 120, 517-538, 1999.

Frank, P. The great LULU trading game. Planning, 58(5) :15–17, 1992.

Friedman, J.S. et diSessa, A. What students should know about technology : the case of scientific visualization. Journal of Science Education and Technology, Vol. 8, N.3, 1999.

Gahegan, M. Four barriers to the development of effective exploratory visualisation tools for the geosciences. International journal of geographical information science, 13(4), 289-310, 1999.

Garlandini, S. et Fabrikant, S.I. Evaluating the effectiveness of Efficiency and Visual Variables for Geographic. M. Egenhofer et al. (Eds.): COSIT 2011, LNCS 6899, 1–19 © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

Genevois, S. « Quand la géomatique rentre en classe. Usages cartographiques et nouvelle éducation géographique dans l'enseignement secondaire ». Thèse de doctorat, Université de Saint-Etienne, UMR 5600, 2008

Gilhooly, K., et Al. Skill in map reading and memory for maps. Quarterly Journal Of Experimental Psychology, Section A – Human Experimental Psychology, 40A(1), 87-107, 1988.

Gobet, F. Expert Memory : A comparison of four theories. Cognition, 66, p. 115-152. 1998.

Godard,V. Cours de Master, Aide à la décision et SIG, Département de Géographie Université Paris 8, 2007.

Golledege, R.et Al. Matching Geospatial Concepts with Geographic Educational Needs. Geographical ResearchMarch 46(1):85–98, 2008.

Golledge, R.G. Do People Understand Spatial Concepts: The Case of First-Order Primitives. Working Paper presented at the International GIS Conference, Pisa, Italy, September 1992.

Guérin-Dugué, A. Outils et méthodes statistiques pour l'analyse de mouvements oculaires lors de l'exploration de scènes visuelles. Présentation STATIM, 2010.

Guiet-Silvain, J. Définitions du concept de schème, Recherches en Education, n°4, 17-22, 2007.

Hall-Wallace, M.K. et McAuliffe, C.M. Design, Implementation and evaluation of GIS based learning materials in an introductory Geoscience course. Journal of Geoscience Education, v. 50, n. 1, 5-14, 2002.

Hegarty, M et Al. Naïve cartography: How intuitions about display configuration can hurt performance. Cartographica. Vol.44, N.3, 171-186, 2009.

Hmelo-Silver, C.E. Problem-based learning: What and how do students learn? Educational Psychology Review, 16:235–266, 2004.

Howard, A.S. et Al. Developing a geoscience knowledge framework for a national geological survey organisation. Computers & Geosciences 35, 820–835, 2009.

Howarth, J.T. et Sinton ,D. Sequencing spatial concepts in problem-based GIS instruction. Procedia Social and Behavioral Sciences 21, 253–259, 2011.

Ishikawab, T.et Kastens, K.A. Why Some Students Have Trouble with Maps and Other Spatial Representations. Journal of Geoscience Education, v. 53, n. 2, p. 184-197, 2005.

Itti, L. et Koch, C. Computational Modeling of Visual attention. Nature Reviews Neuroscience, vol. 2; no.3, 194-203, 2001.

Janelle, D. G. et M. F. Goodchild. Concepts, Principles, Tools, and Challenges in Spatially Integrated Social Science. In Nyerges, T.L., H. Couclelis, and R. McMaster (Eds.). *The Sage Handbook of GIS & Society*. Sage Publications, 27-45. 2011.

Janjou, D. et Hanot, F. Le numérique pour une nouvelle génération de cartes géologiques. Geosciences N 6, octobre 2007.

Jankowski, P, Nyerges, T. GIS-supported collaborative decision making: results of an experiment. Annals of the Association of American Geographer 91(1):48–70, 2001.

Jankowski, P. Andrienko, N et Andrienko, G., Map-centred exploratory approach to multiple criteria spatial decision making. Int. j. geographical information science, vol. 15, no. 2, 101± 127, 2001.

Jankowski, P. Integrating geographical information systems and multiple criteria decision-making methods. International Journal of Geographical Information Systems, 9, 3, 251–273, 1995.

Jiang, H.et Eastman J.R. Applications of fuzzy in multi-criteria evaluation in GIS. International Journal of geographical Information Science, 2000.

Jo, I. and Bednarz, S. Evaluating Geography Textbook Questions from a SpatialPerspective: Using Concepts of Space, Tools of Representation, and Cognitive Processes to Evaluate Spatiality. Journal of Geography 108: 4-13, 2009.

Joerin, F., Theriault, M., Musy, A. Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. International Journal of Geographical Information Science, 15, 153–174, .2001.

Johnson-Laird, P.N. *Mental models: towards a cognitive science of language, inference and consciousness*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1983.

Joliveau, T. Apport des SIG au monde de la recherche, Actes du Colloque international : Géomatique et applications n°1, Orléans, 2003.

Joliveau T. Géomatique et gestion environnementale du territoire. Recherche sur un usage géographique des SIG. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches en Sciences Humaines. Université de Rouen, 2004.

Kahneman, D., Triesman, A. et Gibbs, B.J. The reviewing of object files: Object specific integration of information. Cognitive Psychology, 24, 175-219, 1992.

Kasten, K. Commentary*:* Object and Spatial Visualization in Geosciences Journal of Geoscience Education, v. 58, n. 2, , p. 52-57, March 2010.

Kastens, K et Manduca, C. A Synthesis of Research on Thinking and Learning in the Geosciences. http://rock.geosociety.org/Store/detail.aspx?id=SPE486. 2012.

Kêdowidé, C. M. G. Modélisation géomatique par évaluation multicritères pour la prospection des sites d'agriculture urbaine à Ouagadougou. Vertigo, V.10, N2, 2010.

Keeney, R.L. *Valued-focused thinking: A path to creative decision*. Harvard University Press, Cambridge, USA, 1992.

