

La carte géologique

La carte géologique, instrument indispensable à toute approche du terrain, est une interprétation personnelle d'observations dispersées. Le géologue projette, sur le papier ou sur l'écran, sa culture scientifique, c'est-à-dire qu'il considère les objets après des opérations mentales et pas seulement avec des observations. Bref, la carte est une publication scientifique réalisée à partir d'observations isolées, réunies en une hypothèse cohérente, conduite à partir des concepts personnels inscrits dans la culture de son temps. Elle est une étape dans l'histoire des sciences. Cette caractéristique fondamentale n'est que rarement mise en avant par les auteurs. Il s'en suit une immense incompréhension entre eux et les utilisateurs non géologues, financeurs de la carte géologique et scientifiques d'autres disciplines.

Dans ce numéro, on trouve l'expression de besoins. Tous convergent en soulignant l'ambiguïté de la carte où ne sont pas distinguées les observations analysées et les interprétations. Des tentatives de différenciation ont été proposées dans le passé, elles ont toutes abouti à des documents peu lisibles. Il est évident qu'actuellement les moyens techniques permettent de prendre en considération l'exigence scientifique qui impose de scinder le fait observé et analysé de son extension sur des surfaces parfois très vastes.

Selon l'objectif recherché, il est possible, désormais, sur une carte classique, c'est-à-dire sur un document subjectif, de localiser par leurs coordonnées les sites observés ; chacun d'eux correspond à l'étude d'un affleurement, par exemple. La carte géologique, document synthétique, donne une image qui comprend, d'une part, ces données, d'autre part, de très vastes étendues interprétées avec les concepts en vigueur pour l'essentiel, originaux pour quelques uns. Les lecteurs et les utilisateurs doivent pouvoir évaluer le degré de fiabilité du document selon leurs besoins.

Compte tenu des référentiels géographiques, il est possible d'intégrer les données non affleurantes et leurs variations temporelles (débit et qualité de l'eau, variations des caractéristiques du sol, etc.).

La carte est à la convergence des efforts de toutes les disciplines des sciences de la Terre ; si elle doit rester un document esthétique, elle doit devenir un réceptacle du savoir des différents spécialistes. Toute donnée n'a qu'une valeur éphémère qui évolue et se précise avec les progrès des techniques et des concepts. Parmi les bases de données, certaines peuvent être exprimées à la demande, en complément du cadre général.

Une nouvelle cartographie est en train de naître de manière anarchique : un spécialiste publie des informations sur des affleurements, des forages, des observations obtenues par différentes techniques de télédétection, mais ne peut, ne veut ou ne sait les intégrer dans un document collectif. Cette œuvre de regroupement élaboré d'informations, qui fait évoluer les informations recueillies, ne peut relever que d'un service public scientifique oeuvrant dans la durée et qui en assure la cohérence.

La démarche, évidente pour des cartes à 1/50 000, peut s'appliquer aux différentes échelles. Sans carte générale, l'utilisateur trouve une tour de Babel, chacun parle, écrit, expose sans que l'autre sache démêler ce qui est fondé spatialement et temporellement et ce qui est hypothèse. La carte est un document sans cesse retouché. Ces multiples retouches, de temps à autre, conduisent à une réédition regroupant de manière cohérente les informations les plus solides. La lecture d'une carte, comme son lever, est une étape indispensable à la formation de tout géologue. Elle évolue grâce aux techniques d'analyse et de communication. Ce dossier le montre à l'évidence.

Jean DERCOURT

Université Pierre et Marie

Curie Secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences



Géologues d'hier et d'aujourd'hui. Le dessin est signé de Ramond (1832). Il représente le naturaliste auvergnat Jean-Baptiste Bouillet en tournée géologique dans la chaîne des Puy. Bouillet était lourdement chargé car, comme il l'a raconté avec humour dans ses mémoires, il aimait servir de «sherpa» à son ami le pharmacien Henri Lecoq, moins athlétique mais passionné et toujours soucieux de ramener le maximum d'échantillons à étudier (document © du Musée Lecoq à Clermont-Ferrand, reproduit avec l'aimable autorisation de la Ville de Clermont-Ferrand et l'aide de Pierre Pénicaut, conservateur).



De la carte d'hier à celle d'aujourd'hui

La carte géologique de la France, historique

L'École des mines de Paris, dès 1816, a été chargée de dresser des cartes géologiques en France. Alors que simultanément étaient publiés en 1822, « l'Essai de Carte géologique de la France, des Pays-Bas et des contrées voisines » de Omalius d'Halloy ainsi que la carte d'Angleterre de Greenough, fut décidé le principe de l'exécution d'une carte géologique générale de la France. Ce projet fut placé sous la direction de A. Brochant de Villiers. Après un voyage de reconnaissance en Angleterre en 1823, Léonce Élie-de-Beaumont (Nord et Est) et Armand Dufrénoy (Sud et Ouest) commencèrent en 1825 leur travail, à raison de 6 mois par an sur le terrain. À partir de 1826, de Billy fut adjoint à Dufrénoy et Fénéon à Élie de Beaumont. Les opérateurs firent séparément cinq campagnes d'été entre 1825 et 1829 ; de 1830 à 1834, ils consacrèrent cinq campagnes à des tournées communes de coordination. Ils parcoururent à pied pendant tout ce temps, plus de 80 000 km. Brochant de Villiers présenta un exemplaire colorié le 30 novembre 1835 à l'Académie des Sciences. Cinq années, de 1836 à 1841, furent ensuite consacrées à la rédaction du mémoire explicatif de la carte qui ne fut définitivement publiée à 1/500 000 qu'en 1842.

À la même époque, les ingénieurs des mines avaient été invités (30 août 1835) à établir des cartes géologiques par département, partout où elles pourraient être cofinancées par les autorités locales. Au total 59 de ces cartes départementales, de qualité très inégale, furent publiées. Pour l'exposition universelle de

1867, Élie de Beaumont avec de Chancourtois ainsi que E. Fuchs, A. Potier et A. de Lapparent préparèrent, à partir de ces cartes, 62 maquettes de feuilles à 1/80 000 du quart nord-est de la France qui furent exposées au Champ-de-Mars.

À la suite de l'exposition universelle, le « Service de la carte géologique de la France et des topographies souterraines » (« topographies souterraines » = étude géologique détaillée des gîtes minéraux) fut institué par le décret de Napoléon III en date du 1^{er} octobre 1868. Ce même décret précisait que la carte géologique serait exécutée aux frais de l'État. La nécessité de centraliser la cartographie géologique de la France, au moins au niveau de la coordination des levés et de l'édition, était ainsi entérinée. De 1868 à 1874, Élie de Beaumont fut le premier directeur du Service organisé, de 1880 à 1886, par son adjoint Alexandre Béguyer de Chancourtois. Le Service comprenait en outre A. Potier, F. Cléraud, E. Fuchs, A. de Lapparent et H. Douvillé. Au bout de six ans, à la mort d'Élie de Beaumont, 12 feuilles avaient été imprimées. On avait prévu en 1868 que les 268 feuilles à 1/80 000 du territoire national seraient levées en 10 ans pour une somme de 1 million de francs par les ingénieurs du Corps des mines. Une commission nommée pour réorganiser le Service de la carte géologique devait constater la disproportion manifeste entre le plan suivi pour l'exécution de ce travail et les moyens dont le Service disposait pour le réaliser. Le décret du 21 janvier 1875 réorganisa donc le Service de la carte géologique qui s'assura alors du concours de collaborateurs auxi-

liaires, notamment universitaires. C'est depuis 1878 que des géologues n'appartenant pas au cadre du Service de la carte géologique ont été associés aux opérations de lever cartographique. Le principe de cette collaboration, qui perdure jusqu'à aujourd'hui, est fondé sur l'existence d'une complémentarité entre les besoins de la carte géologique et les travaux des chercheurs dans le domaine des Sciences de la Terre. L'idée de base étant de faire bénéficier la carte de cette motivation de chercheur, pour demander au collaborateur d'effectuer simultanément deux catégories d'observations : celles qui ont trait à l'établissement de la cartographie, et celles qui sont



Extrait d'une carte géologique à 1/80 000 en hachures (Le Buis, Hautes-Alpes)

Ce dossier est le fruit d'une collaboration pluridisciplinaire et du concours de différents organismes et notamment de :

- Guy Menant (GM) de l'Inspection Générale de l'Éducation nationale, Frédéric Mouthereau (FM) de l'Université Pierre et Marie Curie, François Guillocheau (FG) de l'Université de Rennes I, Patrick De Wever (PdW) du Muséum national d'Histoire naturelle, Frédéric Tona (FT) de AREVA/COGEMA, Pascal Elion (PE) de l'ANDRA, Nicole Santarelli (NS) de l'Université Denis Diderot, Daniel Raymond (DR) de l'Université Pierre et Marie Curie ;
- au BRGM, de Denis Bonnefoy (DB), Pol Guennoc (PG), Franck Hannot (FH), Dominique Janjou (DJ), Pierre Laville (PL), Pierre Nehlig (PN), Jean-Michel Pellé (JMP), Philippe Rossi (PR), Frédéric Simien, Bernard Sauret (BS) et D. Vaslet (DV) ;
- et des membres du comité de rédaction de Géochronique notamment Maurice Jacqué (MJ), Raymonde André-Jehan (RAJ), Liliane Laville (LL), Jacqueline Lorenz (JL), Philippe Lagny, Michel Millet, Jean Féraud (JF).

Il a été coordonné par Denis Vaslet, Daniel Raymond et Jean Féraud.

Les références bibliographiques sont disponibles sur le site Internet de la Société Géologique de France <http://www.sgfr.com>

à la base de sa recherche (en réalité, ces démarches sont le plus souvent intimement liées.) C'est en fonction de cet arrangement forfaitaire que ses frais de déplacement sont pris en charge par le programme de la carte géologique, alors que sa rémunération de chercheur est assurée par son organisme de rattachement. La grande aventure scientifique de l'établissement de la carte à 1/80 000 s'est poursuivie sous la direction des ingénieurs du Corps des mines : Eugène Jacquot (de 1874 à 1887), Auguste Michel Lévy (de 1887 à 1911), Pierre Ternier (de 1911 à 1930), Louis de Launay (de 1931 à 1938), Eugène Raguin (de 1940 à 1953) et enfin Jean Goguel de 1953 à 1987. Tous les directeurs du Service furent eux-mêmes des géologues. « Mente et malleo » (« par l'esprit et par le marteau »), A. Michel-Lévy signa lui-même onze feuilles de la carte géologique à 1/80 000. Le lever de la carte géologique à 1/80 000 se déroula sur un siècle, avec une contribution majeure des ingénieurs du Corps des mines.

Dès 1924 est mis en chantier le lever des cartes à 1/50 000 sur le fond topographique détaillé, en courbes de niveaux, de la carte d'état-major. C'est toutefois seulement à partir des années 1950 que ce programme va prendre son essor. À partir du 1^{er} Janvier 1968 (décret du 22 décembre 1967), le Service de la carte géologique et le BRGM sont regroupés. À ce moment, 148 cartes géologiques à 1/50 000 (sur les 1060 du découpage national) sont éditées et de nombreuses maquettes sont déjà prêtes. De 1968 à 1987, la direction du programme est placée sous la responsabilité de Jean Goguel, inspecteur général de la carte géologique de la France. Créé en 1986, le Comité de la Carte Géologique de la France (CCGF) a un rôle normatif et de garant de la qualité des cartes et de leur notice explicative. Son action a abouti à la reconnaissance, par les instances CNRS et universitaires, de la carte géologique comme publication scientifique de premier rang, entérinant ainsi son caractère de publication scientifique. Le programme de la carte à 1/50 000, aujourd'hui quasiment achevé, aura, pour sa plus grande part sous la maîtrise d'œuvre du BRGM, été mené à bien grâce à l'implication massive d'une grande partie des géologues français, en grande partie universitaires (ou issus de l'université). Trois grandes périodes peuvent être distinguées dans l'établissement de la carte géologique de la France à 1/50 000 :

- 1950 à 1980 : c'est une période d'activité majeure où le lever des cartes géologiques est l'occasion de recherches en géologie régio-

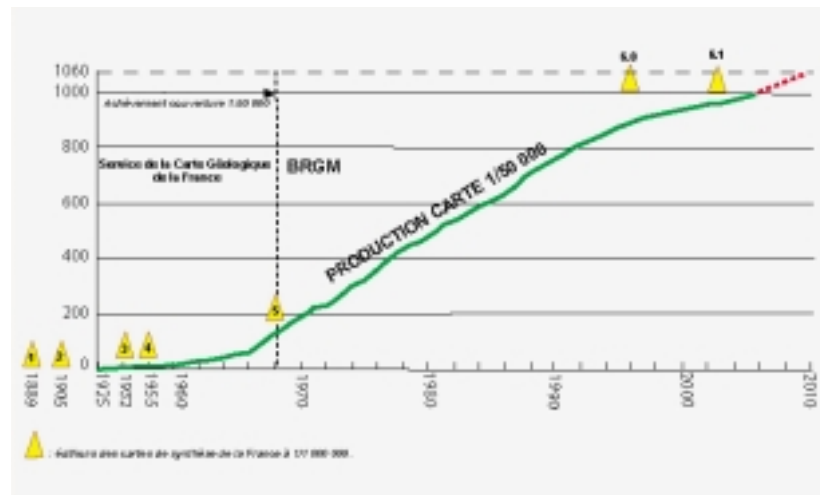
nale et donne lieu à des monographies souvent rédigées dans le cadre de thèses. De nombreux étudiants ont alors une solide formation de cartographe ;

- au cours des années 1980, la popularisation de la tectonique des plaques, le développement des méthodes et des outils géochimique et géophysique, réorientent la recherche vers la géologie thématique, le plus souvent hors de France et ceci entraîne ipso facto une diminution du nombre de thèses ayant pour support la cartographie du territoire lui-même ;

- la « révolution » de la tectonique des plaques n'a pas une influence directe sur la carte elle-même, l'échelle du 1/50 000 n'étant pas adéquate pour rendre compte des phénomènes d'échelle terrestre. C'est en revanche, la disponibilité de nouveaux modèles conceptuels (contextes orogéniques, dynamique des bassins sédimentaires, trajectoires PT du métamorphisme, etc.) qui sont venus aider à l'interprétation des faits de terrain. La sophistication des nouvelles techniques analytiques sont elles aussi venues renforcer l'arsenal du géologue. Ce sont notamment les progrès dans les analyses en minéralogie (microsonde électronique), en géochimie (analyses ICP), en géochronologie, ainsi qu'en micro-paléontologie qui ont permis de mieux documenter la carte ;



mosaïque est toutefois bien hétérogène. Le Comité de la Carte Géologique de France, après examen critique des cartes publiées, a identifié environ 400 cartes qui nécessiteront une révision en tout ou partie (substratum et/ou formations superficielles). Pour le moment, les secondes éditions ne représentent qu'environ 10 % de la production cartographique annuelle.



