ÉTUDE DE L'USAGE DE LA COULEUR DANS L'APPRENTISSAGE DES SIG EN GÉOSCIENCES

Le cas de la cartographie d'aptitude

par Raffaella Balzarini et Paule-Annick Davoine

Laboratoire d'informatique de Grenoble , équipe Steamer
681 rue de la Passerelle, 38400 Saint Martin d'Hères
raffaella.balzarini@imag.fr, paule.annick.davoine@imag.fr

Introduction

L'appropriation des méthodes et techniques géomatiques, en tant qu'outils d'aide à la prise de décision chez des utilisateurs novices en matière de SIG, est une situation de plus en plus courante qui s'inscrit dans l'évolution de la place de l'information géographique dans notre société. L'utilisation de l'information géographique n'est plus réservée aux spécialistes de la géographie, elle est aujourd'hui de plus en plus présente dans les pratiques professionnelles et quotidiennes de tous. Cela soulève donc la question de l'accessibilité aux connaissances géomatiques par des non-spécialistes. Nous nommons « non-spécialistes » les utilisateurs de SIG dont la formation universitaire ne relève pas de parcours en géographie ou en géomatique, mais qui, dans des perspectives professionnelles doivent se former aux méthodes d'analyse spatiale, à la modélisation de l'information géographique et à la réalisation de cartes. Nous nous questionnons sur les usages que ces utilisateurs « non spécialistes » font des règles procédurales, analytiques et sémiotiques lorsqu'ils sont amenés à réaliser des cartes avec les SIG dans le cadre de projets environnementaux. Nous avons étudié ces usages d'une part à travers l'analyse des processus cognitifs qui sous-tendent le raisonnement visuel (MacEachren, 1995), et d'autre part à travers l'identification des différences entre les stratégies experts et novices (Petcovic et Libarkin, 2007). Cet article présente une synthèse des résultats de l'étude et les propositions de conception didactique mises en œuvre dans le cadre de dispositifs de formation innovants.

Le contexte

Le contexte de la recherche se situe dans le cadre de l'enseignement supérieur des SIG et de l'analyse spatiale dans des filières de non-géographes et plus précisément auprès d'étudiants de licences professionnelles en sciences de la Terre et dans les écoles d'ingénieurs en énergies, eaux et environnement. En explorant les questions liées à l'enseignement-apprentissage, cette recherche s'enrichit en plus des champs disciplinaires des géo-cognition et géo-visualisation, des domaines théoriques et méthodologiques de la didactique des sciences, et professionnels et de la psychologie cognitive.

Le cas d'étude : la carte d'aptitude

Dans une perspective didactique, professionnelle et sociétale, nous nous sommes intéressés à la cartographie d'aptitude, réalisée avec des méthodes d'analyse spatiale multicritères. Les sciences de l'information géographique et les SIG ont largement employé le terme de « carte de potentialité ou d'aptitude », traduction du terme anglophone «*suitability map* » (Harper Collins Publishers, 2005) pour désigner les motifs spatiaux les plus appropriés pour répondre à des questions d'aménagement du territoire, de planification régionale, d'agriculture, de géologie, d'écologie et d'impact environnemental (Malczewski, 2004). Nous avons choisi la cartographie d'aptitude sur la base d'une analyse métier (Balzarini et al., 2011) qui l'a fait ressortir comme une des principales applications des SIG pour les géosciences, pour son caractère pédagogique car elle permet d'intégrer différentes notions fondamentales des SIG. Elle possède aussi un fort caractère sociétal car elle a comme rôle d'appuyer la prise de décision. La réalisation de cette activité implique l'appropriation d'une procédure séquentielle et itérative, constituée de choix de critères, d'opérations algébriques et de contrôles visuels sur les résultats cartographiques. D'un point de vue sémiologique, la spécificité de cette carte est que toute l'information est concentrée dans la seule variable visuelle mobilisée dans sa construction : la teinte ou plutôt la variation de teinte des couleurs. Ceci demande un effort de synthèse important d'un point de vue cognitif, au moment de l'interprétation et de la validation de la carte. La figure 1 présente un exemple de carte d'aptitude pour la localisation de sites aptes à l'implantation de stations de ski en Isère. Cette

carte est extraite de productions d'étudiants de licence professionnelle en géosciences.

La construction de la carte d'aptitude

Dans le contexte de l'analyse d'aptitude, la recherche de site est basée sur la délimitation d'un territoire d'étude qui peut être subdivisé en un ensemble d'unités observables. L'analyse d'aptitude classe et agrège des unités observables selon leur potentialité par rapport à un objectif spécifique ; elle fournit les caractéristiques spatiales des unités selon les critères de recherche (Malczewski, 2006). Cette méthode permet à travers la combinaison de plusieurs critères de créer des zones, des surfaces qui représentent une évaluation en réponse à un problème donné (i.e . localiser les meilleures zones pour implanter une station de ski). Les surfaces qui représentent le score le plus haut sont celles les plus aptes à répondre à un problème. La figure 2 illustre schématiquement le principe de combinaison des couches.

La carte résultant des sommes pondérées des critères est une « carte thématique de synthèse ». Elle est « essentiellement conçue dans un but explicatif, représentant un phénomène dans son ensemble par ses relations internes » (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. Tous les géo-traitements qui caractérisent le processus de cartographie d'aptitude s'effectuent dans un format matriciel. Le degré de finesse de la matrice, 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. En termes de transformations cartographiques et de modes de représentation, la carte d'aptitude appartient aux familles des cartes surfaciques discrètes régulières et elle comporte la couleur et la teinte comme variable visuelle (Cauvin et al., 2007).