Keim, D., Kohlhammer , J., Ellis, G. et Mansmann, F. *Mastering the Information Age Solving Problems with Visual Analytics.* Published by the Eurographics Association Copyright c 2010 by the authors.

Keller, P et Keller, M.. *Visual clues: Practical Data Visualization*. IEEE Computer Society Press. Los Alamitos, CA, 1992.

Kelley, D. Incorporating GIS into Problem-Based Learning Pedagogies for Environmental Studies. Proceedings ESRI Education User Conference 2004.

Kennedy, R. et Al. Writing and Using Learning Outcomes: a Practical Guide. Planning and implementing key Bologna features. 2006.

Kenneth, R. Laborde, C., Leach, J., et Tiberghien, A. Design Tools in Didactical Research: Instrumenting the Epistemological and Cognitive Aspects of the Design of Teaching Sequences. Educational Researcher, vol. 38 no. 5 329-342, 2009.

Kent, R et Chang, P CH Expertise in a Map Reading Task: The Role of Schemas in the Processing of Topographical Relief Information. Proceedings of the 30th Annual Meeting of the Cognitive Science Society, Washington, 2008.

Kent, R. "Expertise in Map Comprehension: Processing of Geographic Features according to Spatial Configuration and Abstract Roles". Thesis. University of Sussex November 2010.

King, H. Understanding spatial literacy: cognitive and curriculum perspectives. Planet No. 17 December 2006.

Kitchin, R. Cognitive maps: what are they? And Why we study them? Journal of Environmental Psychology 14, 1-19, 1994.

Klippel, A., Hardisty, F.,et Li, R. Interpreting spatial patterns: An inquiry into formal and cognitive aspects of Tobler's first law of geography. Annals of the Association ofAmerican Geographers. 2011.

Knoblich, G., Ohlsson, S., Haider, H., & Rhenius, D. An eye movement study of insight problem solving. Memory & Cognition 29 (7), 1000-1009. 2001.

Kordy, M. "Comparison of fuzzy and crisp analytic hierarchy process (AHP) methods for spatial multicriteria decision analysis in GIS". Thèse. University of Gavle, September 2008.

Koua, E., MacEachren, A.,. Kraak ,M.J. Evaluating the usability of visalization methods in an exploratory geovisalization environment. IJGIS, 20-4, pp. 425, 2006.

Kraak,M-J. *Computer-assisted cartographical Three-Dimensional Imaging Techniques*. Delft: Delft University Press, 1988.

Kraak, M-J. Geovisual Analytics and Cartography. GEOIDE, Summer School, Toronto, 2011.

Kraak, M-J. *Cartography, Visualization of spatial data*, Third Edition, The GuifordPress, New York. 2011.

Krathwhol, D.R. A revision of Bloom's Taxonomy: an overview. Theory into practice, 41, Number 4, College of Education, The Ohio State University, 2002.

Kuhn, W. What do you mean by "semantics" of geodata? Géosciences • numéro 6 • octobre 2007.

Laaribi, A .*SIG et analyse multicritère*, 196p, Paris Hermès sciences publications, 2000.

Lakoff, G. *Woman, Fire, and Dangerous Things : What Categories Reveal about the Mind*. Chicago, University of Chicago Press, 1987.

Larkin, J. et Al. Expert and novice performance in solving physics problems. Science, N. 208, 1335-1342,1980.

Lateh, H.H. et Raman, A. A Study on the Use of Interactive Web-Based Maps in the learning and teaching geography.Malaysian Online Journal of Instructional Technology, 2(3), 99-105, 2005

Le Roux, A. *Enseigner l'histoire-géographie par le problème ?* Paris, L'Harmattan, 2004.

Lebraty, J-F. Les systèmes décisionnels. Encyclopédie de l'informatique et des systèmes d'information. 1338-1349, 2006.

Lebrun, M. et Berthelot, S. *Plan pédagogique : une démarche systématique de planification de l'enseignement*. Ottawa : Editions Nouvelles/De Boeck, 1994.

Lebrun, M. *Théories et méthodes pédagogiques pour enseigner et apprendre*. Bruxelles : De Boeck, 2002.

Ledru, P. Apport des SIG à la connaissance géologique. Geosciences, 2007.

Lehoux, N.et Vallée, P. cours Analyse Multicritères, Poltytech Laval, CA, 2004.

Lemaire, P. *La Psycologie cognitive.* 2° Edition, De Boeck, 2006.

Li, X., Coltekin, A. et Kraak, M-J. Visual Exploration of Eye Movement Data Using the Space-Time-Cube. S.I. Fabrikant et al. (Eds.): GIScience 2010, LNCS 6292, 295–309, 2010.

Libarkin, J.C et Kurdziel J.P. Research Methodologies in Science Education: The Qualitative-Quantitative debate. Journal of Geoscience Education, v. 50, n. 4, 78-86, January 2002.

Libarkin, J.C et Kurdziel, J.P. research Methodologies in Science Education: Qualitative Data. Journal of Geoscience Education, v. 50, n. 4, 195-200, March, 2002.

Libarkin, J.C. et Brick, C. Research Methodologies in Science Education: Visualization and the Geosciences. Journal of Geoscience Education, v. 50, n. 4, 449-455, September, 2002.

Libarkin, J.C.et Al. Research Methodologies in Science EducationMental Models and Cognition in Education. Journal of Geoscience Education, v. 51, n. 1, p. 121-126, January, 2003.

Link, I.et Al., From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications. Environment International 32 (2006) 1072–1093.

Lloyd, R. et Steinke, T. Recognition of Disoriented Maps: the cognitive processes." Cartographic Journal. Volume 21, Pages 55-59, 1984.

Llyod, R. Visual Search Processes Used in Map Reading . Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization,Volume 34, Number 1 / Spring 1997.