- depuis les années 90, la baisse d'intérêt pour la géologie régionale et de terrain devient critique. Il devient difficile de trouver des collaborateurs pour contribuer au lever de la carte, le manque de géologues français compétents en matière d'acquisition de données sur le terrain et de cartographie géologique devient alarmant ;
- la couverture le Carte géologique de la France, en première édition, sera achevée pour la fin de la décennie. Cette

Production de la carte géologique à 1/50 000 de la France.

Les programmes de cartographie géologique, par leur continuité dans le temps, par leur permanente actualisation des connaissances figurent certainement parmi les plus grands programmes scientifiques des pays développés.

P.R.

Dossier

La carte géologique aujourd'hui

Bien que beaucoup de lecteurs de *Géochronique* soient familiers des cartes géologiques, il nous a paru cependant utile de rappeler ci-dessous ce qu'est une carte géologique et les méthodes utilisées pour son élaboration.

Une carte géologique est la représentation conventionnelle, sur un fond topographique, des terrains visibles à l'affleurement ou masqués par des formations superficielles, dont on ne tient pas compte quand leur épaisseur est trop faible.

Le lever de la carte

Pendant longtemps le géologue a travaillé en solitaire ; véritable homme-orchestre, il assurait à la fois le lever de la carte, l'étude des échantillons récoltés et des fossiles... Actuellement, le lever est un travail d'équipe. Le terrain est fréquemment découpé en secteurs suivant les compétences de chacun ; par exemple un pétrologiste et un stratigraphe collaboreront au lever d'une carte comportant un socle hercynien et une couverture sédimentaire mésozoïque. Il n'en reste pas moins que dans sa zone, chaque géologue est en général un homme seul...

La réalisation de la carte nécessite de disposer d'un fond topographique précis à grande échelle ; pour la France, on utilise la carte topographique à 1/25 000 de l'Institut Géographique National (I.G.N.), éventuellement des plans directeurs à 1/10 000 dans les secteurs complexes. On commence par procéder à une étude bibliographique régionale et au recensement de toutes les données existantes, à commencer bien entendu par les cartes géologiques antérieures, mais également les sondages dont l'archivage, organisé par la Banque de données du sous-sol du BRGM, est accessible à tous. Ensuite, on analyse les photos aériennes et les images satellitaires de la zone à cartographier, ce qui permet une première approche : repérage d'affleurements, de contacts, d'accidents tectoniques, de certaines formations superficielles facilement reconnaissables (alluvions, éboulis...). L'étude de ces images permet également parfois l'élaboration d'hypothèses de travail sur la structure de la région, avant même le premier contact avec le terrain.

Le lever proprement dit consiste en l'exploration systématique, km² par km², de la région à cartographier. Toutes les observations sont reportées sur la carte topographique, qui devient alors une « minute ». Sur cette dernière, sont indiqués par des traits, des couleurs ou des signes conventionnels : (1) la position topo-

graphique des affleurements rencontrés, (2) la nature lithologique des formations à l'affleurement, (3) les contacts visibles à l'affleurement entre formations différentes, (4) les indications structurales (pendage des couches, axes de plis etc...), (5) les points de collecte d'échantillons. Par ailleurs, les géologues consignent sur leur « carnet de terrain » toutes les observations notables, les dessins de coupes géologiques, de paysages etc... On dit souvent que c'est à son carnet de terrain qu'on reconnaît le bon géologue !

Au laboratoire, divers spécialistes vont procéder au traitement des échantillons récoltés (lames minces de roches, extraction et détermination de microfaunes, analyses minéralogiques et géochimiques). Ces études conduisent à préciser les faciès et les microfaciès des formations rencontrées. Un élément essentiel est la datation de ces dernières par l'attribution d'un âge stratigraphique. On peut également, en utilisant la radiochronologie, dater des événements régionaux (par ex. la mise en place d'un granite ou un épisode de métamorphisme). Il est alors temps de procéder aux dernières vérifications et corrections, de résoudre les problèmes éventuels posés par les résultats de laboratoire grâce à des investigations complémentaires sur les points délicats ou importants. Si nécessaire, il faudra exécuter de petits sondages.

Le dessin de la carte

On dispose maintenant de suffisamment d'informations pour le dessin de la carte définitive, par interpolation des contours entre les affleurements. La coordination des contours fournis par les divers participants est confiée à un responsable de la carte, généralement le géologue qui a assuré la plus grande partie du lever.

Un problème délicat est celui de la représentation des formations superficielles ; sous ce terme, on regroupe toutes les formations continentales récentes de diverses origines. En principe, les formations superficielles doivent être figurées sur la carte si leur épaisseur et leur extension sont suffisantes pour une représentation à l'échelle de la carte définitive. Mais dans certaines régions de France où le subsol est masqué par un épais manteau de dépôts superficiels, l'application de cette règle aboutirait à une carte ne représentant pratiquement que ces derniers, et donc sans intérêt pour l'étude du sous-sol. Il y a donc fréquemment conflit entre la représentation des formations superficielles et celle des terrains sous-jacents. Aussi, dans la pratique, l'initiative est-elle laissée aux auteurs ; en général ces derniers représentent les formations superficielles quand leur épaisseur ne permet pas de connaître avec certitude la nature du sous-sol, et quand leur figuration ne nuit pas trop à la

compréhension de la géologie. Une meilleure solution serait de réaliser deux cartes de la même région : une avec toutes les formations superficielles dont la connaissance est indispensable, en particulier pour l'hydrogéologie, l'agriculture et la géologie du génie civil, une autre correspondant à l'écorché géologique, pour la compréhension du sous-sol. Cette solution a d'ailleurs été adoptée dans certains pays (Royaume-Uni, Pays-Bas, etc...). En France il y a eu une tentative (St Bonnet-de-Joux, Saône-et-Loire, n°601), mais qui n'a pas eu de suite.

La représentation des terrains (formations superficielles comprises) obéit aux règles suivantes. Un terrain est limité par un contour géologique (trait fin), éventuellement par un contact tectonique (trait gras) ; les traits sont continus si la limite est observée, en pointillé si la limite est supposée. Il est identifié à l'aide d'une couleur et d'une notation constituée de lettres et de chiffres. Pour un terrain sédimentaire, le couple couleur-notation fait référence à son âge stratigraphique ; pour tout autre terrain, ce couple fait référence à son lithofaciès. Les couleurs et les notations sont en principe conventionnelles, mais il existe d'assez nombreuses exceptions, justifiées par les particularités locales. La nomenclature des terrains présents sur une carte donnée est effectuée dans la légende des terrains, disposée dans les marges droite et gauche de la carte. Cette légende est constituée de caissons où sont rappelées la couleur et la notation de chaque terrain. Elle se lit de bas en haut et de droite à gauche, avec dans l'ordre les terrains cristallins et métamorphiques, puis les terrains sédimentaires et éventuellement volcaniques du plus ancien au plus récent, enfin les formations superficielles. Par ailleurs on indique de quelle façon sont figurés les contours géologiques et les contacts anormaux.

Divers symboles spécifiques décrivent les éléments structuraux. Le plus important d'entre eux est le signe de pendage, en forme de T, représentant l'inclinaison des surfaces géologiques (surfaces de stratification, de schistosité ou de foliation). D'autres symboles décrivent les linéations, axes de plis, etc... L'ensemble des symboles utilisés est rappelé dans la rubrique « éléments structuraux » de la légende. Les gîtes fossilifères sont indiqués par un symbole spécifique. D'autres signes conventionnels indiquent les carrières et exploitations souterraines en activité ou abandonnées, ainsi que les sondages. Ces derniers sont identifiés par un numéro d'archivage du Service Géologique National (banque de données du sous-sol du BRGM).

Sur les cartes récentes d'autres indications importantes sont incorporées à la légende. La colonne lithostratigraphique permet d'avoir une vue détaillée de l'épaisseur et de la lithologie des

terrains répertoriés dans la légende des terrains ou d'une partie de ces derniers. Ces informations proviennent des travaux de terrain ou d'un ou plusieurs sondages. La colonne est située en regard des caissons des terrains. Le schéma structural, représentation simplifiée des grandes unités stratigraphiques et structurales de la carte, est situé dans sa marge inférieure. En général, il recouvre une région plus grande que celle de la carte ; ainsi cette dernière est replacée dans son contexte régional. Les coupes géologiques correspondent à la section des terrains par un plan vertical ou plan de coupe. Les intersections du plan des coupes et de la topographie ou « traits de coupe » sont indiquées sur le schéma structural, ce qui permet leur repérage sur la carte elle-même. L'observation des coupes permet d'avoir rapidement une idée de la structure générale. Elles sont situées au centre de la marge inférieure de la carte. Enfin on indique dans un cartouche les zones de lever de chaque contributeur dont le nom est indiqué, ainsi que le nom du coordonnateur de l'ensemble.

La carte est toujours accompagnée d'une notice explicative, en général organisée de la façon suivante :

- introduction géographique et géologique ;
- description des terrains, du plus ancien au plus récent (à chaque caisson de la légende correspond une rubrique). Cette description comporte les caractères lithologiques du terrain reconnaissables à l'affleurement et en lame mince, accompagnés parfois d'analyses géochimiques. Pour les terrains sédimentaires s'y ajoutent leurs caractères sédimentologiques et paléontologiques, avec les noms des fossiles qu'ils ont livrés ;
- tectonique et métamorphisme régionaux, histoire géologique ;
- ressources du sous-sol (hydrogéologie, gîtes métallifères, matériaux de construction et d'empierrement) ;
- éventuellement, végétation et cultures, archéologie ;

- documentation complémentaire (sites classiques et itinéraires, bibliographie, documents et collections consultables) ;
- liste des auteurs de la notice (qui peut être en partie différente de celle des auteurs des levés) ;
- annexes (inventaire et description sommaire des gîtes minéraux et des principaux sondages).

Ceci amène, surtout pour les cartes récentes, à des notices volumineuses (parfois plus de 100 pages), véritables ouvrages de référence sur la géologie régionale.

Utilisations de la carte géologique

La carte géologique est l'objet d'utilisations variées, comme on le verra dans la suite du dossier. Mais soulignons d'emblée qu'un des grands intérêts de ce document est qu'il permet de construire des coupes géologiques. Mais il faut garder à l'esprit qu'une coupe géologique est nécessairement interprétative, la part d'interprétation pouvant être diminuée si on dispose de renseignements provenant de sondages, ou, plus rarement, de profils sismiques. La carte géologique présente également un deuxième intérêt ; la reconstitution de l'histoire géologique régionale.

La carte géologique est-elle un document objectif ?

La réponse est non ; le seul document objectif est la minute. Une carte géologique est nécessairement le résultat d'un mélange entre des observations et des interprétations à une date donnée. Cela est dû à de nombreuses raisons. Nous indiquons ci-dessous les principales :

- en raison de l'existence des formations superficielles, les contours correspondent en général à des interpolations entre points d'observation. Par ailleurs, il n'est pas possible au géologue de visiter un secteur de façon complète ; certains affleurements importants peuvent donc lui échapper. De plus, de nouveaux affleurements peuvent appa-

raître à l'occasion de travaux, de nouveaux sondages peuvent être effectués, apportant des informations conduisant parfois à de nouvelles interprétations à l'échelle régionale. Par conséquent, on a adopté le principe d'éditions successives ; à titre d'exemple, on pourra comparer les extraits des deux éditions de la feuille Montpellier à 1/50 000.

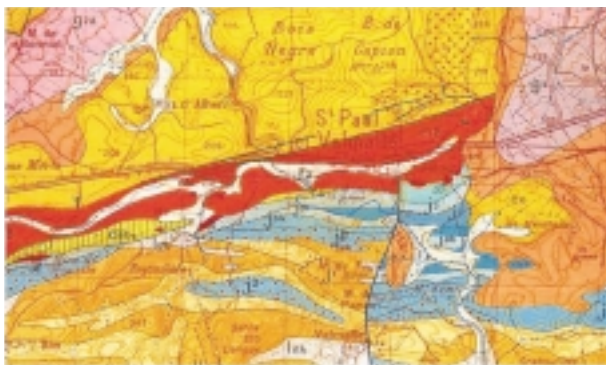
- le contact entre deux formations peut être défini de façon précise si leur lithologie est très différente (par ex. des calcaires massifs sur des marnes). Mais souvent le passage d'une formation à une autre est graduel (par ex. bancs calcaires de plus en plus fréquents lorsqu'on s'élève dans une série marneuse) ; dans ce cas la position du contact entre les deux formations dépend de l'appréciation du géologue.