Le rôle de la couleur dans la carte d'aptitude

La **couleur** joue ici un rôle déterminant. En règle générale, la couleur est une variable forte, immédiatement perceptible, ce qui lui donne un fort pouvoir de différentiation. Lorsque dans le spectre des couleurs, un ordre est établi en fonction de l'accroissement de l'intensité, on parle de **gradations harmoniques** (Zanin et Trémélo, 2003). La couleur est utilisée dans toutes les implantations (ponctuelles, linéaires) mais elle trouve son efficacité maximale en implantation zonale. En effet, les différences de couleurs sont d'autant plus sensibles que la surface colorée est grande : pour établir une différenciation sélective, on utilisera 4 ou 5 paliers différents, pour percevoir un ordre en implantation zonale on peut atteindre 10 paliers (Zanin et Trémélo, 2003). Ces indications préconisent l'importance que nous attribuons à l'usage de la couleur soit d'un point de vue pédagogique - comment les utilisateurs/étudiants s'approprient cette compétence -, soit d'un point de vue cognitif -comment les utilisateurs/étudiants raisonnent avec et grâce à la couleur-.

La représentation du relief dans la carte d'aptitude

Un autre élément décisif dans la réalisation d'une carte d'aptitude est le choix du fond de carte : ceci favorise le contrôle et la vérification des informations représentées ; la validité de la carte est subordonnée à la similitude avec la représentation de la réalité du terrain. Grâce aux technologies SIG, les résultats obtenus lors de la construction de cartes d'aptitude sont souvent drapés sur des fonds de carte, que ce soient des cartes d'infrastructures, des modèles numériques de terrain représentant le relief, des globes virtuels, des images satellitaires, des ortho-photos 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 2Dimensions ou 3Dimensions, a été largement explorée en littérature : nous nous appuyions sur la taxonomie des signaux ou indices de profondeur établie par Kraak (1988). Selon cette taxonomie, les techniques de nuances de couleurs ou d'ombrage reproduisent des effets de profondeur selon une approche non-perspective, qui permet d'obtenir l'éclairage hypothétique d'une surface en déterminant les valeurs d'éclairage de chaque cellule d'un raster. L'ombrage améliore nettement la perception 3Dimensions qui est un atout indispensable dans la cartographie d'aptitude, notamment lorsqu'il s'agit de traiter des problématiques environnementales liées à la morphologie du sol : par exemple, 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.

La problématique d'enseignement

Un des objectifs de l'enseignement de la cartographie avec les SIG en sciences de la terre, est que des futurs professionnels de l'environnement s'approprient des notions et des techniques nécessaires à la construction de documents analytiques et visuels : la carte doit répondre à une question et faciliter la prise de décision. Elle doit donc être compréhensible et lisible. L'identification des principales propriétés de la carte d'aptitude permet de constituer une sorte de référentiel,

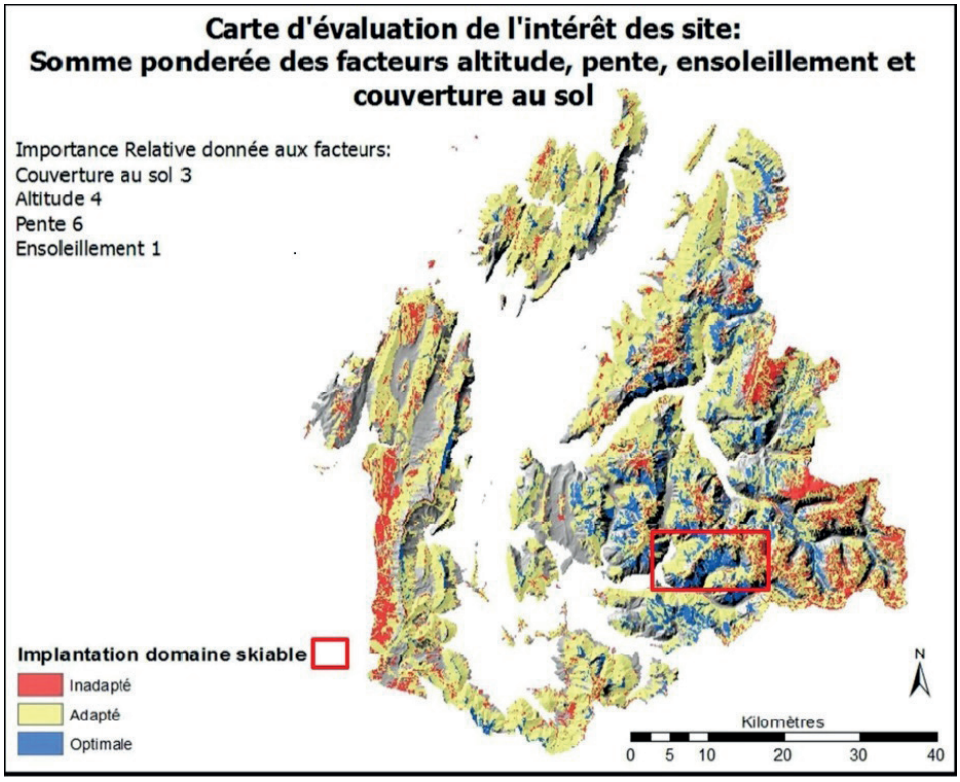


Figure 1 : Carte d'aptitude pour l'implantation de stations de ski en Isère. Extrait des travaux d'étudiants en licence professionnelle, UFR PhiTEM, Université Joseph Fourier Grenoble 2014