Lobben, A. Controlling the Visualization: Evaluating Spatial Data Mining Patterns While Exploring a Familiar Geographic Environment." Ninth International Conference on Information Visualization, London, UK. IEEE Computer Society. IV 2005.

Lobben, A., Olson, J.M., Huang J. Using fMRI in cartographic research. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization. Volume 44, Number 3, 2009.

Lohman, M. C. Cultivating problem-solving skills through problem-based approaches to professional development. Human Resource Development Quarterly, 13(3), 243-261, 2002.

Longley, P.A. Geographical Information Systems:on modelling and representation. Progress in Human Geography 28, 1 108–116, 2004.

Lowe, R. L. Constructing a mental representation from an abstract technical diagram. .Learning and Instruction, Vol. 3, 157-179, 1993.

Mac Eachren, A.M. et Ganther, J.H. A pattern identification approach to cartographic visualization. *CARTOGRAPHICA*, Vol. 27, N 2, 64-81, 1990.

MacEachren, A.M et Al., Visualizing Geospatial Information Uncertainty: What We Know and What We Need to Know. Cartography and Geographic Information Science, Vol. 32, No. 3, 139-160, 2005.

MacEachren, A.M. et Kraak, M-J., Research Challenges in Geovisualization. *Cartography and Geographic Information Science*, 28, 3-12, 2001.

MacEachren, A.M. *How maps work: representation visualization and design*. New York: Guilford Press, 1995.

Madrucci ,V., Taioli, F., de Arau´jo, C.C. Groundwater favorability map using GIS multicriteria data analysis on crystalline terrain, Sa˜o Paulo State, Brazil. Journal of Hydrology, 357, 153– 173, 2008.

Malzcewski J. GIS-based land-use suitability: a critical overview. *Progress in Planning*, 62, 3-65. 2004.

Malzcewski, J. GIS-based multicriteria decision analysis : a survey of the literature. IJGIS, Vol. 20, N.7,703-726. 2006.

Manche, Y. « Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels ».Thèse. Université Joseph Fourier Grenoble1. 2000.

Manduca, C., Mogk, D., Stillings, N. Bringing Research on Learning to the Geosciences. Report from a Workshop Sponsored by the National Science Foundation and the Johnson Foundation. July 2002.

Margolis, H. *Patterns, thinking and cognition: A theoryof judgement.* The University of Chicago: Press, 1987.

Marinoni ,O. Benefits of the combined use of stochastic multi-criteria evaluation with principal components analysis. Stoch Environ Res Risk Assess 20: 319–334, 2006.

Marinoni ,O. Implementation of the analytical hierarchy process with VBA in ArcGIS. Computers & Geosciences 30 637–646, 2004.

Marinoni, O. et Al. Sustainable land-use decision making from the geological point of view: an example for the use of geo resources in a metropolitan area. ISAHP 2005, Honolulu, Hawaii, July 8-10, 2005.

Marinoni, O. et Al. The multiple criteria analysis tool (MCAT): A new software tool to support environmental investment decision making. Environmental Modelling & Software 24 153–164, 2009.

Mark, D. Cognition-Based Extraction and Modelling of Topographic Eminences. Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization, Volume 45, Number 2 /2010.

Mark, D. et Al Cognitive models of geographical space. International Journal for Geographic Information Science. Vol. 13, n.8,. 747-774, 1999.

Mark, D. et Al. Features, Objects, and other Things: Ontological Distinctions in the Geographic Domain. In Spatial Information Theory. Foundations of Geographic Information Science. Lecture Notes in Computer Science 2001.

Mark, D. M., et Freundschuh, S. M.,. Spatial Concepts and Cognitive Models for Geographic Information Use. In Nyerges, T. L., Mark, D. M., Laurini, R., and Egenhofer, M., editors. *Cognitive Aspects of Human-Computer Interaction for Geographic Information Systems*, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 21-28, 1995.

Marr, D. Vision: The philosophy and the approach. Issues in Cognitive Modeling. London: Erlbaum, 1985.

Marzin, P. Méthodologie de la recherche en didactique. Notes de cours, 2011.

Mathian, H. Classification et Apprentissage. Ecole d'été du GRD MAGIS, 7 - 11 Septembre 2009, Aussois.

Mena, S.B. Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 4 (2), 83–93, 2000.

Meng, Y., Malzcewski, J., Boroushaki ,S. A GIS-Based Multicriteria Decision Analysis Approach for Mapping Accessibility Patterns of Housing Development Sites: A Case Study in Canmore, Alberta. Journal of Geographic Information System, 3, 50-61, 2011.

Merad, M.M. « Apport des méthodes d'aide multicritère à la décision pour l'analyse et la gestion des risques liés aux mouvements de terrains induits par les ouvrages souterrains ». Thèses. Université Paris-Dauphine, 2003.

Montello, D.R. Recall memory for Topographic Maps and Natural terrain: effecys of experience and task performance. Cartographica, 31 18-36, 1994.

Montello, D.R. Cognitive Map-Design Research in the Twentieth Century: Theoretical and Empirical Approaches. Cartography and Geographic Information Science, Vol. 29, No. 3, 283-304, 2002.

Montello, D.R. Cognitive Research in GIScience: Recent Achievements and Future Prospects. Geography Compass 3/51824–1840, 2009.

Moust, J. H. C., Van Berkel, H. J. M., & Schmidt, H. G. Signs of erosion: reflections on three decades of problem-based learning at Maastricht University. Higher Education, 50, 665-683, 2005.

National Research Council. *Learning to Think Spatially: GIS As a Support System in the K-12 Curriculum*. Washington DC : National Academies Press, 2006.

Newcombe, N.S. Picture this. Increasing Math and Science Learning by Improving Spatial Thinking.American Educator Summer 2010.