- Le progrès des méthodes d'analyse ou l'utilisation de nouveaux outils fournissent continuellement de nouvelles informations ; par exemple l'âge d'une formation peut être précisé, voire changé.

- dans les régions de structure complexe, les hypothèses de travail de l'auteur de la carte peuvent elles-mêmes influencer son lever. En effet le terrain offrant une quantité de données incommensurable, les enregistrer toutes est humainement impossible et n'offrirait d'ailleurs aucun intérêt, car seules certaines sont significatives dans le cadre des hypothèses posées. Le géologue sépare donc les « signaux » du « bruit de fond » grâce au filtre de ses hypothèses, quitte à modifier ces dernières si les faits d'observation les infirment.

Ceci explique entre autres que les contours de deux cartes géologiques adjacentes levées par des équipes différentes, généralement à plusieurs années de distance, ne se raccordent pas toujours parfaitement, ou que l'âge d'un terrain change d'une carte à l'autre... L'utilisateur peut être surpris, mais il doit se souvenir qu'une carte géologique, avec ses qualités mais aussi ses imperfections, est avant tout l'œuvre d'auteurs qui y ont consacré beaucoup de temps et d'énergie, tant physique qu'intellectuelle.

D.R.



Exemple de deux éditions successives d'une carte géologique à 1/50 000 : Montpellier n° 990.

1 : chevauchements. 2 : klippe (éléments structuraux non représentés sur la 1^{ère} édition).

Dossier

La numérisation de la carte géologique : nécessité et conséquences

En France, la numérisation des cartes a été synchrone de l'acquisition des images satellitaires, de la banalisation de l'informatique dans le dessin industriel et des perfectionnements du traitement des signaux géophysiques (sismique, gravimétrie, etc.). Ce sont ces domaines

qui permirent la transposition de leurs techniques au dessin manuel et à l'art graphique. Si cette évolution a été plus précoce de quelques années dans le domaine de la carte topographique et de la télédétection, elle s'est implantée au BRGM dès 1984 pour la numérisation des éléments de la carte à 1/50 000. Elle en a réduit les délais d'impression grâce à la rapidité des corrections et des mises à jour, à la confection simplifiée des films d'impression off-

set et à un archivage durable. En outre, la numérisation de la carte géologique a permis ses thématiques immédiates et son couplage aisé à d'autres données numérisées. Grâce à cet investissement et à la formation des équipes de dessinateurs du BRGM, la productivité du service a pu quadrupler en moins de cinq ans et ouvrir aux concepteurs comme aux utilisateurs de la carte des perspectives jusqu'alors refoulées.

LA DIMENSION DES NOTICES

Parallèlement aux progrès dans la réalisation de la carte à tous les niveaux, la notice a elle aussi bien changé. Sans retourner jusqu'à la « préhistoire » avec celles qui occupaient les bordures de la carte elle-même, depuis les années 1970-80, leur évolution est spectaculaire. Les exemples sont faciles à trouver. La notice de la belle carte Fréjus - Cannes 1e éd. (1966) ne comportait que 16 pages, bien réparties entre une courte introduction, la description des terrains affleurants et (déjà) celle des dépôts marins actuels, 3 pages présentant la tectonique, et une courte bibliographie. Trois auteurs seulement s'étaient partagé le travail.

Les 12 auteurs de l'édition 1994 proposent plus de 10 pages de bibliographie, dans un livret de 187 pages bien denses. L'avant-propos signale les « nouveautés » : les contours géologiques n'ont (relativement) pas trop évolué, mais leur attribution, leur interprétation sont parfois nouvelles. La description des terrains s'est étoffée, quelques diagrammes pétrologiques y apparaissent, avec des dessins d'affleurements, cartes, coupes, schémas : en tout 26 figures. Les résultats de la radiochronologie bousculent parfois les idées reçues : l'estérellite, permienne depuis 60 ans, rajeunit en retrouvant l'âge tertiaire proposé en 1912 par A. Michel-Lévy. Des rubriques nouvelles apparaissent : le chapitre « Ressources du sol et exploitations », quelques itinéraires d'excursions géologiques actualisés, des annexes géochronologiques, paléontologiques, une rubrique sismicité, des analyses chimiques, gîtes et indices minéraux... L'« histoire géologique simplifiée », en 3 pages, est une aide appréciable aux étudiants pressés par le temps qui leur est imparti pour interpréter la carte.

La carte Laruns-Somport vient d'être publiée en 2004. Le résumé est traduit en anglais, et en espagnol (frontière oblige), la dynamique des dépôts sédimentaires donne un éclairage moderne aux descriptions de terrains, 40 pages techniques présentent les synthèses géodynamiques, tectonométamorphiques, volcanologiques (Ossau). Les préoccupations modernes apparaissent avec des éléments de géotechnique, géologie de l'environnement, risques naturels. Vingt huit figures (cartes, dessins, coupes dont une planche en couleurs, diagrammes...) étayent le texte. Les 198 pages de cette notice constituent un outil de travail et une source de renseignements sans pareils pour randonneurs curieux (un peu initiés), étudiants en géologie, professeurs des lycées et collèges locaux, professionnels de la géologie (hydrogéologie, travaux publics...).

Les notices des superbes cartes au 1/250 000 ne sont pas en reste : elles couvrent des domaines plus vastes, nécessitant des synthèses à une autre échelle. En 1980, la carte de Marseille, avec ses 88 pages, son résumé de l'histoire géologique, et ses 9 figures constituait un excellent document de travail, une aide précieuse pour étudiants et enseignants.

Avec la notice de Montpellier au 1/250 000, publiée en fin 2003, c'est une petite encyclopédie régionale de 164 pages, que l'on découvre. Il est vrai que la carte couvre une région particulièrement passionnante et complexe qui montre la quasi-totalité de l'échelle stratigraphique et une large gamme de formations métamorphiques et magmatiques. La lecture est grandement facilitée par les 49 figures hors-texte, rassemblées dans un volume annexe en couleurs. Et le tout est encore facilement transportable, et utilisable à la ville et sur le terrain.

Les notices des cartes géologiques, surtout celles des cartes au 1/250 000, sont devenues des monographies complètes, incontournables, et passionnantes. Certes, le temps nécessaire à la lecture a aussi augmenté considérablement, mais il est probable qu'une notice plus brève ne pourrait pas rendre compte des progrès liés à la qualité du dessin de la carte et à la diversité des renseignements intégrés.

N.S.

Cependant, il y a près d'une quinzaine d'années, la masse et le coût des ordinateurs nécessaires à cette cartographie numérique s'opposaient à leur dissémination sur le terrain. Durant cette période et en dépit de nombreuses tentatives de « carnets électroniques » portables, le dessin de la carte est resté confiné aux bureaux bien équipés en tables à digitaliser et en écrans permettant d'afficher toutes les données nécessaires à la conception d'un contour. Au début des années 1990, c'est l'apparition d'ordinateurs portables et puissants qui a permis la numérisation sur le terrain, même si elle s'effectuait encore dans la voiture, sous la tente ou dans la chambre. Mais cela ne durera guère avec l'apparition de nouvelles générations d'ordinateurs de poche couplés au GPS.

Faut-il pour autant regretter le temps des carnets de terrain constellés de dessins et de coupes ? Cette tendance au « tout numérique » n'est-elle seulement qu'un effet de mode ? Il serait vain de cultiver cette soit disant opposition. En effet, avec un portable, le géologue dispose aujourd'hui sur le terrain de toutes les données et de tous les outils auxquels il ne pouvait accéder qu'au bureau et dans un contexte de cloisonnement préjudiciable à son efficacité. En outre, en terrain difficile d'accès, seul le carnet permet de consigner ses observations. Les méthodes sont complémentaires.

Évidemment, l'usage de ces outils suppose une maîtrise des logiciels et un souci de l'archivage qui ne s'imposaient pas nécessairement au géologue seulement doté de sa mémoire, de ses crayons et de son carnet. En effet, en lieu et place de quelques objets (une carte, sa légende et sa notice), la numérisation a pour effet premier la création d'une pléthore de fichiers (plusieurs dizaines) qui doivent être nommés et gérés dans des dossiers pour permettre leur utilisation ultérieure. Cependant, en cartographie géologique, les avantages procurés par l'ordinateur compensent largement ces contraintes d'utilisation. En effet, le raisonnement géométrique du cartographe est facilité, amplifié par ces outils numériques et pour peu que son exigence critique soit poussée, ses propositions structurales et paléogéographiques sont mieux argu-

mentées. À ce titre, les avantages les plus significatifs sont rapidement recensés :

- combinaison visuelle instantanée des données par superposition de calques en nombre illimité ;
- élévation de la carte en 3D ;
- modélisation rapide sur des coupes des effets de certaines hypothèses géométriques conçues sur la carte ;
- production de maquettes soignées (étiquetage, couleurs, figurés, etc.) ;
- positionnement et interactions (union, intersection, etc.) des objets dans la rédaction de la carte par l'auteur ;
- introduction aisée de la donnée quantitative par la gestion de grilles de variables (MNT, isopaques, etc.) ;
- interactions entre ces grilles et les objets de la carte (polygones, lignes et points).

Il est manifeste que la maîtrise d'une puissance décuplée offerte par la numérisation engendre des contreparties parfois inattendues pour le géologue qui entend se l'approprier. En confiant au disque d'un ordinateur une grande partie de ses connaissances, il expose ses acquis à une perte accidentelle qu'il doit prévenir par un archivage méticuleux des sauvegardes de ses données. Nous avons tous subi les conséquences désolantes d'un ordinateur, volé, en panne ou privé de courant. S'ils ne sont pas prévus, la répétition de ces avatars peut conduire certains collègues à un stress durable, voire à des dépressions. Heureusement, tout géologue sait bien que le report de ses carnets dans des archives fait partie du métier et qu'il est inévitable d'en effectuer la transposition au domaine numérique.

Bien que nous manquions de recul pour en percevoir l'éventuelle perversité, le transfert de ses connaissances sur un disque pourrait nuire à la synthèse du géologue cartographe par amoindrissement de son imagination libérée via le dessin sur un carnet. A supposer qu'elle soit avérée, cette supputation pessimiste serait heureusement compensée par la libération de son sens critique : celui-ci peut s'exercer sur les multiples variantes de ses hypothèses que l'ordinateur lui offre par de simples changements de variables en fonction des arguments avancés par ses contradicteurs.

La dynamique de ce développement informatique a engendré une pléthore de logiciels dénommés SIG (système d'information géographique) et de structures de données (modèles conceptuels) ainsi qu'une véritable guerre commerciale des formats (chaque vendeur de SIG prétend disposer des formats les plus compacts

et les plus adaptés aux différents types de données). Hélas, les utilisateurs ont dû subir et subissent encore cette étape qui ne pouvait être évitée. Heureusement, cette tension préjudiciable s'amenuise car les concepteurs de logiciels les plus avisés offrent systématiquement des convertisseurs de formats et les utilisateurs s'organisent au plan international pour mettre au point des normes que les industriels du logiciel prennent en compte. Cependant, cette évolution est lente et ne peut être améliorée que par une coopération renforcée entre les protagonistes pour définir des modèles de données «interopérables» comme le propose l'OGC (Open Gis Consortium). Si on se réfère à l'expérience française en la matière, la norme EDI-GEO née il y a une vingtaine d'années est encore loin d'être appliquée bien qu'elle soit en cours de transposition au sein de l'Europe. L'optimisme en la matière doit donc être mesuré et les conversions entre formats seront encore, pour quelques années, une contrainte nécessaire avec toutes leurs conséquences dans la mise à jour des archives et surtout la fluidité des échanges de données.

L'enseignement de ces techniques aux géologues ne s'est imposé qu'avec un certain retard et le plus souvent en fin de cycle supérieur, voire dans les entreprises pendant les premières années du métier. Il faut remarquer que ce sont les géographes utilisateurs de l'imagerie satellitaire qui ont été les pionniers en la matière et que, de ce fait, ils en ont supporté les efforts didactiques. La communauté géologique a donc bénéficié de cet acquis et a pu ainsi se focaliser davantage sur les méthodes d'utilisation. Dans cette évolution et compte tenu des masses d'information quantitative qu'ils manipulent, il n'est pas surprenant qu'au sein du Service Géologique National, ce soient les géophysiciens, les géochimistes et les géologues télédéTECTEURS qui aient popularisé ces techniques auprès des géologues cartographes qui n'exerçaient leurs dons de dessinateur qu'en aval de leur production.

Aujourd'hui, l'élan numérique est donné et les matériels en progression constante. Les anciens géologues assimilent tant bien que mal la pratique de ces outils notamment la prise en compte des systèmes de projection dont l'ignorance est la première source d'erreur de positionnement de leurs observations. Parfois, grâce à la puissance des SIG, leurs jeunes virtuoses tirent plus rapidement partie des connaissances accumulées et peu utilisées par leurs prédécesseurs pendant plusieurs décennies de travaux. Ainsi par la numérisation des références bibliographiques

et leur partage sur Internet, la diffusion des connaissances est favorisée à tel point que certaines bibliothèques proposent aujourd'hui un accès à leurs fonds grâce à la gestion des emprises de cartes qu'elles soient régulières ou locales quand ce n'est pas à la carte elle-même (Infoterre).

P.L.