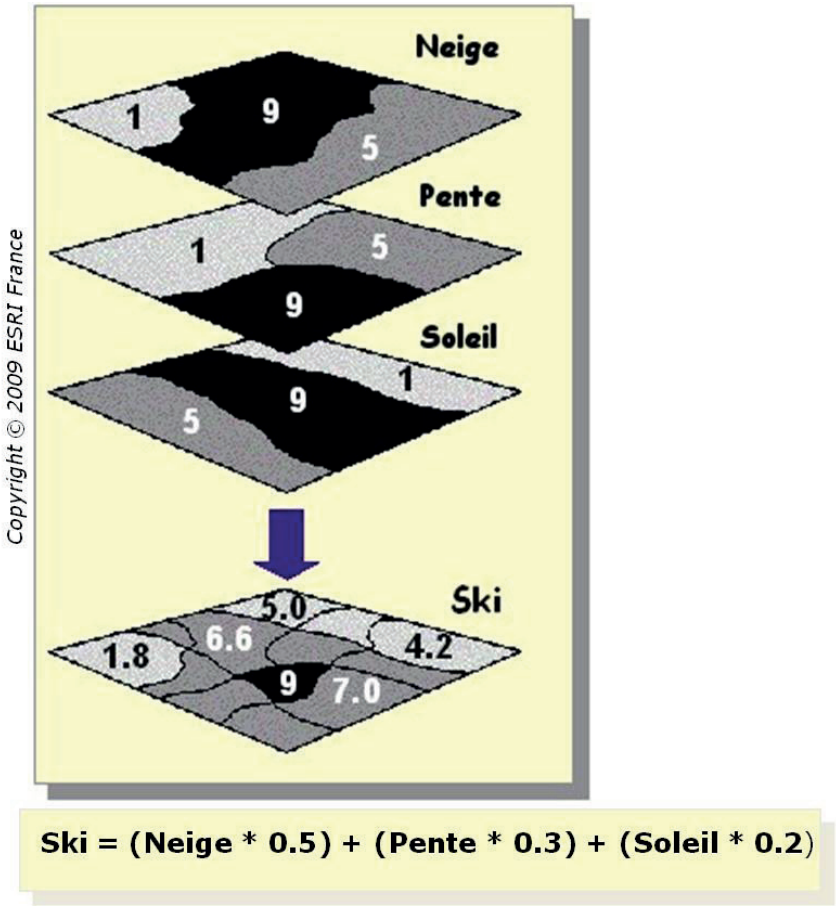


Figure2 : Schéma de la combinaison de couches dans l'analyse multicritère

conceptuel et fonctionnel, un modèle éducatif sur lequel l'enseignant se base pour transmettre les connaissances nécessaires à la construction et l'évaluation de la carte. Force est de constater que cette transmission-appropriation ne s'opère pas sans difficultés, mais que l'appropriation technologique des outils supports à la réalisation des cartes (les SIG) s'effectue le plus souvent au détriment de l'utilisation des propriétés visuelles de la carte. Ce constat s'inscrit dans une problématique plus générale sur l'étude de l'apprentissage et peut se décliner en deux questions fondamentales :

- Comment assurer la transmission des connaissances de façon plus efficace, à travers l'étude des raisonnements mobilisés lors de l'apprentissage d'une carte d'aptitude ?
- Comment l'enseignement de la cartographie avec les SIG peut s'adapter aux différents besoins de formation dans les métiers de l'environnement (géosciences, ingénierie…), où la réalisation cartographique est une compétence de plus en plus demandée ?

Pour tenter de répondre à ces questions, nous avons construit une méthodologie (expérimentale, exploratoire et pluridisciplinaire), qui a permis d'évaluer des raisonnements d'utilisateurs (experts et novices) et, sur la base des résultats obtenus, de concevoir des dispositifs d'apprentissage innovants en adéquation avec les attentes du marché de l'emploi. Cette démarche nous a permis, entre autres, de mettre en exergue les processus cognitifs mobilisés par les étudiants au regard de l'usage de la couleur lors de leurs réalisations cartographiques.

La démarche méthodologique

Afin d'identifier les actions, les concepts, et les choix qui supportent la tâche de cartographie d'aptitude chez des professionnels (les experts) et des étudiants (novices), nous nous sommes appuyés sur les cadres théoriques issus de la psychologie cognitive qui définit le raisonnement « comme un ensemble de choix et de contrôles sur les actions, les opérateurs (règles), et les objets conceptuels (inférences) mobilisés pour réaliser une tâche » (Johnson-Laird, 1983 ; Ohlsson, 1996). Dans ce cadre théorique s'inscrit l'étude de l'acquisition des compétences à travers un 'continuum expert-novices' (Chi, 2006 ; Petcovic et Libarkin, 2007). Cette approche permet de comparer, entre les experts et les novices, les structures et l'organisation des connaissances, ainsi que les stratégies mises en œuvre lors de la résolution d'un problème. Les experts et les novices activent des structures mentales très différentes : l'utilisation de la structure appropriée à une situation donnée demande un apprentissage et de la pratique (Mac Eachren, 1995). Pour étudier l'expertise nous avons retenu l'approche par la résolution de problème chez les experts, proposée par Chi (2006). Selon l'auteur « la connaissance expert peut être analysée selon une perspective de traitement de l'information, ce qui implique qu'elle soit organisée par composants et structurée de façon hiérarchique ». Nous nous sommes aussi appuyés sur l'étude de l'expertise dans le contexte de la cartographie menée par Kent et Chang, (2008). Enfin, aux Sciences de l'éducation, nous avons emprunté les paradigmes de la Design-Based Research (Hmelo-Silver, 2004) pour mettre en œuvre le protocole expérimental, ce qui a comporté :

- La conception de la situation-problème. Il s'agit de la séquence pédagogique qui nous a permis d'observer les étudiants et les experts. Le problème posé appartient à la famille de problèmes identifiée comme récurrente chez les professionnels (Simon, 1962), à savoir la cartographie d'aptitude pour la prise de décision. En l'occurrence, les sujets devaient mener une étude cartographique de susceptibilité du sol pour l'implémentation d'une station de ski dans le sud Isère. Pour cela, ils ont effectué une analyse spatiale multicritère sur des critères géomorphologiques, hydrogéologiques, climatiques et géographiques. Pour les étudiants, nous avons disposé de 17 heures tutorées, divisées en 5 séances de 3 heures, et 1 séance de 2, distribuées sur 2 semaines. Pour les experts nous avons disposé de 4 heures. L'outil SIG utilisé est ArcGIS 10.0.
- Un recueil de données sur l'observation de l'activité des étudiants et experts résolvant ce problème. Nous avons recueilli trois types de données :
  - les productions : les cartes des étudiants et des experts ;
  - les données verbales : les interactions verbales des étudiants pendant les étapes –clé de la procédure de résolution (enregistrements vidéo et audio) ; les protocoles « thinking-aloud » des experts (enregistrements vidéo) ;
  - les réponses à trois questionnaires à questions ouvertes : l'analyse des réponses permet de repérer les principales difficultés ressenties par les étudiants.