Newell, A, et Simon HA. *Human problem solving*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1972.

Nicholauss, S. et Al. The persistence of object file representations. Perception & Psychophysics, 67 (2), 324-334, 2005.

Nicolas, S. et Al. *Introduction à la psychologie cognitive.* Edts Inpress, Paris 2007.

Nivala, A-M. et Al. Usability Evaluation of Web Mapping Sites. The Cartographic Journal Vol. 45 No. 2 129–138 Use and Users Special Issue 2008.

Nogry, S. et Al. Leçons tirées de la conception de AMBRE- Comment combiner les objectifs et méthodes d'évaluation pour la conception itérative des EIAH ?,Sciences et Technologies de l´Information et de la Communication pour l´Éducation et la Formation, Volume 13, 2006.

Nollenburg ,M. Geographic Visualization. In *Human- Centered Visualization Environments*, volume 4417 of Lecture Notes in Computer Science, pages 257-294, 2007.

Noorollah, Y. GIS model for geothermal resource exploration in Akita and Iwate prefectures, northern Japan. Computers & Geosciences 33, 1008–1021, 2007.

Nyerges, T. L. Analytical Map use. Cartography and GeographicIinformation Systems, Vol.18, N1, 1991.

Nyerges, T. L. Interaction coding systems for studying collaboarative spatial decision making. Journal Human-Computer Interaction, 127-165, 1998.

Ohlsson, S. *Deep Learning. How the mind overrides experience*. © Cambridge University Press 2011.

Ohlsson, S. Learning from Performance Errors. Psychological Review, 241–262, 1996.

Openshaw, S. Developing appropriate spatial analysis methods for GIS. In Maguire D.J., Goodchild M.F., Rhind D.W. (eds.) *Geographical Information Systems: Principles and Applications*. vol 1, Longman, London, , pages 389-402, 1991.

Ormeling, F. et Kraak, M-J. Maps as predictive tools: mid the gap. Cartographica, Vol. 43, N.2, 125-130, 2008.

Orndorff , R.L. Introducing Problem formulation and spatial analysis with an example in global warming and sea level rise. Journal of Geoscience Education, v. 50, n. 4, p. 357-362, September 2002.

Palmer, R., Palmer, A., Malone, L., Voigt, C.L. *Using GIS*, ESRI Press, 2008

Paquette, G. *L'ingénierie du téléapprentissage : pour construire l'apprentissage en réseaux.* Sainte-Foy : Presses de l'Université du Québec, 2002.

Parmantier, P et Paquay, L. EN QUOI LES SITUATIONS D'ENSEIGNEMENT/APPRENTISSAGE FAVORISENT-ELLES LA CONSTRUCTION DE COMPETENCES? Groupe de recherche interdisciplinaire en formation des enseignants et en didactique. Université Catholique de Louvain, 2002.

Pastirik, P. J. Using problem-based learning in a large classroom. *Nurse Education in Practice, 6*, 261-267, 2006.

Pernin, J.P. et Emin, V. Evaluation des pratiques de scénarisation de situations d'apprentissage : une première étude. Actes du colloque TICE Méditerranée Genova, 2006.

Pernin, J.P. et Lejeune A. Modèles pour la réutilisation de scénarios d'apprentissage. Actes du colloque TICE Méditerranée, Nice, 2004a.

Petcovic, HL, Libarkin, JC. Research in Science Education: The Expert-Novice Continuum. Journal of Geoscience Education 55(4):333–339, 2007.

Piaget, J. L'image mentale chez l'enfant. Presses Universitaires France, 1991.

Piaget, J. *La naissance de l'intelligence chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé. 1963.

Piburn, M.D et Al. The Hidden Earth: Visualization of Geologic Features and their Subsurface Geometry. Paper presented at the annual meeting of the National Association for Research in Science Teaching, New Orleans, LA, April 7-10, 2002.

Pinker, S. A theory of graph comprehension. In R.Friedle (Ed) ,*Artificial Intelligence and the Future of testing.*. Hillsdale, NJ: Erlbaum, 73 -126, 1990.

Poirier Proulx, L. *La résolution de problèmes en enseignement : cadre référentiel et outils de formation*. De Boeck Supérieur, 1999.

Prévil, C, Thériault, M. et Rouffignat, J. Analyse multicritère et SIG pour faciliter la concertation en aménagement du territoire : versune amélioration du processus décisionnel? Cahiers de géographie du Québec, vol. 47, n° 130, 2003.

Puliot J. et Al., Reasoning about geological space: Coupling 3D GeoModels and topological queries as an aid to spatial data selection. Computers & Geosciences 34 529–541, 2008.

Pumain, D.et Saint-Julien, T. *L'analyse spatiale, tome 1 : Les localisations dans l'espace*. Armand Colin, collection « Cursus », 1997.

Purser, L. Report on Council of Europe Seminar on Recognition Issues in the Bologna Process, Lisbon, April 2002.

Rabardel, P. *Les hommes et les technologies. Approche cognitive des instruments contemporains*. Paris : A. Colin, 1995.

Rahm, J.. et Al. The Value of an Emergent Notion of Authenticity: Examples from Two Student/Teacher–Scientist Partnership Programs, Journal of Research in Science Teaching,, Vol. 40, No. 8,. 737–756, 2003.

Raucent, B., et Al. Guide pratique pour une pédagogie active : les APP, Apprentissages par Problèmes et par Projet. Toulouse et Louvain: INSA Toulouse et École Polytechnique de Louvain, 18-28. 2010.

Raucent, B.et Al. Devenir ingénieur par apprentissage actif. Compte rendu d'innovation, Didaskalia, n °24, 81-101, 2004.

Reeves, T. C. Design research from the technology perspective. In J. V. Akker, K. Gravemeijer, S. McKenney, & N. Nieveen (Eds.), *Educational design research* (86-109). London: Routledge, 2006.