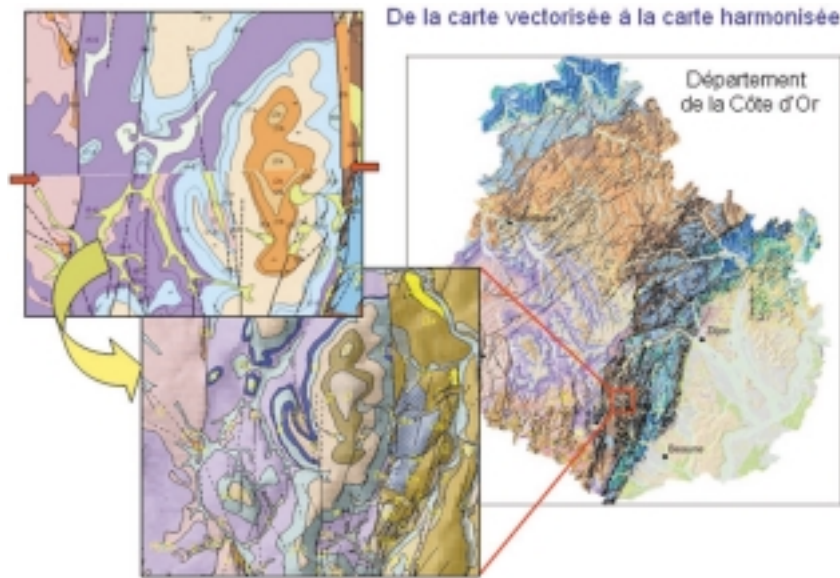
Objectif harmonisation géologique

Pour être exploitables, les données d'un programme de cartographie doivent être harmonisées et partager un même « référentiel » géologique (légende commune, lexiques, base géographique etc.).

Les 1 060 cartes du programme de la carte géologique de la France à 1/50 000 sont autant de « cartes d'auteur » réalisées depuis des décennies par des géologues très différents en formation, culture, âge et sensibilité, utilisant des concepts qui ont évolué au cours de cette longue période d'acquisition. La grande disparité de ces cartes, dont les contacts ne se rejoignent pas toujours d'une carte à l'autre, traduit des divergences scientifiques (portant par exemple sur la définition d'une formation). Elle reflète aussi des choix de représentation cartographique différents (regroupement d'unités géologiques ou au contraire cartographie de plusieurs membres au sein d'une même formation).

L'objectif est d'établir des cartes cohérentes présentant une information cartographique continue à l'échelle du territoire, à partir des données validées utilisant des terminologies communes (lexiques). Cette réévaluation scientifique, actuellement effectuée suivant un découpage départemental (une dizaine de feuilles à chaque fois), est conduite en parallèle à la réalisation de synthèses cartographiques à l'échelle du 1/250 000 (échelle des régions naturelles). Ce travail considérable d'analyse et de synthèse intègre, bien entendu, l'état actuel de la connaissance géologique (concepts scientifiques, connaissances issues de projets appliqués et finalisés) et les apports les plus récents des techniques numériques (base de données, numérisation des cartes...). Cette harmonisation des cartes géologiques intègre également les informations fournies par les forages de la Banque de données du sous-sol (BSS) et les données sismiques disponibles dans le domaine public. Dans cette optique les forages de la BSS font aussi l'objet d'une validation, accompagnée d'une harmonisation des méthodes de description et d'interprétation.

Dossier



Ces travaux d'harmonisation sont analysés puis entérinés par le Comité de la carte géologique de France, instance réunissant des représentants des services de l'État, des universités, et des établissements publics scientifiques.

La numérisation des données

Si le papier demeure un support privilégié de diffusion, la numérisation puis l'harmonisation des données de la carte géologique de France et de la BSS rassemblées au sein d'un référentiel unique de la géologie de la France ouvrent aujourd'hui des perspectives très larges d'utilisation pour les élus, les aménageurs, les bureaux d'étude, les enseignants, et les particuliers.

Aujourd'hui le transfert en numérique de l'ensemble de l'information géologique capitalisée sur les cartes géologiques à 1/50 000 déjà publiées est entièrement achevé. Dans un premier temps, il s'agit d'une reproduction à l'identique des cartes géologiques à 1/50 000. Les fichiers informatiques contiennent la description de l'ensemble des « objets » figurés sur la carte géologique répartis dans 5 « couches » numériques : formations géologiques (auxquelles est associé le descriptif de la légende), contours géologiques, éléments structuraux linéaires (failles, chevauchements...), éléments ponctuels divers (carrières, site fossilifères...) et éléments ponctuels structuraux (indications de pendages, de schistosité, linéations...). L'ensemble de l'information collectée est stocké dans une

banque de données géographique qui permet ensuite par des requêtes la sélection de cartes géologiques entières ou d'éléments cartographiques répartis sur un ensemble de cartes correspondant à une aire géographique donnée.

Dans un deuxième temps, il est prévu de numériser le contenu des notices des cartes géologiques pour ensuite « attacher » la description géologique aux différents objets figurés sur la carte.

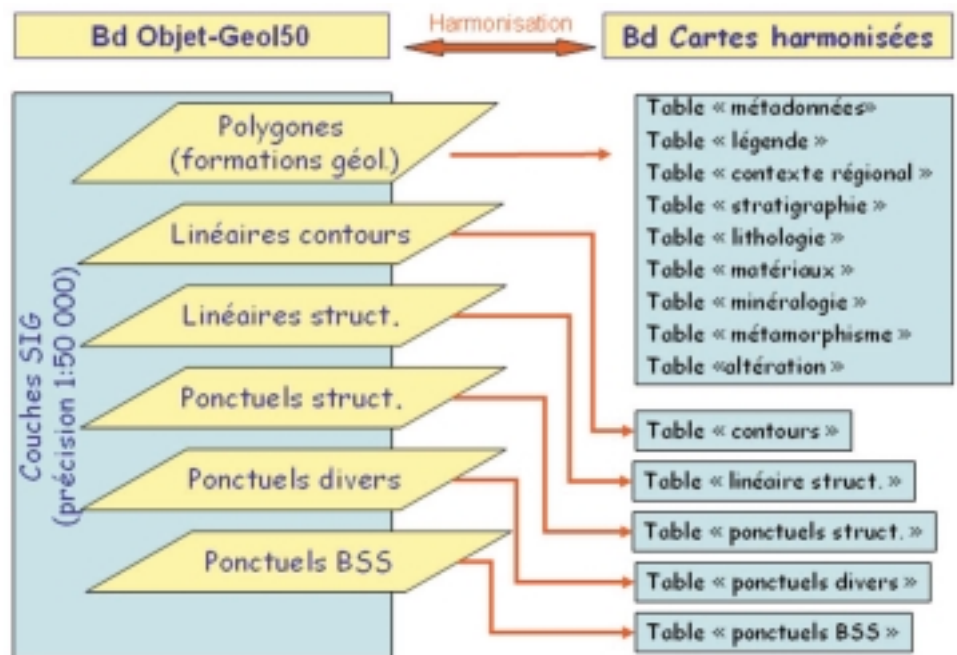
L'information sur mesure : « la carte à la carte »

Il y a une demande croissante des collectivités territoriales ou des services déconcentrés de l'État, qui utilisent les cartes harmonisées comme supports de Systèmes d'Information Géographique (SIG), dans leurs politiques d'aménagement du territoire ou de gestion de l'environnement. Les possibilités d'exploitation de la carte géologique numérique sont multiples.

Il n'est pas exagéré de parler de « carte à la carte », l'utilisateur pouvant en effet l'exploiter strictement en fonction de ses besoins : en définissant lui-même la zone considérée, en procédant à la sélection et à l'extraction des données spécifiques qui l'intéressent. Cette exploitation personnalisée des données, par leur croisement, leur combinaison - et avec de logiciels spécialisés - permet à l'opérateur de produire lui-même de l'information nouvelle adaptée à ses besoins.

D.J., F.H., P.N., D.V., D.B.

La vectorisation et l'harmonisation des cartes géologiques ; les bases de données associées. Le tableau montre comment, aux données ponctuelles de la carte-papier (polygones des différents terrains, lignes des contacts normaux et anormaux, points des gisements fossilifères, des carrières etc.) la carte vectorisée associe des données complémentaires (les « attributs ») codifiées ou rédigées (sur tableur) par le géologue et classées dans différentes tables. Les trois cartes montrent comment on passe ensuite de la carte vectorisée à la carte harmonisée, avec l'exemple de l'harmonisation entre deux feuilles à 1/50 000 de la Côte-d'Or.



La fabrication

Les techniques d'impression

L'impression de la carte géologique doit tenir compte des souhaits de l'auteur et de ceux des utilisateurs tout en respectant les règles de la rédaction cartographique.

Depuis les années 1970, l'évolution des techniques d'impression s'effectue à une vitesse prodigieuse. Elle apparaît sans limite. Par exemple, les presses d'impression sont passées de la monocouleur à une capacité de 5 à 10 couleurs en un seul passage papier.

Les cartes géologiques sont imprimées sur des presses 5 couleurs (cyan, jaune, magenta, noir et nuance au choix), plus faciles à calibrer que les presses dix couleurs. Le choix des supports (papiers plastifiés indéchirables), des encres et le contrôle qualité de toutes les phases d'impression sont des facteurs importants de garantie du produit final.

Jusqu'à la fin des années 1990, la gamme couleur utilisée pour l'impression des cartes géologiques comprenait 12 couleurs avec 5 pourcentages possibles, obligeant à 13 ou 14 passages pour imprimer une carte.

Depuis les années 2000, la gamme couleur a été ramenée à 4 couleurs avec 20 pourcentages différents, permettant une impression en seulement 5 passages. Auparavant l'association de deux couleurs (jaune+magenta) offrait 25 nuances, aujourd'hui cette même association permet 400 nuances différentes.

De plus, aujourd'hui, le transfert des données cartographiques numériques est effectué en format EPS (Encapsuled Postscript) sécurisé et, après traitement, copié directement sur plaque offset par procédé CtP (Computer to Plate) en garantissant la conformité des données d'origine. Autrement dit, entre 2003 et 2005, on a assisté à la disparition complète de la phase photomécanique (films transparents pour chaque couleur). De la même façon, les épreuves d'essai couleur numérique sont réalisées dans la journée...

En 2004, la grande nouveauté fut l'introduction de la « trame aléatoire ». En impression offset, la densité des couleurs est produite par des densités de trames (lignes ou points) différentes. En trame aléatoire, la trame est gérée numériquement pour chaque nuance. Cette évolution permet de donner la sensation d'un ton direct (voisin d'un

« à plat » de couleur). En plus d'une qualité visuelle meilleure pour les cartes nouvelles, cette technique permet de réimprimer les cartes anciennes épuisées avec un rendu extraordinaire.

Données techniques fondamentales pour l'impression des cartes géologiques :

- papier : utilisation d'un papier spécial renforcé de fibres textiles durables et biodégradables ;
- encres : emploi d'encres minérales à haute résistance à la lumière ;
- gamme couleur : création d'une gamme couleur spéciale (4 couleurs, 400 nuances)
- impression : presses d'impression de dernière génération avec deux formats standards de papier (70 x 100) et (120 x 60 cm) et équipées de 5 groupes (cylindres d'impression) ;
- logiciels Pré-Press : logiciels permettant de traiter les données cartographiques et surtout intégrant l'utilisation de la trame aléatoire ;
- contrôle qualité : toutes les phases d'impression sont sous contrôle qualité ; le BRGM et toutes les sociétés associées à l'impression sont certifiées ISO 9001.

J.-M.P

Points de vue d'acteurs et d'utilisateurs

La carte géologique pour quels besoins ?

La caractérisation de la nature, de l'âge, de la structure et de l'histoire des roches affleurant à la surface de la Terre est un objectif fondamental de la connaissance de notre environnement naturel. C'est à ce besoin que répond, au premier ordre, la carte géologique, et ce quelle que soit son échelle. C'est le système le plus abouti de représentation de l'information géologique en tout point de la surface (et/ou de la sub-surface) terrestre. La carte géologique est en effet une base de données, validée scientifiquement, mise à la disposition de toute la communauté scientifique s'intéressant, d'une part, à la planète Terre et, d'autre part, à l'évolution de l'environnement terrestre. Ainsi, la qualité des modèles tridimensionnels de l'extension en profondeur des objets et des structures géologiques dépend, pour une part significative, de la qualité de l'information acquise en surface du modèle géologique 3-D, c'est-à-dire de la qualité de la carte géologique.

Cette base de données répond également aux besoins exprimés par tous les acteurs (scientifiques, industriels, décideurs publics ou privés) impliqués dans la gestion, l'aménagement et la protection des milieux et des ressources naturels. La connaissance de la nature, de l'âge et de l'architecture des terrains affleurant à la surface de la Terre est en effet un préalable indispensable à :

- la découverte et la gestion des ressources naturelles et énergétiques (eau, hydrocarbures, gaz, géothermie, métaux de base et métaux précieux, gemmes ...) ;
- la gestion et la prévention des aléas et risques géologiques (aléas gravitaires, sismiques, volcaniques, tsunamis, cavités géologiques ...) ;
- l'aménagement et la gestion du territoire (réseaux routiers, plans d'occupation des sols, grands ouvrages ...) ;
- la protection des environnements dans le cadre d'un développement durable.

Au delà de la base de données, la carte géologique est également un modèle de la connaissance géologique. C'est pourquoi

elle est datée et signée. En effet, des choix sont faits par les auteurs de la carte pour interpréter des affleurements discontinus et des lacunes d'information, pour hiérarchiser la représentation de l'information géologique ou bien pour mettre en lumière une donnée, ponctuelle à l'échelle du volume cartographié, mais lourde de sens du point de vue scientifique. Ces choix expriment, d'une part, le degré de connaissance et, d'autre part, les concepts scientifiques prédominants à une époque donnée. La carte géologique, dans la mesure où elle est un modèle de représentation des données géologiques de surface et où elle reflète l'état de la connaissance sur les processus géologiques, est alors un instrument indispensable aux enseignants et formateurs en Sciences de la Terre. Elle est un des meilleurs vecteurs de la transmission de la connaissance géologique et de la formation aux géosciences.