Les participants

Nous avons mené l'expérimentation auprès de deux populations d'étudiants bien différenciées mais toutes deux de niveau bac +3. D'une part 15 étudiants de licence professionnelle en sciences de la Terre et, d'autre part, 50 étudiants en école d'ingénieurs en sciences de l'environnement. Ces étudiants sont novices en analyse spatiale et SIG et travaillaient par groupes de 5 à 7 étudiants. Trois spécialistes, un géophysicien, un cartographe et un ingénieur SIG, ont constitué la partie « Experts » de notre expérimentation. Ils ont été interrogés sur leur lieu de travail, seuls avec un chercheur,

selon la méthode de la « tâche artificielle » : ils réalisent l'activité préconçue et verbalisent à voix haute (« thinking aloud ») leurs actions. Les chemins empruntés par l'expert lors de l'exécution de la tâche, fournissent une référence fondamentale sur les processus cognitifs mis en œuvre.

Méthodes d'analyse des données

Nous présentons ci-après la méthode utilisée pour l'analyse des données verbales qui ont été retranscrites. Nous avons analysé 3 heures d'enregistrements pour chacun des 3 experts et 2,5 heures pour chacun des 6 groupes d'étudiants (3 groupes « géologues » et 3 groupes «ingénieurs »). Nous présentons également une synthèse de l'analyse qualitative des cartes d'aptitude produites.

Les données verbales

Les techniques de recueil et d'analyse des données issues des transcriptions verbales des sujets en activité, ont été menées selon l'analyse verbale de Chi (1997). Cette méthodologie, utilisée pour quantifier le codage subjectif ou qualitatif des contenus des phrases (*verbatim*), a deux objectifs : capturer la représentation d'une connaissance qu'un sujet peut avoir, opposer la connaissance d'un expert à celle d'un novice. Dans tout le processus de résolution d'un problème de localisation de site, nous avons analysé les transcriptions *(corpus)* des 4 tâches (T) fondamentales, correspondant aux phases cruciales de la procédure :

- la standardisation et le classement des données (discrétisation) (T0) ;
- l'attribution des poids et l'agrégation des critères (sommes pondérées) (T1) ;
- l'analyse visuelle des cartes résultant des sommes pondérées (T2) ;
- le choix du site (T3).

Après avoir défini le *corpus* à analyser sur la base des 4 tâches principales de la procédure, il a été nécessaire de segmenter les discours pour dégager les unités de codage. La segmentation peut s'effectuer à plusieurs niveaux, révélant une granularité diversifiée telle qu'un propos, une idée, un échange, un épisode, un changement d'activité ou une impasse. Des caractéristiques sémantiques ou syntaxiques (mot-clé, connexions..) illustrent ces segments. 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 : la tâche, les actions, les opérations (dont les opérations de contrôle), les objets conceptuels et leurs descripteurs. La figure 3 présente cette organisation schématique des unités de codage. L'objet est décrit « comme un groupement temporaire entre un ensemble de caractéristiques visuelles et des informations verbales (la verbalisation de l'objet) » (Kahneman, 1992).

Les objets conceptuels ont été répartis en cinq catégories taxonomiques : algébrique, couleur, orographique, géographique et analytique (zones susceptibles).

Les cartes produites

Parallèlement à l'analyse des données verbales, une évaluation de la qualité des cartes produites par les sujets a été effectuée, sur la base d'une grille d'analyse issue des indications de Cauvin et al. (2007) sur la perception, la lecture et les règles de construction de la carte. L'objectif de cette dernière analyse a été d'esquisser des corrélations entre les stratégies adoptées et la réussite (ou pas) de la carte d'aptitude. 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 ». Dans notre cas d'étude, il s'agit d'évaluer si la carte d'aptitude permet de prendre une décision (choisir un site pour l'implémentation d'une station de ski).

Les qualités de la carte peuvent être réparties en deux principales catégories :

- les qualités fondamentales, qui sont plutôt liées à la construction de la carte : l'adéquation à sa destination, la simplicité, l'exactitude et la fiabilité ;
- les qualités graphiques, qui sont plutôt associées à la perception de la carte : la lisibilité, la sélectivité et l'esthétique (Denègre, 2005, in Cauvin et al., 2007).

Les sept points constitutifs de la grille d'évaluation, ont été jugés selon une technique dite d'échelonnement catégoriel, dans laquelle on attribue aux cartes, un nombre traduisant un jugement (Cauvin et al., 2007). L'échelonnement correspondant à notre évaluation va de 0 à 3, respectivement de l'absence de la qualité (0) à la qualité clairement identifiée (3). La figure 4 présente un exemple de grille. Les grilles ont été complétées par trois examinateurs spécialistes du domaine : 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.