Revue Géologues. Evolution des métiers et des pratiques dans les géosciences appliqués. Numéro spécial en hommage aux fondateurs de l'UFG. N° 164, Mars 2010.

Rey, A. *La terminologie : noms et notions.* Coll. Que sais je ? Paris, PUF, 1992 (1ère éd. 1979).

Reynolds, S.J. et Al. *Visualization in undergraduate geology courses.* John K. Gilbert (ed.), Visualization in Science Education, 253 266. © 2005 Springer. Printed in the Netherlands.

Richey, R et Al. *Development research: Studies of instructional design and development*. In D.H. Jonassen (Ed.), Handbook of research for educational communications and technology. Mahwah NJ: Lawrence Erlbaum Associates, 2003.

Rieber, L. P. A historical review of visualization in human cognition. Educational Teaching,Research and Development, 43, 45–56, 1995.

Rinner, C. A geographic Visualization Approach to Mulit-Criteria Evaluation of Urban Quality of Life. *VASDS Workshop Proceedings Re-visualisation*.GIScience, 2006.

Robert, A. Problèmes méthodologiques en didactique des mathématiques. RDM 12, 1992.

Robinson, A.C. Supporting synthesis in geovisualization. International Journal of Geographical Information Science. Vol. 00, No. 00, 1–17, 2009.

Rogalski, J. La didactique professionnelle : une alternative aux approches de " cognition située " et "cognitiviste " en psychologie des acquisitions. @ctivités, *1* (2), 103-120, 2004.

Rossi, P. Métiers de la cartographie géologique : hier et aujourd'hui, Géologues n° 164, 2010.

Roy, B. *Méthodologie multicritères d'aide à la décision*. Economica, Paris, 1985

Sahoo, N.R. et Al. Multi-criteria analysis in GIS environment for natural resource development - A case study on gold exploration. Tata Infotech Ltd, SEEPZ, Mumbai, 400 096, 2008.

Sanchez, E. « Investigation scientifique et modélisation pour l'enseignement des sciences de la Terre. Contribution à l'étude de la place des technologies numériques dans la conduite d'une classe de terrain au lycée ». Thèse. Université de Lyon, 2007.

Sanchez, E., Genevois, S., et Joliveau, T. Uses of GIS in French Secondary Schools: Dogmatic Innovations, Innovative Teachers, and Parallel Experimentations. In A. Milson, A. Demirci & J. Kerski (Eds.), *International Perspectives on Teaching and Learning with GIS in Secondary Schools* (97-107). Dordrecht, NL: Springer, 2011.

Sanchez, E., Prieur, M., & Fontanieu, V. Modèles et modélisation dans l'enseignement des sciences de la Terre au lycée : Points de vue et pratiques d'enseignants. Papier présenté à la conférence V èmes rencontres de l'ARDIST, La Grande-Motte, 345-351, 2007.

Sanders , L et Al. *Modèles en analyse spatiale*. Lavoisier Hermès Science, 2001.

Sandoval, W. A., & Bell, P. (Eds.). Design-based research methods for studying learning in context. [Special Issue] Educational Psychologist, 39(4), 2004.

Sartori, M. et Al. Du levé géologique à la carte numérique. Géomatique Expert - N° 49 - Février-Mars 2006.

Savaton, P. La carte géologique : représentations d'élèves de classe de première scientifique. Aster (20), 139-164, 1995.

Simon, H.A The architecture of complexity. Proceedings of the American Philosophical Society, 106, 467–482, 1962.

Smith, B. and Mark, D.M. Geographical categories: an ontological investigation. int. j. geographical information science, vol. 15, no. 7, 591± 612, 2001.

Smith, M. and Cook, K. Attendance and Achievement in Problem-based Learning: The Value of Scaffolding. Interdisciplinary Journal of Problem-based Learning: Vol. 6: Iss. 1, 2012.

Spencer, L et Al. Carrying out Qualitative analysis. In: *Qualitative Research Practice: A Guide for Social Science Students and Researchers.* Sage publication, Ltd, London,199-262, 2003.

Sweller, J. Cognitive Load Theory, Learning difficulty and Instructional Design. .Learning and Instruction, Vol. 4, 293-312, 1994.

Swenson, S. et Kastens, K.A. Student interpretation of a global elevation map: What it is, how it was made, and what it is useful for. The Geological Society of America, Special Paper 474, 2011.

Swienty, O., Jahnke, M., Kumke, H., Reppermund, S. Effective visual scanning ofgeographic information.Visual, Salerno, Italy, 2008.

Taylor, H.A. The Effect of Multiple Formats on Understanding Complex Visual Displays Journal of Geoscience Education, v. 52, n. 2, p. 115-121, March 2004.

Thiery, Y. et Al. Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment. Geomorphology, 9(1-2): 38-59, 2007.

Thomas, J. Harden A. Methods for Research Synthesis Node, Evidence for Policy and Practice Information and Co-ordinating (EPPI-).ESRC National Centre for Research Methods. NCRM Working Paper Series. Number 10, 2007.

Thorndyke, P. et Stasz, C. Individual differences in procedures for knowledge acquisition from maps. Cognitive Psychology, 12, 137-175, 1980.

Tien, H.P. « Développement et mise en oeuvre de modèle d'attention visuelle ». Thèse.Université de Grenoble, 2010.

Tomlin, C.D. Map algebra: one perspective. Landscape and Urban Planning 30 3-I 2, 1994.

Treisman, A. Features and objects: The fourteenth Bartlett Memeorial Lecture. Quarterly Journal of Experimental Psychology, 1988.

Tricot, A., Plégat-Soutjis, F., et Camps, J.-F. Utilité, utilisabilité, acceptabilité : interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH. Papier présenté à la conférence EIAH 2003, 391-402, 2003.