Enfin et de la même façon qu'une base de données est toujours évolutive tant du point de vue quantitatif (ajout de nouvelles informations) que

Dossier

qualitatif (réflexion et discussion sur la qualité et la signification de la donnée acquise), la carte géologique n'est pas un produit fini, mais au contraire un outil de représentation évolutif. Ce produit doit en permanence être réactualisé sous peine d'offrir aux différents utilisateurs (scientifiques, industriels, enseignants, politiques ...) des données obsolètes et donc particulièrement dangereuses pour toute prise de décision concernant les environnements naturels.

Jean-Marc LARDEAUX
Président du Comité
de la Carte Géologique de la France

Place de la carte dans l'enseignement universitaire : quelques réflexions

L'étude de la carte géologique a été longtemps considérée, et l'est encore par beaucoup, comme une des composantes essentielles de l'enseignement des Sciences de la Terre. Hélas, la majorité des enseignants déplore le faible niveau des étudiants en cartographie qui se traduit par leur incapacité à dessiner une coupe géologique simple de façon réaliste. La peur qu'inspire la carte géologique aux étudiants s'exprime entre autres par le fait qu'elle est très peu utilisée lors des épreuves orales des concours d'enseignement, sinon à usage d'ornement. Ayant tous deux enseigné la cartographie pendant de nombreuses années, nous allons essayer de montrer ce qui, à notre avis, explique une telle crainte et nous interroger sur la place que doit occuper la carte géologique dans les divers enseignements des Sciences de la Terre.

Le passé

Dans les années soixante, l'enseignement des Sciences de la Terre accordait une très large place à la carte géologique. D'abord on étudiait de façon détaillée la carte topographique (les hachures de triste mémoire de la carte au 1/80 000, remplacées heureusement rapidement par les courbes de niveau à 1/50 000...), ce qui sensibilisait aux formes du relief. Puis on abordait la réalisation des coupes géologiques par une méthode qu'on peut résumer de la façon suivante : toute surface plissée devrait être représentée par une courbe dans le plan de coupe, mais il est plus simple dans un premier temps de construire à la place de cette courbe une succession de segments de droite. Ceci permet en particulier une analyse fine des variations de pendage au sein des couches. On y associe étroitement l'analyse géométrique de l'intersection

des surfaces géologiques et de la topographie, qui apporte également des informations sur la géométrie de ces surfaces (limites de couches, contacts tectoniques) et sur les valeurs des pendages. Un deuxième exercice était l'analyse de la carte par le biais du schéma structural. Ce dernier, qui est une représentation simplifiée de la carte géologique grâce à des regroupements judicieux de terrains, n'était d'ailleurs pas régi par des règles codifiées. Tout cela nécessitait évidemment un long apprentissage ! A l'époque, cela ne posait guère de problème puisqu'un temps considérable était consacré aux TP de cartographie à chaque niveau des divers cursus, avec d'ailleurs souvent des répétitions... On imagine sans peine qu'après avoir réalisé au bas mot une cinquantaine de coupes géologiques l'étudiant en fin de parcours avait acquis une compétence certaine ; pour jouer du piano, il faut commencer par étudier le solfège !

Le présent

La situation actuelle est complètement différente. En effet, à partir des années soixante-dix, le corpus à acquérir en Sciences de la Terre a littéralement explosé. Chaque discipline s'est considérablement diversifiée, des domaines nouveaux sont apparus, d'autres, peu enseignés auparavant, comme par exemple la géochimie, ont pris une place très importante dans l'enseignement. Les horaires n'étant pas extensibles, cette expansion s'est faite évidemment au détriment des matières déjà présentes, comme la pétrologie, la paléontologie, et bien entendu la cartographie. De plus dans la filière de formation des Maîtres, compte tenu de l'inflation parallèle des connaissances en Sciences de la Vie, il s'est instauré une compétition entre biologistes et géologues pour récupérer le maximum de temps d'enseignement, compétition dont les géologues ne sont pas sortis victorieux...

Or, si nous nous limitons au domaine de la cartographie, il est évident qu'en dessous d'un certain volume horaire, il n'est pas possible à l'étudiant de maîtriser les techniques de base. Et ce d'autant plus que l'étude des cartes topographiques, avec son corollaire, la réalisation de profils topographiques a été sacrifiée en premier par manque de temps ; or c'est un préalable incontournable, permettant aux étudiants d'acquérir une perception du relief qui leur fait en général cruellement défaut. Il ne faut donc pas s'étonner du faible niveau des étudiants en cartographie ! Remarquons que si nous interrogeons nos collègues enseignant d'autres disciplines, quelles qu'elles soient (géophysique, géochimie, sédimentologie, etc...) nous entendons la même antienne ; tous se plaignent de ne pas disposer d'un temps d'enseignement suffisant ! Il est évident que le saucissonnage en

fines rondelles du corpus des connaissances en espérant que chacun, enseignant ou enseigné, y trouvera son compte est une illusion. Le saupoudrage n'étant pas une solution, alors que faut-il faire ?

Des solutions pour l'avenir ?

Si on continue à penser, et c'est notre cas, que la maîtrise de la carte géologique est une compétence indispensable pour tout futur géologue, alors il faut consacrer à son étude le temps nécessaire. Cependant, la situation se présente de façon différente suivant qu'on s'adresse à des étudiants engagés dans les filières qui les conduiront au métier de géologue au sens large (recherche fondamentale ou appliquée) ou aux futurs Maîtres :

- pour les premiers, *l'étude approfondie de la cartographie sous toutes ses formes est indispensable* ; topographie, techniques de base de la réalisation des coupes géologiques, équilibrage des coupes. Pour réaliser cette dernière opération, il faut également savoir utiliser les données de forage et de géophysique. Si on ajoute à cela l'analyse de la carte grâce au schéma structural et la représentation de lignes ou de plans à l'aide des projections stéréographiques, on conçoit aisément que la cartographie à elle seule nécessite un enseignement spécifique avec un volume horaire conséquent.
- pour les seconds, si on est en droit d'attendre d'un futur professeur qu'il soit en mesure d'utiliser une carte géologique, en revanche il ne nous paraît pas possible de dégager au cours de sa formation le volume horaire nécessaire pour l'apprentissage de la coupe. On pourrait penser pouvoir se contenter d'une initiation au dessin des coupes dites « à main levée » ; c'est une erreur. En effet, pour exécuter une bonne coupe à main levée, il faut d'abord être capable de réaliser correctement une coupe classique ! Pour l'utilisation qu'il fera de la carte géologique (en particulier la préparation d'excursions géologiques pour ses élèves), le futur maître *doit d'abord être en mesure de reconstituer l'histoire qu'elle raconte*. Dans ce but *apprendre à réaliser un schéma structural doit être une priorité*. En effet, l'élaboration d'un schéma structural impose un « démontage » de la carte suivant des règles précises, à la fois géométriques et chronologiques ; cet exercice est à notre avis la meilleure initiation qui soit à la compréhension de la carte géologique. Quant à la place qu'on peut accorder à la coupe géologique, notre expérience nous a montré qu'il était plus profitable de *faire raisonner l'étudiant sur une coupe existante* (calendrier des phases tectoniques, style de la déformation, passages de faciès, etc...), que de l'obliger à construire une coupe avec un résultat qui en général le décourage.

Donc, qu'il s'agisse des étudiants spécialisés ou des futurs maîtres, on retrouvera l'acquisition d'une compétence commune, la réalisation du schéma structural. Les cartes géologiques françaises à 1/50 000 offrent des possibilités très variées dans ce domaine. Il faut à ce sujet saluer l'initiative du BRGM, qui a sélectionné et mis en valeur certaines cartes présentant un grand intérêt pédagogique (voir *Géochronique* n° 90, Juin 2004). Mais nous émettons cependant une réserve à propos de la publication des nouvelles cartes à 1/50 000 : l'augmentation constante du volume des notices (parfois plus de cent pages), certes justifiée par l'abondance des données recueillies sur le terrain et en laboratoire, rend malheureusement difficile leur exploitation rapide pour l'élaboration d'un schéma structural. L'étude des cartes à 1/250 000 est également très fructueuse ; pour ces dernières, nous souhaitons vivement que la couverture actuelle soit complétée rapidement (la publication récente de la très belle feuille de Montpellier est de bon augure). Quant à la carte au millionième, tous ceux qui l'ont pratiquée savent qu'il s'agit d'un document de premier ordre pour bâtir des raisonnements chronologiques.

Un dernier point nous paraît capital ; la *compréhension de la carte géologique exige le contact avec le terrain*. En effet, c'est en pratiquant soi-même le lever qu'on acquiert rapidement la faculté de se représenter en trois dimensions les structures géologiques dessinées sur la carte. Pour les étudiants spécialisés, en principe le problème ne se pose pas, puisqu'ils participent à des stages de terrain. Mais nous pensons qu'il serait très utile que les futurs professeurs pratiquent également cette activité de lever, ne serait-ce qu'une journée dans des structures simples ; ils apprendraient ainsi à se repérer sur une carte topographique, à visualiser le rapport entre le relief et sa représentation cartographique, à comprendre la signification du dessin d'un contour, à saisir l'importance de la représentation des formations superficielles. Cette initiation devrait à notre avis être un préalable à tout enseignement de cartographie.

D.R., N.S

Des cartes géologiques de France à usage pédagogique

Parmi la demande publique, on constate le besoin croissant d'une information plus pédagogique. Les enseignants sont toujours à la recherche de supports didactiques

pour leurs cours et leurs travaux pratiques. Les amateurs, les associations et même le grand public se montrent de plus en plus friands de guides pratiques pour mieux profiter de leurs excursions et d'explications scientifiques sur les paysages géologiques qui soient intelligibles au plus grand nombre. Pour répondre à cette demande, le BRGM pour sa part réalise cinq types de produits.

Les pages « Cartes géologiques à intérêt pédagogique » du site institutionnel du BRGM (<http://www.brgm.fr/carte50pedago/default.ht>). Ces pages permettent de guider les enseignants du Secondaire dans leur choix des cartes géologiques à 1/50 000 et à 1/250 000, elles tiennent compte des nouveaux programmes SVT (Première et Terminale).

Une sélection de 192 cartes géologiques à 1/50 000 à intérêt pédagogique a été établie sur 3 critères : présence de formations géologiques variées (carte esthétique), d'une coupe géologique en couleur sur sa marge inférieure (approche du 3D), et de plusieurs objets géologiques pédagogiques bien représentés. Grâce au concours de l'Inspection générale de l'Éducation nationale, la sélection initiale des cartes a bénéficié de l'avis des professeurs. Leurs commentaires sur les caractéristiques pédagogiques sont repris dans chacune des fiches descriptives téléchargeables établie pour chaque carte de la sélection. Un moteur de recherche permet de sélectionner des cartes géologiques, par région administrative, et/ou à partir de un ou plusieurs objets géologiques pédagogiques. Ceux-ci se réfèrent à la géologie de base (calcaire, granitoïde, pli, faille...), à la stratigraphie (principes de la chronologie relative, discordance) mais aussi aux thématiques plus ciblées des nouveaux programmes ou d'exemples associés (transgression du Crétacé supérieur, littoral, glaciation et périglaciaire...).

Le site spécialisé EDUTERRE (<http://eduterre.brgm.fr>), réalisé en partenariat avec l'INRP (Institut National de Recherche Pédagogique) permet d'accéder à des bases de données (bases BRGM et bases externes IGN, NASA ...). Il permet aussi d'ajouter des sources d'informations complémentaires depuis des fichiers constitués par l'utilisateur et de disposer d'outils simples de mise en forme et d'analyses de ces sources d'information (outils de production de cartes et d'analyses thématiques). Ce site est en cours de construction.

La carte des Curiosités géologiques de France à 1/1 000 000 (IGN/BRGM). Au recto, des pictogrammes classés en 5 thèmes (géosites, musées, eau, énergies, réserves

naturelles) recensent les principales curiosités géologiques du territoire métropolitain que l'on peut découvrir lors de voyages automobiles ou au cours de randonnées. Au verso, est imprimée la carte géologique de la France à 1/1 000 000 sous une forme simplifiée. Des encarts pédagogiques précisent la répartition des grands types de roches (magmatiques, sédimentaires, métamorphiques) ou rendent accessibles des données moins connues (gravimétrie, magnétisme).

La carte géologique du département du Loiret à 1/125 000. Cette carte dérivée de la carte géologique harmonisée à l'échelle du département du Loiret constitue une carte simplifiée. La carte géologique du Loiret est la première carte de ce type à avoir été éditée, elle est accompagnée d'une notice descriptive simplifiée des formations géologiques. Commandée par le Conseil Général du Loiret, elle a été distribuée dans tous les collèges du département. Au fur et à mesure de l'avancement du programme d'harmonisation des cartes géologiques à 1/50 000 de France (programme Référentiel Géologique de la France), des cartes départementales papier pourront ainsi être produites à la demande. *Les kits pédagogiques*. Un kit pédagogique est constitué d'une mallette comprenant des échantillons, des fiches, des lames minces et un CD-Rom présentant la géologie d'une région. Ce type de produit est réalisé par le géologue régional du BRGM avec la collaboration des professeurs de collèges et de lycées. Le premier kit actuellement disponible est celui de la Guyane, il comporte la seconde édition de la carte géologique de Guyane (1/500 000) avec possibilités de zooms et d'interrogations. Deux autres kits sont en préparation (Réunion, Poitou-Charentes).

B.S., D.J., P.N.