Les principaux résultats

Les données verbales

Les résultats qualitatifs

Nous présentons le détail de la catégorie taxonomique de l'objet **couleur**, qui rassemble tous les éléments verbaux relatifs au domaine de la variable visuelle couleur, une des principales variables nécessaires à l'interprétation d'une carte d'aptitude. Cet objet comporte cinq descripteurs. Bien que ces derniers soient

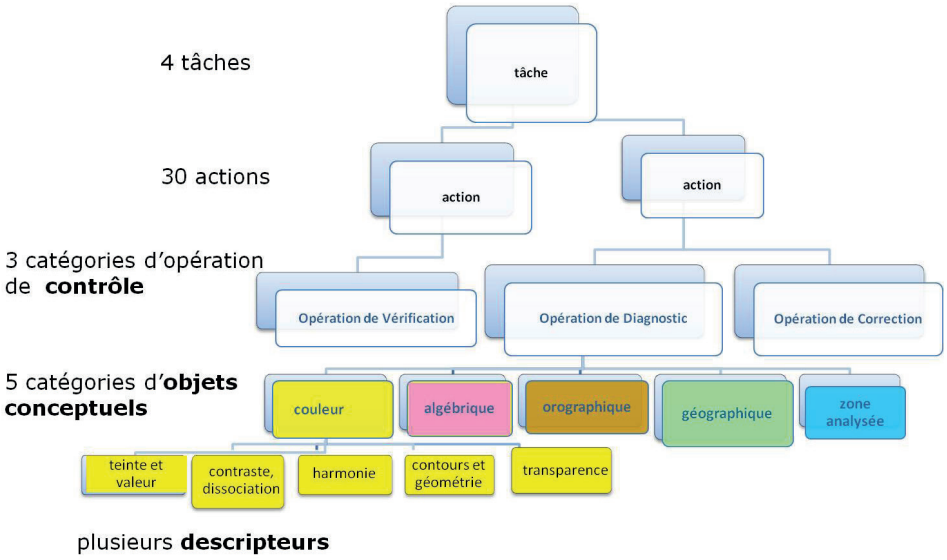
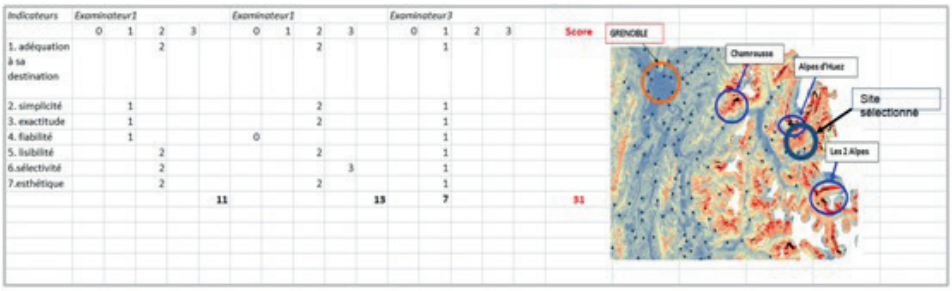


Figure 3 : Schéma de l'organisation hiérarchique de la segmentation du corpus



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 4 : Exemple de grille d'évaluation pour le groupe 4

Codes	Descripteurs	Exemples de Verbatim
V1	la teinte 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	la transparence	*«°c'est au niveau des transparences que tu peux jouer, mais des transparences sur du noir et blanc°»…siffle [g3]°*

Tableau 1 : Descripteurs de l'objet « couleur »

exclusivement issus des données analysées, nous nous appuyons 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 1 présente la catégorie de l'objet « couleur ».

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).

Les résultats quantitatifs

Les résultats quantitatifs sont issus du dénombrement des éléments cognitifs composant le schéma de codage (actions, opérations de contrôle et objets conceptuels) 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). Les résultats des dénombrements des catégories d'objets conceptuels sont présentés ci-après par tâche et par profil. **L'analyse de la tâche de standardisation et classement des données (T0)** montre que les objets conceptuels sont très nombreux chez les experts, notamment l'objet **algébrique** (fig. 5) 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 est très activée, que chez les géologues.

L'analyse de la tâche pondérations et agrégations des données (T1) montre que si l'objet algébrique reste prioritaire dans cette phase (figure 5), on observe l'émergence de l'objet couleur qui a un rôle déterminant sur les cartes résultant des sommes pondérées.

Dans l'analyse de **la tâche: analyse et choix des cartes des sommes pondérées (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 (fig. 7).

L'Analyse de la tâche de préconisation du site (T3) montre que 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 surface identifiée comme apte à la réalité géographique semble supporter la validation d'un site.

Le dénombrement 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. Les objets conceptuels liés à la couleur sont mobilisés par les sujets surtout dans les phases analytiques de choix et de contrôle (T2 et T3) de la carte.

Les cartes produites

Le score final des grilles d'évaluation correspond à la somme des notes données par les examinateurs : la note maximale qu'une carte peut obtenir est 63 (7 indicateurs x 3 valeur de la note x 3 examinateurs). Sur la base des scores obtenus, un classement a pu être établi. Le tableau 2 montre trois exemples de classement d'évaluation. L'expert (e2) a obtenu le score maximal : cette carte respecte 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 l'expert qui dit avoir besoin de plus d'informations pour finaliser son résultat. À l'opposé, la carte réalisée par le groupe d'étudiants géologues (g2) a reçu le score le plus bas : elle est totalement illisible, ne respecte aucun critère esthétique et est inexploitable.

En guise de conclusion, l'évaluation qualitative des cartes a été supportée par une technique d'échelonnement catégoriel, qui a permis de classer les cartes selon leur niveau de réussite. L'intérêt est maintenant d'associer la qualité de la carte aux processus de résolution identifiés à travers les composants du raisonnement.

Discussion : quelle place pour la couleur dans la caractérisation des stratégies ?