Tricot, C. « Cartographie Sémantique. De la connaissance à la carte ». Thèse. Université de Savoie, 2006.

Truffet, C., et Robida, F., Produire la connaissance géologique en 3D : stratégies, perspectives. Géosciences, N 6, octobre 2007.

Tsoukias, A. *Concepts et Méthodes pour l'Aide à la Décision,* Chapitre De la théorie de la décision à l'aide à la décision, 25-69. Hermes, 2006.

Tversky, A. et Kahneman, D. Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. Science New Series, Vol. 185, No. 4157. pp. 1124-1131, 1974.

Tversky, B. Cognitive Maps, Cognitive Collages and Spatial Mental Models. Lecture Notes Computer Science, 716, 14-24, 1993.

Varet J. Prospective de l'emploi dans le domaine des Géosciences à l'horizon 2020, Rapport du BRGM, 2008.

Vergnaud. G. La théorie des champs conceptuels. Recherches en Didactiques des Mathématiques, Vol. 10, N 23,. 133-170, 1990.

Vergnaud G. Représentation et activité : deux concepts étroitement associés. Recherches en Education, N°4, CREN , Nantes, octobre 2007.

Vergnaud, G. Forme opératoire et forme prédicative de la connaissance. Papier présenté à la conférence colloque GDM La notion de compétence en enseignement des mathématiques, analyse didactique des effets de son introduction sur les pratiques et sur la formation. Montréal, 6-27, 2001.

Vergnaud, G. La conceptualisation, clef de voûte des rapports entre pratique et théorie. Papier présenté à la conférence Analyse de pratiques et professionnalité des enseignants, Paris. Octobre 2002.

Vygotski, L. *Pensée et langage* (1998 ed.) Paris, La Dispute, 1934.

Villiot-Leclercq, E. « Modèle de soutien à l'élaboration et à la réutilisation de scénarios pédagogiques ».Thèse . Université de Montréal, 2007.

Visser, W. L'analyse de l'expertise du point de vue de l'ergonomie cognitive Conférence invitée à la 4ième Journée d'étude organisée par Le Sensolier"Les expertises sensorielles : Nature et acquisition", Ivry-sur-Seine, octobre 2006.

Wakabayashi, Y and Ishikawab, T.Spatial thinking in geographic information science: a review of past studies and prospects for the future. Procedia Social and Behavioral Sciences 21, 304–313, 2011.

Wangf, M, Armtrong, P., Ni, J. et Lui, Y. GISolve: A Grid-based Problem Solving Environment for Computationally Intensive Geographic Information Analysis. IE EE 2005.

Ware, C. Visual Queries: The Foundation of Visual Thinking S.-O. Tergan and T. Keller (Eds.): *Knowledge and Information Visualization*, LNCS 3426, 27 – 35© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2005.

Ware, C. *Visual Thinking for Design*, Elsevier, Burlington, 197,2008.

Weger, G. *Cartographie.* V. 1, ENSG Marne la Vallée, Mars 1999.

Wilkening, J. et Fabrikant ,S.I. How Do Decision Time and Realism Affect Map-Based Decision Making? M. Egenhofer et al. (Eds.): COSIT 2011, pp. 1–19, 2011. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.

Xiao, N., Bennett, D.A., Armstrong, M.P., Interactive evolutionary approaches to multiobjective spatial decision making: A synthetic review. Computers, Environment and Urban Systems 31, 232–252, 2007.

Yahaya, S. et Al. Multicriteria Analysis for Flood Vulnerable Areas in Hadejia-JamAare River Basin, Nigeria. European Journal of Scientific Research, Vol.42 No.1, pp.71-83, 2010.

Zacks ,J. M. et Tversky, B. Event structure in perception and conception, Psychological Bulletin, 127 (1), 3-21, 2001.

Zanin, C. et Trémélo, M-L. *Savoir faire une carte. Aide à a conception et à la réalisation d'une carte thématique univariée.* Edts BelinSup Géographie. 2003.

Zhang, X., Ai, T., Stoter, J. ,Kraak, M.J, Molenaar ,M. Building pattern recognition in topographic data: examples on collinear and curvilinear alignments. Geoinformatica, 011-0146-3, October 2011.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 *Schéma en 'entonnoir' des questionnements* 22
Figure 2 *SIG : Schéma de modèle en couches proposé par T.Joliveau (HDR, 2004).* 26
Figure 3. *Les étapes de l'analyse des fiches métiers* 50
Figure 4 *Cartographie des 8 axes thématiques du BRGM pour 2009-2020(Varet, 2008).* 56
Figure 5 *J.Malzczewski : « GIS-based multicriteria decision analysis : a survey of the literature», IJGIS,2006* 70
Figure 6 *Graphique sur l'évolution de la production internationale géo scientifique traitant des méthodes SIG-AMC (Balzarini, 2011)* 71
Figure 7 *Schéma récapitulatif des composantes de l'analyse documentaire* 73
Figure 8 *Schéma de la structure du problème multicritère dans un cas de gestion forestière. Malczewski, 1999 in Chakhar, 2006)* 81
Figure 9 *Cartographie de susceptibilité des eaux souterraines dans l'Est de l'Etat de San Paolo au Bresil. (Madrucci, Taioli, de Araujo, 2008)* 86
Figure 10 *Carte de susceptibilité aux risques volcaniques à Naples. (Alberico, Petrosino, Lirer, 2011)* 86
Figure 11 *Schéma d'agrégation de couches par méthodes WLC. (sources : ESRI support, 2009)* 88
Figure 12 *Nombre total des articles SIG – AMC par année pour la période 1990 -2004 Malczewski (2006)* 91
Figure 13 *Synthèse des variables visuelles et de leur attribution selon le type de donné, selon Zanin et Trémélo (2003)* 94
Figure 14 *Schéma de la cartographie d'aptitude pour un problème d'implémentation de station de ski* 96
Figure 15 *Schéma procédurale d'ASMC sur un problème de recherche de site agricoles. Kêdowidé, 2010).* 99
Figure 16 *Schéma générale de cartographie de susceptibilité avec des méthodes de Combinaison Linéaire Pondérée (Somme Pondérées)* 100
Figure 17 *Capture d'écran sur les outils d'Analyse Spatiale de la Toolbox, détail de la boite Superposition* 107
Figure 18 *Copie d'écran de l'Assistant MCE* 110
Figure 19 *Niveau de risque et compensation nul* 111