La carte dans l'enseignement secondaire

Pour comprendre les phénomènes géologiques, une représentation des relations spatiales et temporelles des objets est nécessaire : la carte géologique est indispensable à l'enseignement des sciences de la Terre. Selon le niveau, du début du collège à la fin du lycée, les études s'intéressent à des échelles différentes, du local au global : toute la panoplie des documents cartographiques est susceptible de fournir des supports de réflexion. Mais la carte géologique est un document complexe, qui traduit à la fois les observations de terrain et les modèles explicatifs du moment. Son exploitation est de ce fait délicate, et ren-

Dossier

contre des obstacles nombreux : passage du paysage observé à sa représentation en plan, de la description de surface à une compréhension en trois dimensions, multiplicité et abstraction des symboles ...

L'identification des cartes au 1/50 000^e les plus utilisables a été un pas important dans l'aide que l'on peut apporter aux enseignants. Une réflexion sur l'intérêt pédagogique des autres échelles disponibles, notamment le millionième et le 1/250 000^e, serait également justifiée. Mais au-delà, la mise à disposition progressive des versions numérisées ouvre des perspectives nouvelles : superposition de données géoréférencées, visualisation en 3D, traitement quantitatif... L'équipement des établissements scolaires en connexions Internet à haut-débit se généralise rapidement et, à terme, l'accès aux ressources en ligne deviendra dominant.

G.M.

La patrimoine géologique

La première carte géologique est née d'une volonté d'effectuer un inventaire des richesses minéralogiques (= relevant du monde minéral) de la France. Elle est due à Jean-Etienne Guettard qui a présenté une feuille en 1746 et qui entreprend ensuite, aidé par le jeune Lavoisier, un projet pour toute la France. Seules quelques feuilles ont été publiées, notamment la «carte minéralogique des environs de Fontainebleau, Estampes et Dourdan» gravée en 1767.

Deux siècles et demi plus tard, on parle encore d'inventaire national et il s'agit cette fois de celui du patrimoine géologique. En effet, alors qu'elle fut pionnière en la matière, la France se retrouve aujourd'hui lâchée par le peloton des nations qui s'intéressent à leur patrimoine géologique. C'est grâce à la loi de Démocratie de Proximité de février 2002 précisant que la géologie s.l. fait partie de la nature (de façon légale) que cet inventaire va être lancé au tout début 2006. Le patrimoine géologique concerne des objets ex-situ que sont les collections (celles qui restent) et le patrimoine in situ. Celui-ci doit donc être localisé sur une carte et géoréférencé.

Les cartes géologiques sont basées sur la notion d'étages établis à partir de stratotypes. Cette notion ayant été introduite par Alcide d'Orbigny au milieu du 19^e siècle, la France est le berceau de la stratigraphie et a la chance de posséder beaucoup de stratotypes. Ces stratotypes, une quarantaine en France, sont des étalons internationaux dont la représentativité temporelle est parfois limitée (on sait

aujourd'hui qu'une pile de terrains est pleine de «trous» temporels). Il n'en reste pas moins qu'ils conservent une valeur historique indéniable. C'est ce qui explique qu'une collection de livres va leur être consacrée, intitulée Patrimoine géologique national : les stratotypes. Chaque stratotype sera traité dans un volume, destiné au public, afin que celui-ci puisse prendre conscience de son patrimoine et soit conduit à avoir envie de se le réapproprier, de le protéger.

Le patrimoine géologique se niche aussi au cœur des cités car, outre les magnifiques bordures de trottoirs, bien des monuments revêtent des qualités architecturales, artistiques. Leur vieillissement nécessite un entretien ; aussi convient-il de pouvoir les réparer, si possible avec la même pierre que celle d'origine. Et c'est là que l'historien et le géologue se tournent vers la carte géologique pour trouver réponse à leur quête. Témoin du passé de la Terre, la carte

témoigne aussi de l'activité des hommes, en indiquant l'emplacement des mines et carrières.

P. De W.

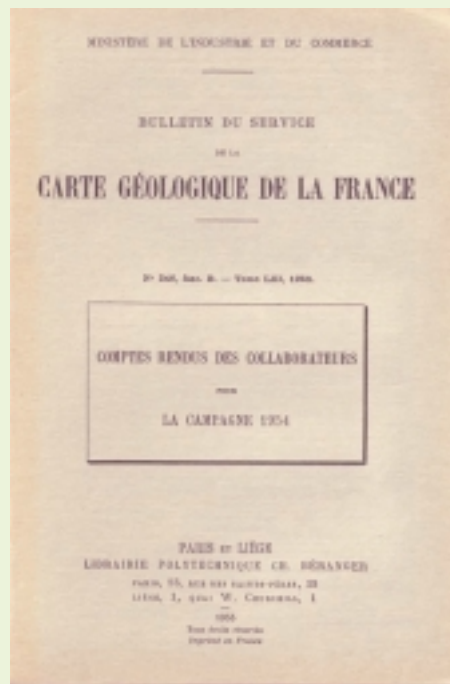
Comment cartographier les bassins sédimentaires ?

Les cartes géologiques sont dans la majorité des pays des cartes lithologiques, c'est-à-dire cartographiant des unités ayant les mêmes caractéristiques physico-chimiques. En géologie sédimentaire, cela se traduit par la cartographie de sédiments ayant été déposés dans un même milieu de sédimentation, c'est-à-dire ayant le même faciès sédimentaire. En France, malheureusement, nous avons connu un chemin différent, cartographiant non des lithologies mais des âges, des intervalles de temps. Ceci est imputable à la culture de notre communauté géologique qui fut très fortement dominée par

ET LE 80 000^e ?

Les premières éditions de la carte géologique furent réalisées sur le support topographique de la carte d'État major. Ce fond topographique, en hachures, est parfois difficile à lire mais il met bien en évidence le relief grâce au contraste entre les zones à relief faible, aux hachures espacées, et les zones à relief accentué, aux hachures plus ou moins serrées.

Les premières éditions de la carte géologique datent de la fin du XIX^e siècle. Elles constituent des documents précieux, en particulier pour les archéologues qui travaillent sur l'origine des matériaux de construction ou de décoration des monuments ou des bâtiments d'une cité. On trouve sur ces premières éditions, en effet, des indications sur de nombreuses petites carrières souvent exploitées depuis le Moyen Âge et aujourd'hui disparues, comblées, oubliées. Ces carrières n'ont pas laissé de traces suffisantes pour que les éditions récentes de la carte géologique les mentionnent. Mais, en partant de la première édition à 1/80 000, des indices de terrain, parfois discrets, permettent d'identifier ces anciennes carrières. Ces cartes étaient accompagnées d'une notice courte. Mais la brièveté de cette notice était largement compensée par des publications de compte-rendus des collaborateurs ou par la publication de mémoires importants dans le Bulletin du service de la carte géologique de la France. Il ne faut donc pas ranger ces cartes dans les rayons des antiquités mais savoir les utiliser comme source bibliographique, en particulier pour l'histoire des sciences et des techniques.



Les «comptes rendus des collaborateurs» étaient une publication où le géologue chargé d'une carte consignait ses observations. Le magazine Géologie de la France lui a succédé.

J.L.

les biostratigraphes : on cartographiait sur la base du contenu paléontologique ! Cette tendance a été rectifiée depuis une dizaine d'années. Nous cartographions désormais des unités lithostratigraphiques, conformément à la nomenclature internationale (Guillocheau et Juigné, 1994) : les formations, subdivisées en membres et regroupées en groupes.

Depuis 1949, et l'invention par Sloss, Krumbain et Dapples du concept d'unité stratigraphique délimité par des discordances (« unconfomity-bounded units »), la stratigraphie a connu une révolution : le concept de séquence de dépôt était né !

Que recouvre cette notion ? Il s'agit de définir des unités stratigraphiques qui enregistrent les variations des deux paramètres contrôlant l'évolution des enveloppes externes de la terre (donc les bassins sédimentaires) : la déformation des plaques lithosphériques et le climat. Les pères fondateurs de la stratigraphie séquentielle (Jervy, 1988 ; Posamentier et al., 1988) ont montré que les mouvements des plaques lithosphériques et le climat contrôlaient indirectement l'enregistrement sédimentaire au travers de trois paramètres, la déformation du substratum du bassin (la tectonique), l'eustatisme et les flux sédimentaires (flux terrigène et flux néoformé dans le bassin : carbonates, évaporites...).

Ces séquences de dépôts enregistrent un cycle d'avancée - recul du littoral, expression de la variation du bilan niveau marin relatif / flux sédimentaire. Ces cycles s'accompagnent de la formation de discontinuités cartographiables comme des érosions continentales (« unconfomity »), des avancées brutales vers la mer des littoraux (« downward shift ») ou des condensations marines généralisées. Ces discontinuités

correspondant à des étapes bien particulières du bilan niveau marin relatif / flux sédimentaire, donc des variations tectoniques et/ou eustatiques. Elles délimitent des paquets de sédiments ayant autant de faciès (donc de lithologies) que de milieux de sédimentation constituant le profil de dépôt du bassin. Deux discontinuités successives séparent donc plusieurs formations, au sens lithostratigraphique du terme, passant latéralement les unes aux autres. Les lignes-temps n'ont aucune expression lithologique particulière puisqu'elles correspondent à la topographie du bassin (le profil de dépôt) à un instant donné. Les séquences de dépôts sont donc des entités pluri-lithologiques séparées par des discontinuités, expression de moments particuliers des variations tectoniques ou eustatiques. Chaque changement de formation, correspondant à une ligne de faciès, traduit un changement de milieu de sédimentation le long du profil de dépôt, c'est-à-dire le long des lignes-temps !

Chang (1975) a proposé d'introduire ces séquences de dépôts comme des entités stratigraphiques cartographiables avalisant les synthèses effectuées par Sloss (1963, 1964) sur le craton nord-américain. Trente ans après était-ce une bonne idée ?

Il faut tout d'abord signaler que les tentatives de cartographie de séquences de dépôts sont peu nombreuses. Un exemple classique est le travail effectué par Mutti et ses collaborateurs en 1988 sur le bassin d'avant-pays sud-pyrénéen où le Paléogène a été cartographié en séquences de dépôts de quelques millions d'années de durée, depuis la plate-forme jusqu'aux systèmes turbiditiques « profonds ». Pourquoi un si faible engouement ? Cartographier des séquences de dépôts suppose de bien

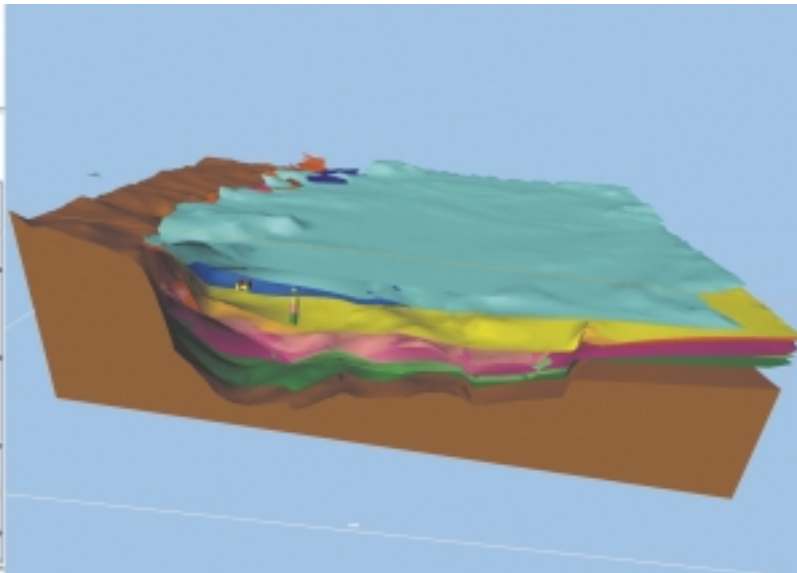
connaître la géométrie des sédiments et, préférentiellement, en 3D. Cela suppose (1) de bonnes conditions d'affleurements et / ou de nombreuses données de subsurfaces (sondages avec diagraphies, sismique de qualité...), (2) un excellent calage temporel (biostratigraphie croisée sur plusieurs groupes, magnétostratigraphie, bentonites datées...) et, en conséquence (3) des études longues, donc coûteuses en salaires...

Faut-il généraliser une cartographie en séquences de dépôts ? Un tel exercice ne peut être qu'une information superposée sur une cartographie lithostratigraphique standard. Comme nous venons de le voir les informations requises pour tracer des séquences de dépôts supposent de nombreuses études pluridisciplinaires, donc des interprétations susceptibles d'être remises en causes. Il faut au maximum coller aux données factuelles : la lithologie ! Se rajoute un travers bien humain, le recours aux modèles prêts-à-penser. L'évolution des idées en stratigraphie montre, ô combien, comment les modes peuvent influencer notre façon d'analyser les sédiments. Du tout tectonique des années 50 et 60 (Sloss, 1963, 1964 ; Sloss et Speed, 1974), nous sommes passés au tout eustatique (Vail et al., 1977 ; Vail, 1992) avant d'arriver à la situation actuelle où nous réalisons que nous avons négligé le flux sédimentaire ! Quoi qu'il en soit, la demande accrue d'informations géométriques 3D à l'échelle des bassins sédimentaires, aussi bien en recherche fondamentale qu'appliquée (géométrie des réservoirs et couvertures), supposera de faire évoluer notre façon de cartographier les bassins sédimentaires, en intégrant une double culture tectonique et sédimentologique forte !

F.G.

Modèle 3D de la Limagne.