L'association entre la carte produite et les éléments du processus cognitif ne constitue pas en elle-même un véritable résultat. Il s'agit plutôt d'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 (i.e. une occurrence élevée d'objets conceptuels algébriques en T0), ou qu'un groupe ayant réalisé une carte inexploitable a mobilisé d'autres éléments cognitifs. La recherche de différences et de similitudes dans les occurrences des éléments cognitifs aide à tracer les grandes lignes des profils de

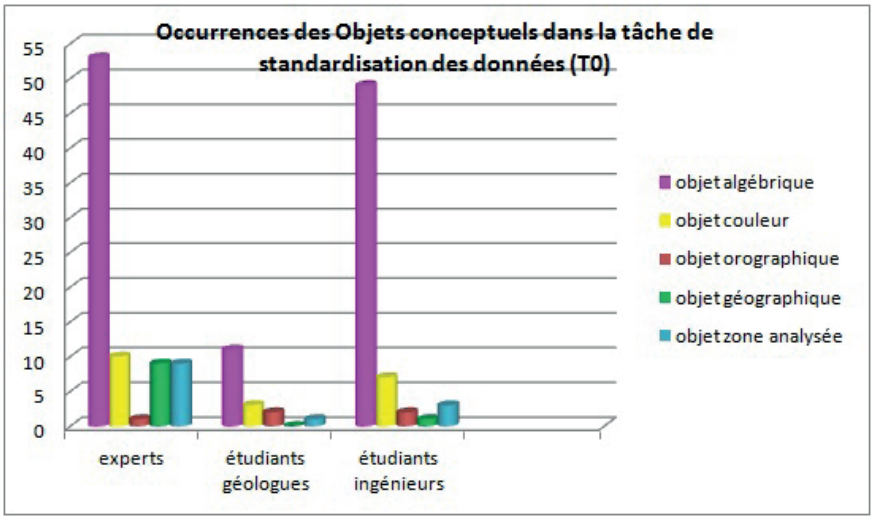


Figure 5 : Nombre d'occurrences d'objets en T0

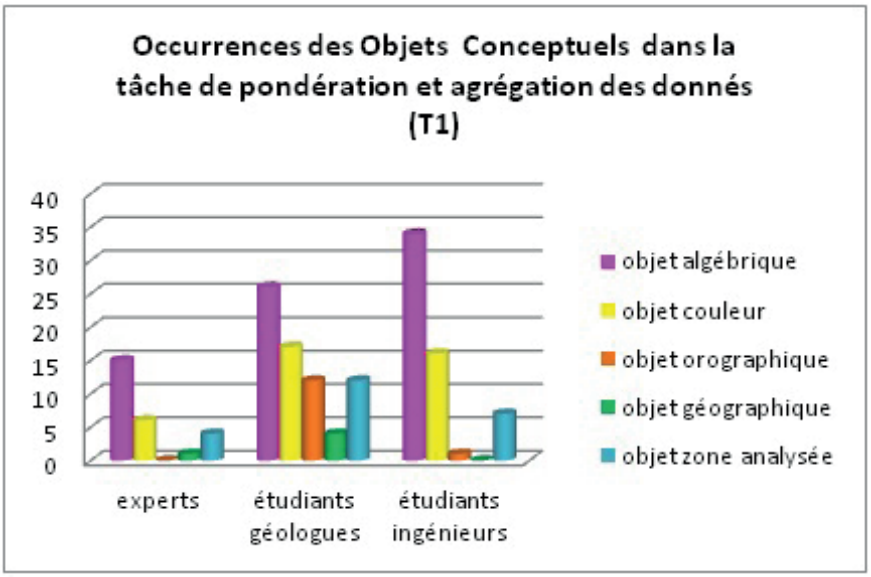


Figure 6 : Nombre d'occurrences d'objets en T1

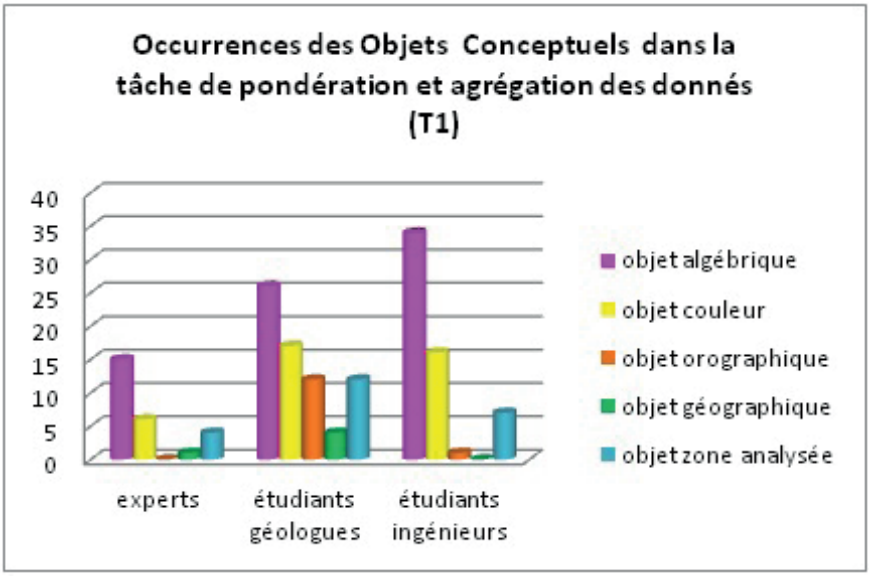


Figure 7 : Nombre d'occurrences d'objets en T2

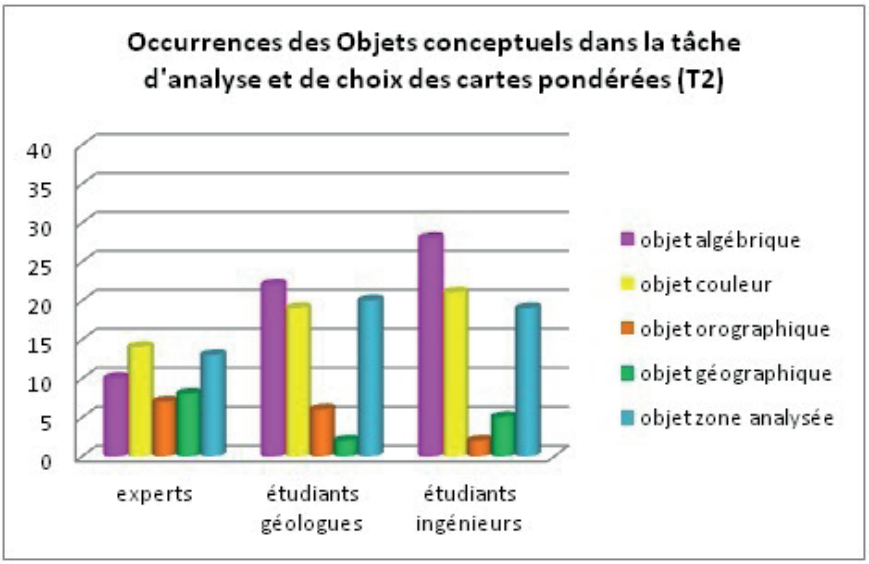


Figure 8 : Nombre d'occurrences d'objets en T3

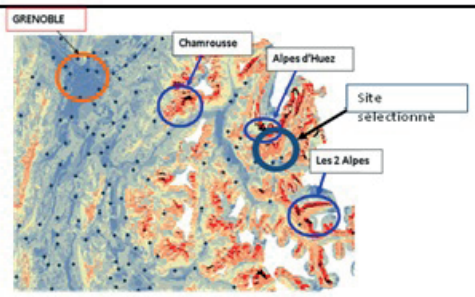
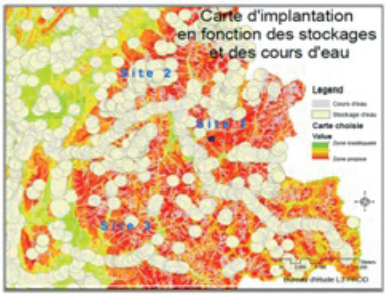
Sujet	Total score	Cartes d'aptitude
Expert (e2)	47/63	
Group d'étudiants ingénieurs (g4)	31/63	
Groupe d'étudiants géologues (g2)	2/63	

Tableau 2 : Exemple de classement dans l'évaluation des cartes

stratégies de résolution 'gagnantes' ou 'défaillantes' : les stratégies 'gagnantes' correspondent à l'enchaînement d'actions et d'opérations qui amènent à la réalisation d'une carte d'aptitude permettant de prendre une décision. Dans une perspective de 'Objectif, Situation, Action' (Ohlsson, 1996), 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 entamé des procédures, des choix, ont activé des schémas, dont l'issue a été une réponse cartographique correcte et utile. Ces stratégies, dites '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 motifs spatiaux dans l'information, grâce à la familiarité avec le sujet ;
- mise en relation des connaissances ;
- capacités métacognitives : l'auto-évaluation, la compréhension et la prise de décision basées sur ce qui est ou pas connu ;
- flexibilité dans la réflexion et la mise en œuvre du processus de résolution.

Des trois cartes réalisées par les experts, deux cartes (E2) et (E1) (Tableau 2) ont obtenu respectivement le premier et deuxième score de notre évaluation. On observe dans la carte produite par l'expert cartographe (E2) que 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. On observe dans la carte produite par l'expert géologue (E1) que 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. Les objets conceptuels liés à la sémiologie mobilisés chez les experts relèvent essentiellement des stratégies de contrôle. Ils correspondent à la vérification systématique des résultats mathématiques et graphiques (en couleur), qui sont affichés en légende du haut en bas, en allant des valeurs les plus hautes aux plus basses ou à l'analyse du relief créé par les effets visuels non-perspectifs (ombrage) pour vérifier leur connaissance et la nature du terrain.

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.