Figure 20 *Perception et réalité. Source : Physiologie Sensorielle : Le système visuel. (J.Valat, 2012)*..... 127
Figure 21 *L'unité de conscience. Source : Physiologie Sensorielle : Le système visuel. J.Valat, Université de Montpellier II*..... **Erreur ! Signet non défini.**
Figure 22 *Feature ID Model de MacEachren, 1995.*..... 136
Figure 23 *Petcovic et Libarkin, The Expert-Novice Continuum. Journal of Science Education, (2007)*..... 142
Figure 24 *Schéma des concepts primitifs de la connaissance spatiale selon Golledge, 1995.* 144
Figure 25 *Schéma des concepts primitifs de la connaissance spatiale selon Janelle et Goodchild (2011)*..... 145
Figure 26 *Taxonomie de la pensée spatiale, proposée par Jo et Bednarz, 2009.*..... 146
Figure 27 *Internal and external cognition, Chabris et Kosslyn, 2005*..... 147
Figure 28 *La hiérarchie DIKW et le continuum de la compréhension (Bellinger et Al., 2004) et (Clark, 2004) in Beaulieu (2009)*..... 150
Figure 29 *Schéma de la construction du raisonnement visuel. C.Ware, Visual thinking for design, 2008.*..... 155
Figure 30 *Captures d'écran de l'espace ressources sur la plateforme DOKEOS*..... 172
Figure 31 *Schéma de l'agencement des séances du module en APP*..... 174
Figure 32 *Capture d'écran d'une séance du module sur la plateforme DOKEOS*..... 177
Figure 33 *Extrait du livret de l'étudiant. Détail d'une Séance*..... 178
Figure 34 *Exemple de traitement des réponses sur les 3 feuilles d'une grille d'analyse (fichierExcel).*..... 200
Figure 35 *Schéma hiérarchique des unités de codage*..... 203
Figure 36 *Exemple de segmentation du corpus*..... 204
Figure 37*Extrait de grille d'analyse avec corpus*..... 205
Figure 38 *Extrait d'une grille d'analyse codée simplifiée*..... 206
Figure 39 *Matrice des descripteurs des objets*..... 206
Figure 40 *Exemple de grille d'évaluation pour le groupe 4*..... 209
Figure 41 *Répartition des réponses relatives à la question Q1.2 sur le classement*..... 218
Figure 42 *Fenêtre de l'outil Reclassification dans ArcGIS 10.0*..... 219
Figure 43 *Répartition des réponses relatives à la question Q1.3 sur la méthode de discrétisation*..... 220
Figure 44 *Répartition des réponses relatives à la question Q1.4 sur le nombre de classes*.. 220

Figure 45 *Répartition des réponses relatives à la question Q2.2 sur la formule d'agrégation des critères* 222
Figure 46 *Répartition des réponses relatives à la question Q2.6 sur la modification de la formule d'agrégation des critères* 223
Figure 47 *Répartition des réponses relatives à la question Q2.7 sur la validation de la carte d'aptitude* 223
Figure 48 *Répartition des réponses relatives à la question Q2.9 sur le choix de la carte*..... 224
Figure 49 *Répartition des réponses relatives à la question Q3.2 sur la description des formes.* 225
Figure 50 *Carte (a) présentant des vastes surfaces de zones favorables en vert foncé.* 226
Figure 51 *Répartition des réponses relatives à la question Q3.8 sur la validation d'une carte (a)* 226
Figure 53 *Répartition des réponses relatives à la question Q3.9 sur la validation d'une carte (b)* 227
Figure 54 *Carte 1 Carte 2 Carte3.* 228
Figure 55 *Répartition des réponses relatives à la question Q3.10 sur les arguments de choix de la carte* 229
Figure 56 *Répartition des réponses relatives à la question Q3.11 sur la préconisation du site* 229
Figure 57 *Exemple de préconisation d'implantation de vignoble par 'ovales'* 230
Figure 58 *Exemple de préconisation d'implantation de vignoble par 'carré'* 230
Figure 59 *Schéma de codage pour constituer la taxonomie* 233
Figure 61 *Nombre d'occurrences de Contrôles en T0* 248
Figure 62 *Nombre d'occurrences d'Objets en T0* 248
Figure 63 *Nombre d'occurrences d'Action en T1.* 249
Figure 64 *Nombre d'occurrences de Contrôles en T1* 250
Figure 65 *Nombre d'occurrences d'Objets en T1* 250
Figure 66 *Nombre d'occurrences d'Actions en T2* 251
Figure 67 *Nombre d'occurrences de Contrôles en T2* 251
Figure 68 *Nombre d'occurrences d'Objets en T2* 252
Figure 69 *Nombre d'occurrences d'Actions en T3* 253
Figure 70 *Nombre d'occurrences de Contrôles en T3.* 253
Figure 71 *Nombre d'occurrences d'Objets en T3* 254
Figure 72 *Extrait de modélisation en ligne pour un groupe d'étudiants (g6)* 260