Age (Ma)	Réservoirs		
	Séquences	Étages	Séries
23	S4	Chattien	Oligocène sup.
28	S3	Rupélien	Oligocène inf.
34	S2	Priabonien	Éocène sup.
40	S1	Bartonien	Éocène sup.
46		Lutétien	Éocène moyen
<300		Socle	Ante Tertiaire



Dossier

Carte et tectonique : l'équilibrage des coupes géologiques

L'équilibrage des coupes géologiques est une avancée considérable dans la compréhension des structures géologiques complexes comportant des plis, des failles et des chevauchements. Cette méthode permet entre autres une représentation réaliste des zones profondes, en général ignorées sur les coupes classiques. Les précurseurs sont le français J. Goguel et surtout le suisse H. Laubscher à qui on doit la publication de la première coupe équilibrée, située dans le Jura suisse. Depuis, l'équilibrage des coupes s'est considérablement développé sous l'impulsion de la recherche pétrolière, grâce en particulier aux géologues anglo-saxons.

Les principes de l'équilibrage sont simples. Si dans une région donnée on considère le volume global des terrains déformés, on postule que *ce volume est conservé pendant la déformation*. Sur une coupe traversant ce volume déformé, le postulat précédent implique la *conservation des surfaces dans le plan de la coupe*. Cela veut dire que la surface définie sur la coupe d'une part par deux traits-repère à l'origine et à l'extrémité et d'autre part par la base de la couche la plus profonde connue et le sommet de la couche la plus élevée doit rester constante si on supprime la déformation ; cette condition est réalisée s'il n'existe pas de déformation non parallèle au plan de coupe, entraînant une « fuite » latérale de matériel. Par ailleurs, la conservation des surfaces implique la *conservation des longueurs*, en l'occurrence les longueurs des limites de couches avant et après déformation. Une coupe géologique respectant ces conditions de conservation des surfaces et des longueurs est dite *rétrédéformable* ; on peut la « déplier » pour restituer l'état initial

avant la déformation sans que cette opération fasse apparaître des impossibilités géométriques. Par exemple, avant et après dépliage ; (1) la longueur de la base d'une couche plissée comprise entre deux traits-repère doit rester la même ; (2) si l'on prend deux bases de couches situées à des profondeurs différentes dans la série stratigraphique, leurs longueurs respectives mesurées entre deux plans axiaux de plis doivent rester égales entre elles.

Équilibrer une coupe consiste à formuler une suite d'hypothèses tectoniques qui conduiront à augmenter ou diminuer la surface mesurée sur la coupe initiale jusqu'à obtention de surfaces identiques sur la coupe initiale et sur la coupe dépliée, appelée coupe *restaurée* (la surface de la coupe dépliée pouvant être elle-même déterminée de façon indépendante). Cette opération se fait par essais successifs, avec à chaque fois comparaison des surfaces avant et après déformation, d'où l'expression anglaise imagée « *balanced cross-section* ». Il faut bien insister sur le fait qu'une coupe équilibrée ne correspond pas forcément à la réalité ; en revanche, elle ne comporte pas de contradiction géométrique intrinsèque, alors que c'est fréquemment le cas sur une coupe non équilibrée. Notons que sur cette dernière, l'existence d'une telle contradiction ne peut en général être décelée que grâce à une analyse détaillée.

Une coupe peut être équilibrée si certaines conditions sont respectées :

- la construction d'une coupe qu'on désire équilibrer doit être obligatoirement parallèle à la direction régionale de raccourcissement ou d'extension. Il est donc nécessaire de connaître cette direction, qui n'est pas nécessairement perpendiculaire à celle des plis cartographiques ;
- si le domaine structural étudié a subi plusieurs

déformations, l'équilibrage doit être réalisé pour chaque déformation ;

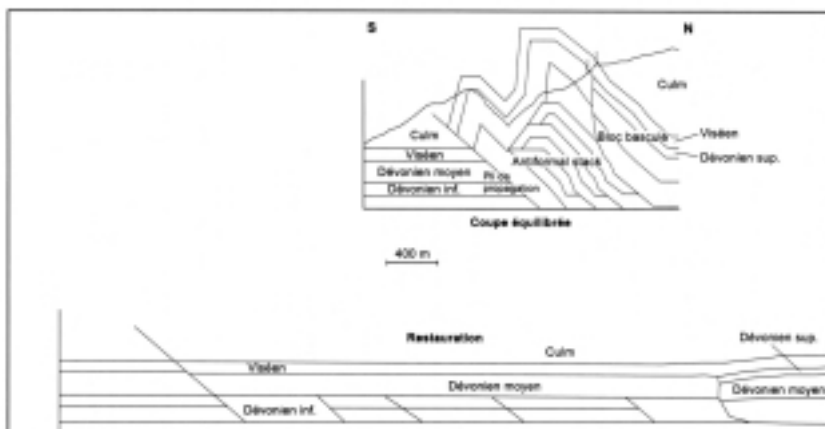
- la formulation d'hypothèses tectoniques permettant l'équilibrage implique des choix sur les modes de déformation. On peut admettre que le raccourcissement (ou l'extension) est dû au jeu d'accidents tectoniques (le raccourcissement dû aux plis étant connu par construction) ; on peut admettre également, en particulier pour les séries incompetentes épaisses, que le raccourcissement (ou l'extension) est dû à la déformation interne de la série (cisaillement couche sur couche). Bien sûr il est possible de combiner les deux modes de déformation.

Il faut souligner que plus on dispose de données contraignant la coupe, meilleur sera l'équilibrage ; en particulier il est indispensable d'avoir le maximum d'informations sur la structure en profondeur grâce aux forages et aux sections sismiques. Par ailleurs, l'équilibrage « à la main » est une opération longue, délicate, et surtout imprécise. Aussi utilise-t-on actuellement des logiciels d'aide à l'équilibrage (comme par ex. LOCACE® développé conjointement par Total CFP, Elf Aquitaine, l'Institut Français du Pétrole, et AGIP).

Peut-on équilibrer les coupes dans tous les domaines structuraux ? On a d'abord privilégié les domaines de la fracturation et du plissement isopaque en considérant que, dans les domaines plus profonds, la déformation intense et surtout non homogène empêchait de contraindre les solutions d'équilibrage de façon suffisante. Cependant rien n'empêche en théorie d'équilibrer des coupes en domaine de plissement anisopaque. D'ailleurs LOCACE le permet, le plus important étant encore une fois de s'imposer des règles (conservation des surfaces, conservation des longueurs et déformation plane). Si une de ces règles n'est pas respectée alors la coupe est fautive. Toutefois on peut déroger à une de ces contraintes si au moins deux d'entre elles sont maintenues ; par exemple dans le cas des couches salifères faisons l'hypothèse que la surface est conservée et que la déformation est plane ; dans ce cas les épaississements exagérés peuvent être acceptés en s'autorisant un degré de liberté, en l'occurrence la longueur des limites de couches. En revanche dans le cas des domaines métamorphiques, trop de paramètres interviennent pour qu'on puisse actuellement proposer des solutions d'équilibrage réalistes.

En tout cas les nouvelles cartes géologiques couvrant des zones déformées devraient proposer en légende des coupes équilibrées (lorsque bien sûr cette opération est pos-

Anticlinal du fort du Portalet. Coupe équilibrée de la « Matüre », d'après A. Daudignon 2002 (feuille Laruns-Somport à 1/50 000 n° 1069).



sible) ; quant à la réédition de cartes plus anciennes, elle doit être l'occasion d'introduire ces coupes ou de réviser les coupes existantes ; en effet, si une coupe rétrodéformable n'est pas obligatoirement juste, une qui ne l'est pas est nécessairement fautive !

En conclusion, l'utilité des coupes équilibrées est d'apporter des représentations des structures géologiques plus complètes et plus vraisemblables que celles des coupes classiques. On est alors en mesure, à partir de ces coupes, de tester des processus mécaniques ou géophysiques complexes sur des géométries sinon réelles, en tout cas moins « géopoétiques » qu'auparavant !

D.R., F.M

Les moyens appliqués pour une approche 3D intégrée : cartographie géologique et structurale du secteur de Bure

En phase de reconnaissance préliminaire, en 1994, l'Andra a tout d'abord précisé la cartographie géologique au 50 000e dans l'environnement du site de Bure selon une bande de terrain d'environ 700 km² depuis Bazincourt au nord du département de la Meuse jusqu'à Saint Blin - Semilly en Haute-Marne. Les nouveaux tracés ainsi établis ont été également raccordés à ceux des feuilles de Bar-le-Duc, Joinville, Doulaincourt et Neufchâteau. Cette approche a nécessité que la cartographie de terrain proprement dite soit couplée à l'utilisation des logs lithostratigraphiques des forages pétroliers disponibles dans la périphérie, améliorant la vision " verticale " de la série sédimentaire. En parallèle, le retraitement et l'interprétation de la sismique pétrolière disponible ont été intégrés aux acquis de terrain et aux logs de forages pour permettre de compléter un processus de modélisation 3D suggérant d'éventuelles incohérences.

Cette première étape des travaux réalisés en Meuse/Haute-Marne a bien évidemment facilité les choix d'implantation des deux premiers forages de reconnaissance géologique qui ont permis de caractériser la couverture sédimentaire entre le Kimméridgien terminal et le Trias évaporitique sur une puissance d'environ 1100 mètres. Les dernières données issues de ces forages ont ensuite complété le modèle 3D - par modeleur gOcad® - en précisant le tracé de certaines surfaces de formation en profondeur et en identifiant plus clairement les quelques incohérences géométriques soupçonnées.

À l'appui de ces constats, une nouvelle phase de cartographie géologique et structurale a été lancée en 2000, pour chercher à revoir ces formes de surfaces-repères, difficilement explicables dans le contexte géologique local. La réduction de ces incertitudes passait en effet nécessairement par la réalisation d'une nouvelle cartographie ciblée sur le secteur de Poissons, tout en cherchant à établir une chronologie possible des différentes phases tectoniques ayant affecté la région entre le Trias et l'Actuel. Ce travail a été réalisé par une équipe de géologues structuralistes, stratigraphes et photo-interpréteurs. Le contexte géographique régional (en particulier l'importance de la couverture végétale) raréfiant les affleurements de bonne qualité pour un lever géologique, la cartographie de terrain pro-

prement dite a été précédée par une analyse détaillée de la topographie en utilisant la photographie aérienne et le MNT. Il s'agissait de détecter les structures géologiques potentielles en recherchant leurs influences sur la géométrie du réseau hydrographique et le modelé du relief.

La recherche systématique des replats et des ruptures de pente, d'origine lithologique ou tectonique, a tenu compte des facteurs qui peuvent altérer le signal, tels que les dépôts de pente (éboulis, colluvions) et les instabilités de versant (glissements en masse). À ce stade, les alignements de talwegs et les anomalies détectées en bordure de côte n'ont été interprétés en termes de structures tectoniques qu'avec circonspection mais ils ont constitué l'un des principaux guides de prospection des failles sur le terrain.

Modèle structural consolidé du secteur de Bure : état des connaissances fin 2003 (document ANDRA). En bleu, les accidents qui n'affectent que la couverture. En brun, ceux qui s'enracinent dans le socle.



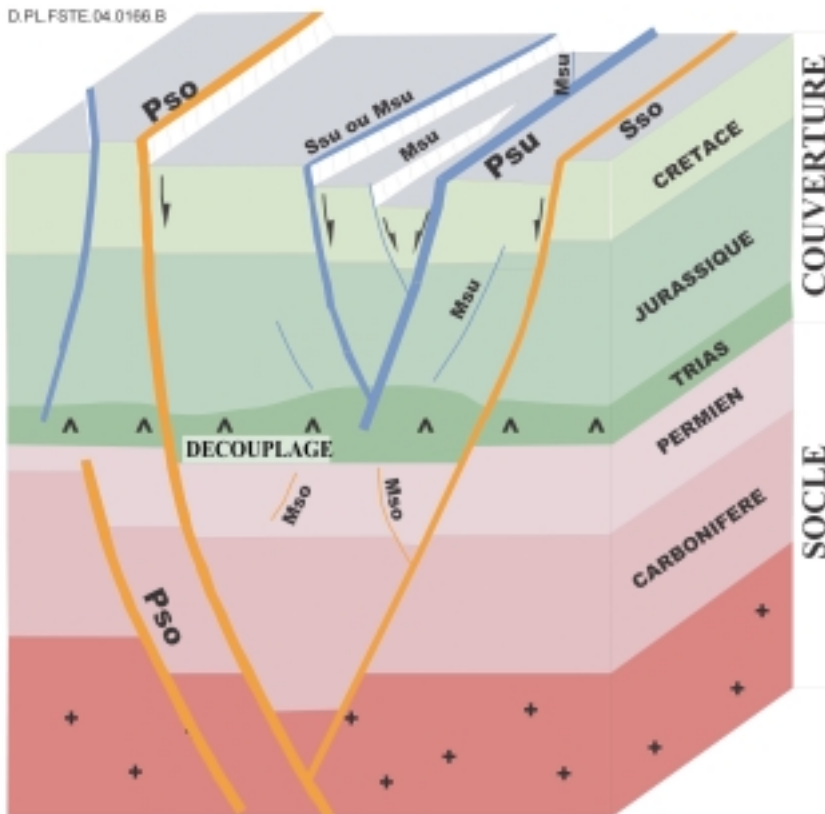
Dossier

À l'appui de cette approche morphologique, la cartographie de surface a été poursuivie selon plusieurs approches complémentaires : une recherche d'indices directs de failles sur le terrain, une analyse microtectonique systématique, une étude lithostratigraphique fine. Enfin, en complément, la constitution de cartes en isohypses, par interpolation entre altitudes des limites de couches pour chacune des principales formations affleurantes, a permis de préciser les inflexions locales ou leurs rapprochements brusques qui sont autant d'indices d'anomalies structurales possibles.

La carte géologique et structurale ainsi mise au point nécessitait une nouvelle fois sa mise en cohérence avec une interprétation globale des profils sismiques disponibles, anciens ou plus récemment acquis et retraités ; c'est ce qui fut fait en 2002 et 2003.