Deux des trois cartes produites par les étudiants géologues ont abouti à des résultats décevants. En termes d'objets conceptuels liés à la sémiologie mobilisés par les étudiants, on observe qu'ils sont activés comme chez les experts, plutôt durant les opérations de contrôle. Ils correspondent essentiellement à l'affectation des tons de couleur qui ressortent de la scène et à la recherche du contraste des couleurs pour isoler les zones à analyser. La nécessité d'activer du contraste, se concrétise chez les étudiants par l'utilisation de palette de couleurs extrêmes, très saturées. Le SIG ArcGIS fournit une gamme de palette tellement large et riche que, face au choix, les étudiants ne se laissent guider que par des goûts personnels. Enfin, contrairement aux experts, les étudiants ne semblent pas mobiliser d'objets liés à la sémiologie dans la phase de choix du site.

Au regard de cette analyse, des différences entre le type d'objet conceptuel (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, ont été identifiées. Ces différences sont utilisées pour concevoir des aides qui amènent les étudiants vers les stratégies expertes identifiées comme importantes pour les apprentissages.

Des suggestions didactiques

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). Proposer des aides didactiques à partir des lacunes sur les objets conceptuels (non) mobilisés, comporte forcément 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 liés à la sémiologie (catégorie « couleur » de notre taxonomie) dans la conception d'un scénario d'enseignement de cartographie d'aptitude. Bien que des consignes sur les règles de sémiologie graphique à respecter soient données au début du cours, les résultats (Balzarini et al., 2013) montrent que ces consignes sont rarement prises en compte. Il faut souligner que dans l'environnement graphique d'ArcGIS, 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 goûts personnels. Une façon de sensibiliser les étudiants à des 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. 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. Ces aides didactiques scénarisées ont été testées en février 2013 et février 2014, 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 7 groupes d'étudiants géologues des promotions 2013 et 2014 présentent, par rapport à la promotion 2012, une nette évolution de la qualité cartographique pour la prise de décision.

Conclusions

Nous avons abordé la question des usages sémiologiques pour des non-spécialistes, en présentant une étude qui explore les stratégies de résolution d'experts et de novices dans le cas de la cartographie d'aptitude au moyen des SIG. La réalisation de cette activité implique l'appropriation d'une procédure séquentielle et itérative, constituée de choix de critères, d'opérations algébriques et de contrôles visuels sur les résultats cartographiques. D'un point de vue sémiologique, la spécificité de cette carte est que toute l'information est concentrée dans la seule variable visuelle mobilisée dans sa construction : la couleur.