Figure 73 *Modélisation taxonomique en ligne* 261
Figure 74 *Occurrences d'opérations de contrôles par vérification mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3)* 262
Figure 75 *Occurrences d'opérations de contrôles par diagnostic mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3)* 262
Figure 76 *Occurrences des descripteurs de l'objet algébrique mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3)* 263
Figure 77 *Occurrences des descripteurs de l'objet couleur mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6)* 263
Figure 78 *Occurrences des descripteurs de l'objet orographique mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6)* 264
Figure 79 *Occurrences des descripteurs de l'objet géographique mobilisés en T0 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3)* 264
Figure 80 *Occurrences des descripteurs des contrôles par vérification pour les groupes d'étudiants (g1-g6) en T1* 265
Figure 81 *Occurrences des descripteurs des contrôles par diagnostic pour les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3) en T1* 265
Figure 82 *Occurrences des descripteurs de l'objet algébrique en T1 pour les groupes d'étudiants (g1-g6)* 266
Figure 83 *Occurrences des descripteurs de l'objet couleur en T1 pour les groupes d'étudiants (g1-g6)* 266
Figure 84 *Occurrences des descripteurs des contrôles par vérification pour les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3) en T2* 268
Figure 85 *Occurrences des descripteurs des contrôles par diagnostic pour les étudiants (g1-g6) en T2* 268
Figure 86 *Occurrences des descripteurs de l'objet orographique mobilisé en T2 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e2)* 269
Figure 87 *Occurrences des descripteurs de l'objet orographique mobilisé en T2 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e2)* 269
Figure 88 *Occurrences des descripteurs des contrôles par vérification pour les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3) en T3* 270
Figure 89 *Occurrences des descripteurs de l'objet couleur mobilisées en T3 par les étudiants (g1-g6) et les experts (e1-e3).* 271
Figure 90 *Carte d'aptitude par un groupe de la promotion LPPRS 2013.* 292

Figure 91 *Site préconisé par un groupe de la promotion LPPRS 2013.* 292
Figure 92 *Cycle de l'approche itérative en boucle* 293
Figure 93 *Un extrait de la Toolbox : les fonctionnalités sont organisées thématiquement et par ordre alphabétique. Dans l'encadré bleue de droite une proposition de Toolbox bridée comprenant que les principales fonctionnalités nécessaires à réalisation d'une carte d'aptitude.* 302

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 *Répertoire Métiers* 51
Tableau 2 *Exemple de situations métiers et procédés généraux pour 3 Filères : Géophysique, Hydrogéologie, Environnement* 52
Tableau 3 *Exemple de Situations métiers et procédés généraux pour 3 Filères : Géophysique, Hydrogéologie, Environnement* 53
Tableau 4 *Filières Hydrogéologie : quelques exemples de compétences générales par métier.* 54
Tableau 5 *Synthèse des informations issues des offres d'emploi* 59
Tableau 6 *Répartition globale des géologues par catégories d'employeurs en France (source UFG, 2006, actualisé)* 61
Tableau 7 *Synthèse de l'analyse des rapports de stage M2 Pro* 65
Tableau 8 *Synthèses des tâches identifiées dans les rapports de stage M2* 66
Tableau 9 *Exemples de cas d'étude qui utilisent des méthodes d'analyse spatiale multicritère dans différents domaines des Géosciences et dans différents pays* 72
Tableau 10 *Synthèse des tâches et des compétences SIG par secteurs d'activité* 74
Tableau 11 *Synthèse des méthodes multicritères* 84
Tableau 12 *Propriétés de la carte d'aptitude* 95
Tableau 13 *Comparaison des opérations Somme Pondérées et Superposition Pondérée dans ArcGIS 10.0* 109
Tableau 14 *Description de l'activité de cartographie d'aptitude avec des méthodes ASMC selon le « schème d'activité »* 119
Tableau 15 *Liste des variables didactique possibles dans notre problème : en vert celles retenues.* 167
Tableau 16 *Exemple de solution de la Situation A réalisée par les étudiants* 168
Tableau 17 *Exemple de solution de la Situation B proposée par les étudiants* 169
Tableau 18 *Légende de l'Architecture générale du module* 174
Tableau 19 *Questions du Q1* 180
Tableau 20 *Questions du Q2* 181
Tableau 21 *Questions du Q3* 182
Tableau 22 *Les thèmes extraits pour le Questionnaire 1* 214
Tableau 23 *Les thèmes extraits pour le Questionnaire 2* 216

Tableau 24 *Les thèmes extraits pour le Questionnaire 3* 217
Tableau 25 *Pondérations attribuées aux critères pour les 3 Cartes de la Figure 51* 228
Tableau 26 *Synthèse des thèmes présentés selon les composantes du schème d'activité de Vergnaud (1990).* 231
Tableau 27 *Répertoire des Actions en T0 et en T1* 235
Tableau 28 *Répertoire des Actions T2 et T3* 235
Tableau 29 *Descripteurs relatifs aux opérations de contrôles par vérification* 238
Tableau 30 *Descripteurs relatifs aux opérations de contrôles par diagnostic* 239
Tableau 31 *Descripteurs relatifs aux opérations de contrôles par correction* 240
Tableau 32 *Descripteurs de l'objet « algébrique »* 241
Tableau 33 *Descripteurs de l'objet « couleur »* 242
Tableau 34 *Descripteurs de l'objet « orographique »* 243
Tableau 35.*Descripteurs de l'objet « géographique »* 244
Tableau 36 *Descripteurs de l'objet « zone analysée »* 246
Tableau 37 *Les trois cartes ayant obtenus les trois meilleurs scores.* 256
Tableau 38 *Les trois cartes ayant obtenus les scores moyens* 257
Tableau 39 *Les trois cartes ayant obtenu les scores les plus faibles* 258
Tableau 40 *Synthèse des éléments cognitifs les plus récurrents pour l'ensemble d'experts et d'étudiants.* 273
Tableau 41 *Synthèse des éléments cognitifs par profil* 274