À travers l'analyse de l'activité d'experts et étudiants lors de la réalisation des cartes d'aptitude pour la localisation de sites, nous avons défini des indicateurs de raisonnement, c'est-à-dire des actions, des contrôles et des concepts mobilisés, ainsi que des stratégies gagnantes et défaillantes qui ont pu être caractérisées. Parmi ces objets conceptuels nous avons mis en évidence ceux qui relèvent du domaine de la sémiologie, et plus précisément de l'usage de la couleur. Nous avons relevé combien (occurrences), quand (à quelle phase de la procédure) et comment (quel type de catégories d'objets et de schémas imagés) la couleur est impliquée dans le raisonnement. En nous basant sur le constat que les stratégies de résolution déployées par les experts constituent un référent de qualité pour la réalisation de la carte d'aptitude, nous avons comparé les raisonnements experts –étudiants et localisé les différences entre les profils. Ceci a permis de mieux comprendre où et comment certaines erreurs ont pu se produire. Par la suite, nous avons pu concevoir et tester des aides didactiques qui incitent les étudiants à adopter des démarches experts là où il y a défaillance. Or, si le retour d'expérience montre que les aides didactiques proposées semblent améliorer les performances des étudiants dans la réalisation de leurs cartes d'aptitude, il nous semble que la question de l'intégration du renouveau de la sémiologie reste ouverte. En termes d'enseignement, le message que nous essayons de transmettre à nos étudiants (qui se destinent à des métiers de gestion et management territorial) est que la carte produite, qu'elle soit analytique ou pas, doit être lisible pour la prise de décisions au sein de cultures professionnelles diverses. Aujourd'hui, le véritable renouveau dans l'enseignement des règles sémiotiques dans les SIG est de relever le défi de garder d'une part ses spécificités et d'autre part de s'adapter à cet horizon de pratiques qui s'élargit et aux inférences « extérieures » provenant de plusieurs sources : des métiers qui se familiarisent avec les SIG, des nouvelles formes de

représentations symboliques et/ou iconiques émergeant du Web et des TIC…auxquelles les nouvelles générations sont de plus en plus sensibilisées. En gardant l'apport cognitif comme point focal, le défi est de favoriser ce qui est pertinent à la construction de la connaissance et à son évolution dans les différentes pratiques.

Remerciements

Cette étude s'est déroulée dans le cadre d'une recherche doctorale (2010-2013) financée par un projet CIFRE-ANRT, liant les équipes Steamer et Metah du Laboratoire d'informatique de Grenoble et la société ESRI France.

Bibliographie

Balzarini R., Davoine P-A., Ney M., 2011, "GIS in Geosciences Training: an experience in pedagogical-engineering", dans *Proceedings of International Cartographic Conference*, Paris.

Balzarini R., Ney M., Davoine P-A., 2013, « Processus cognitifs experts vs étudiants lors de la réalisation de cartes de susceptibilité : protocole expérimental pour une analyse comparée », *Colloque International SAGEO* 2013, Brest, septembre.

Bransford J.D., et al. (ed.), 2000, *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*, National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.

Cauvin C., 2007, *Cartographie thématique,* Hermès Science Publications.

Chi M.T.H et al., 1981, "Categorization and Representation Physics Problems by Experts and Novices", *Cognitive Science*, 5, p. 121-152.

Chi T.H.M., 1997, "Quantifying Qualitative Analyses of Verbal Data: A Practical Guide", *The Journal of the Learning Sciences*, 6(3), p.271–315.

Chi T.H.M., 2006, " Two Approaches to the Study of Experts 'Characteristics", dans K.A. Ericsson, N. Charness, P. Feltovich, & R. Hoffman (ed.), Cambridge Handbook of Expertise and Expert Performance, Cambridge, University Press., p. 121-30.

Collins English French ElectronicDictionary © Harper CollinsPublishers (2005)

Denègre J., 2005, *Sémiologie et conception cartographique,* Hermès.

Hmelo-Silver C.E. et al. , 2002, ""It's harder than we thought it would be": a comparative case study of expert-novice experimentation strategies", *Science Education*, v. 86, p. 219-243.

Hmelo-Silver C.E., 2004, "Problem-based learning: What and how do students learn?", *Educational Psychology Review*, 16, p. 235–266.

Johnson-Laird P.N., 1983, *Mental models: towards a cognitive science of language, inference and consciousness*, Cambridge, UK, Cambridge University Press.

Kahneman D., Triesman A., Gibbs B. J., 1992, "The reviewing of object files: Object specific integration of information", *Cognitive Psychology*, 24, p. 175-219.

Kent R et Chang, P CH, 2008, "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.

Kraak M.J., 1988, *Computer-assisted cartographical Three-Dimensional Imaging Techniques*, Delft, Delft University Press.

MacEachren A.M., 1995, *How maps work: representation visualization and design*, New York, Guilford Press.

MacEachren A.M et al., 2005, "Visualizing Geospatial Information Uncertainty: What We Know and What We Need to Know", *Cartography and Geographic Information Science*, vol. 32, n°3, p.139-160.

Malczewski J., 2004, "GIS-based land-use suitability: a critical overview", *Progress in Planning*, 62:3–65.

Malczewski J., 2006, "GIS-based multicriteria decision analysis : a survey of the literature", *IJGIS*, vol. 20, n°7, p.703-726.

Newell A., Simon H.A., 1972, *Human problem solving*, Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall.

Ohlsson S., 1996, "Learning from Performance Errors", *Psychological Review*, p. 241–262.

Petcovic H.L., Libarkin J.C., 2007, "Research in Science Education: The Expert-Novice Continu-um", *Journal of Geoscience Education*, 55(4), p.333–339.

Simon H.A., 1962, "The architecture of complexity", *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106, p. 467–482.

Zanin C. et Trémélo M-L., 2003, *Savoir faire une carte. Aide à a conception et à la réalisation d'une carte thématique univariée,* Edts BelinSup Géographie.