Secteur de Bure : classement absolu des structures selon leur extension cartographique et la profondeur de leur enracinement (document ANDRA)

D.PL.FSTE.04.0166.B



Classement des failles suivant :

l'extension cartographique des objets :

- P (principale) : objet de longueur > 10 km,
- S (secondaire) : objet de longueur comprise entre 1 et 10 km),
- M (mineure) : objet de longueur kilométrique.

l'enracinement en profondeur :

- su (superficiel) : objet non enracinés dans le socle,
- so (socle) : objet enraciné ou uniquement présent dans le socle.

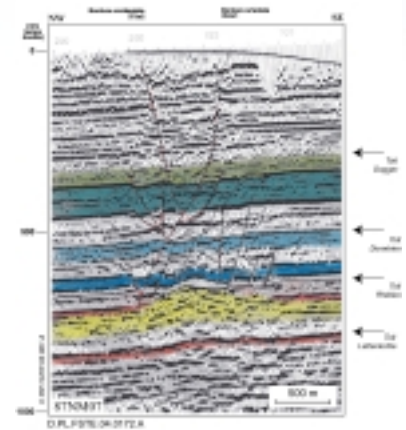
La notation complète est du type : Pso, Sso, Mso, Psu, Ssu, Msu.

Secteur de Bure, fossé de Joinville : rôle de la halite du Keuper dans la tectonique liasique (document ANDRA).

Cette tâche conduite par une équipe constituée de géologues structuralistes spécialistes du Bassin de Paris, renforcée par des interpréteurs géophysiciens experts / spécialistes de ce bassin, a été conduite selon une méthodologie originale prenant en compte l'incertitude à chaque étape d'acquisition et d'interprétation de données. Ses différentes étapes ont été les suivantes :

- Phase 1 : Analyse critique des données cartographiques et identification des incertitudes.

Elle consiste en un inventaire exhaustif de tous les éléments cartographiques et structuraux disponibles, afin d'évaluer le niveau de connaissance atteint sur les caractéristiques



géométriques des failles. Cette approche permet d'identifier, de hiérarchiser et de classer les failles. Ce modèle conceptuel permet de dresser un "catalogue des failles" afin d'identifier chaque segment (figure 1) pour faciliter l'interprétation des profils sismiques et s'assurer que géologues et géophysiciens parlent des mêmes objets structuraux.

- Phase 2 : Interprétation des données sismiques.

Cette phase est scindée en une première étape d'analyse des données et interprétations disponibles, et une seconde, d'interprétation homogène des sections sismiques 2D sur station de travail Landmark®. Les horizons qui ont été pointés au cours de l'interprétation, ont été choisis comme les plus démonstratifs quant à l'évolution géodynamique des failles et nécessaires aux besoins des modélisations 3D.

- Phase 3 : Consolidation du modèle structural de secteur.

La mise en cohérence entre les données cartographiques de surface et la géométrie des failles en profondeur permet d'établir un modèle structural consolidé homogène. Elle conduit à un classement absolu des failles entre elles, d'une part selon leur extension latérale (principale, secondaire, mineure), d'autre part selon les horizons recoupés (socle primaire, couverture sédimentaire superficielle jurassique et crétacée) et leur enracinement en profondeur, découplage d'une structure entre le socle et la couverture, au niveau du Trias, et notamment au niveau des formations salifères (halite du Keuper).

Le modèle structural consolidé, ainsi établi, a conforté la cartographie géologique de surface en confirmant la cohérence géométrique générale. Cette vision géométrique des résultats sous forme de bloc-3D, en utili-

sant le modeleur gOcad®, agit par ailleurs comme un révélateur d'incohérences ponctuelles ou d'incertitudes résiduelles qui sont autant de pistes de reconnaissances supplémentaires pour continuer à améliorer cette cartographie.

L'expérience de cette reconnaissance du secteur du laboratoire de Bure montre la nécessité de croiser les méthodes d'investigation et celle de réactualiser en permanence les cartes et l'interprétation lors de l'arrivée de données nouvelles.

L'Andra remercie l'ensemble des géologues, structuralistes, géophysiciens des sociétés Antea, Geoter, et des organismes d'enseignement et de recherche, G2R, Igal, BRGM, ainsi que Françoise Bergerat et Dominique Frizon de Lamotte - UMR 7072 - qui lui ont permis de mener à bien les travaux de cartographie géologique et structurale sur l'Est du Bassin de Paris au cours de ces dernières années.

R.A.J. et P.E.

Les besoins de l'industrie minière

Minerais et minéraux industriels

Pour les besoins du présent dossier, Géochronique a analysé la conjoncture de ces dernières années et consulté, à titre d'éclairage, la compagnie minière AREVA/COGEMA.

L'exploration minière pour les substances concessibles a connu en France ces dernières années une évolution radicale : l'exploitation et la prospection pour les métaux et pour la fluorine ont pratiquement disparu. Par contre, la hausse des produits pétroliers a entraîné un intérêt renouvelé pour la prospection des substances énergétiques, tandis que l'intérêt pour les minéraux industriels (diatomite, zéolites, argiles, calcaire à ciment etc) se maintenait.

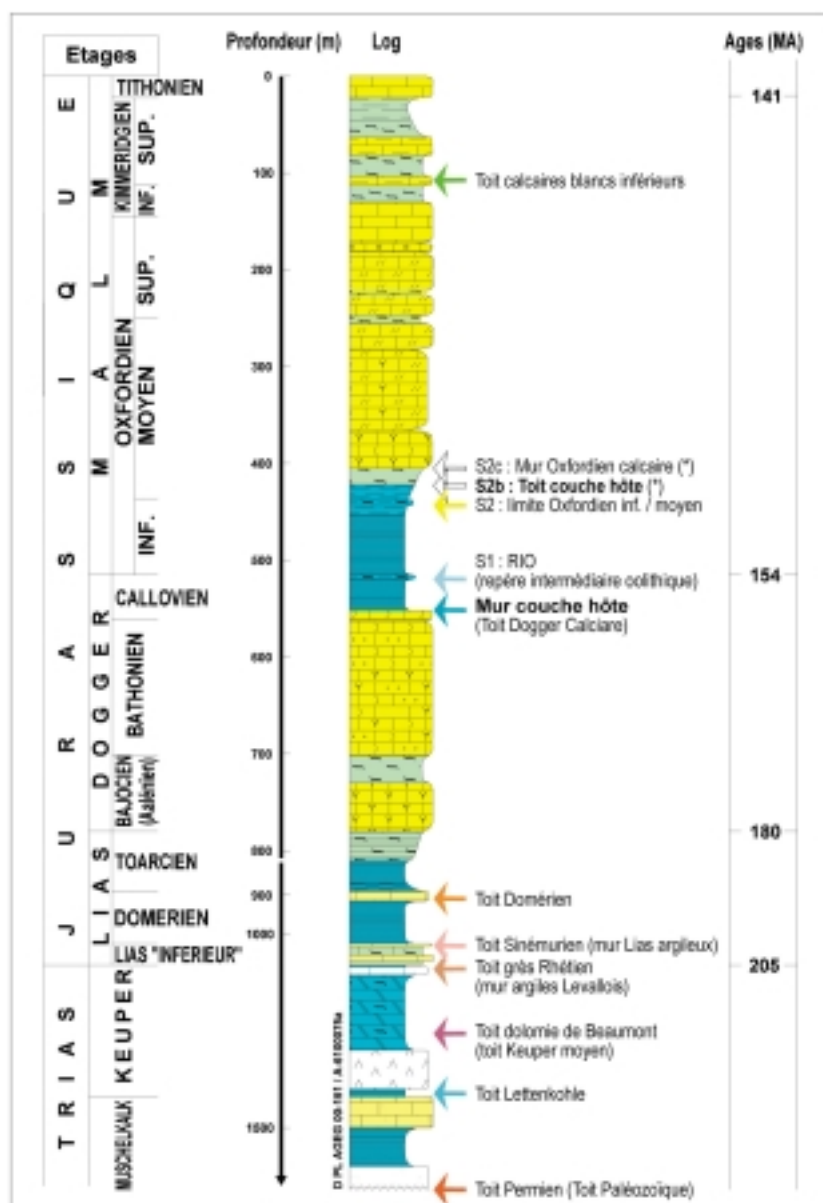
De façon générale, les sociétés minières ont besoin de bonnes cartes géologiques au 1/50 000 pour une approche globale lors de la phase de prospection générale. Le but est soit de comprendre le contexte géologique et métallogénique des indices métalliques, soit d'orienter une exploration dans des zones non prospectées où le contexte géologique est favorable. Par exemple, le développement de la consommation de la « litière à chats » a entraîné le renouveau de l'intérêt des groupes industriels pour les anciens lacs de cratères d'explosion phréato-magmatiques (« maars ») qui souvent ont favorisé la concentration de diatomite. Les progrès dans la cartographie au 1/50 000 des régions volcaniques récentes sont donc suivis de près.

L'échelle du 1/50 000 est pratique mais très vite les départements d'exploration des sociétés minières sont amenés à faire leur propre cartographie à des échelles plus adaptées (1/10 000) à la prospection détaillée des indices. Ensuite les travaux de développement miniers exigent des échelles encore plus grandes (1/1 000 à 1/200).

Pour les exploitants du sous-sol comme pour ses aménageurs, l'accès à l'information géologique cartographique ou plus simplement ponctuelle doit être facilité. La tendance semble prise par la mise en place d'outils de consultation publique et gratuite comme Infoterre. Elle doit être confirmée par leur développement pour tenir compte du grand volume d'information qui est hélas disponible sous une forme dispersée et peu structurée pour être aisément gérée. Avec l'appui des exploitants et des aménageurs, le service public est le seul acteur capable de mener un tel projet.

F.T., L.L., P.L. et J.F.

Secteur de Bure : marqueurs lithostratigraphiques pointés sur les profils sismiques (document ANDRA).



D.PL.FSTE.04.0167.A

Couleurs des horizons sismiques attribuées sur station Landmark Andra
(*) : marqueurs non pointés mais cartographiés par transposition de S2

Dossier

Les besoins routiers, les granulats

Jusqu'à ces dernières années, les granulats à béton étaient en majorité exploités dans des alluvions de rivière. Mais l'épuisement des gisements, les difficultés réglementaires croissantes pour l'accès à la ressource et les conflits d'usages entre les différentes ressources de ce milieu (eau, agriculture, urbanisation notamment) ont conduit à exploiter de plus en plus pour granulats des gisements en roche dure, où le matériau doit être concassé. Ceci a entraîné une évolution dans l'usage important qui était fait de la carte géologique à 1/50 000, que ce soit pour la prospection comme pour les schémas départementaux des carrières, ces outils de gestion prescrits par l'administration qui sont apparus dans les années 90 (voir Géochronique n° 63, 1997).

La prospection en plaine

Pour repérer les gisements favorables, les exploitants utilisent les services des géologues et leur premier document de travail est la carte géologique régulière à 1/50 000 (ou à défaut celle à 1/80 000). Le second outil est la Banque des données du sous-sol du BRGM (BSS). Le géologue peut la consulter par Internet avant de se rendre au service géologique régional pour dépouiller les dossiers-papier des différents sondages qui ont traversé les alluvions. Ils le renseignent sur l'épaisseur, la qualité du granulat et la profondeur de la nappe qu'il faudra rabattre, ce qui induira un coût énergétique et des nuisances à gérer et par la suite à réparer. Le réaménagement des carrières étant en outre devenu obligatoire, la carte géologique permet aussi au géologue de mieux prévoir la remise en état finale du site et de localiser les matériaux disponibles pour remblayer la carrière.

En ce qui concerne les granulats disponibles à l'état quasi « prêt à l'emploi » dans des gisements alluvionnaires, la plupart des ressources du pays sont aujourd'hui bien circonscrites. Le principe de base est de considérer comme gisements potentiels tous les terrains de la carte qui sont cartographiés comme alluvions anciennes et récentes, terrasses, moraines. De tout temps, les compagnies n'ont pas demandé aux services publics de cartographier ces ressources à une échelle plus fine. Elles partent du principe de ne pas mettre dans le domaine public des documents qui ne pourraient que contribuer à faire monter le coût de la maîtrise foncière des zones potentielles (le granulat étant un matériau non concessible, l'exploitant doit acquiescer auprès du propriétaire du sol, moyennant une redevance, la permission d'exploiter le sous-sol ou acquiescer les terrains).

La migration vers les roches dures

La plus grande partie de ces ressources est déjà épuisée. Le reste a été retiré à jamais des possibilités d'extraction par l'occupation du sol pour d'autres usages : urbanisation, réseaux routiers et ferroviaires. En effet, les gisements de granulats alluvionnaires correspondent en général à des plaines alluviales qui offrent des terrains plats idéaux pour y construire les villes, les voies de communication, les réseaux, pour y pratiquer la culture intensive. Plus récemment, à ces contraintes très anciennes sont venus s'ajouter les impératifs de préserver la qualité des ressources en eau souterraine, et d'autres ressources relatives au patrimoine, la faune et la flore protégées, la chasse et la pêche etc. Ces contraintes croissantes et la nécessité d'avoir une base factuelle objective pour les discussions et les concertations multiples ont conduit l'administration à créer un outil de gestion pour arbitrer de façon publique les usages conflictuels du sol et du sous-sol. C'est le schéma départemental des carrières. Le document de base qui sert à son élaboration est la carte géologique régulière à 1/50 000. Chaque formation théoriquement exploitable est repérée à 1/100 000 sur la carte du schéma par le contour géométrique qu'elle occupe sur le 1/50 000. Pour ces motifs, l'exploitant a dû reporter l'exploitation sur les carrières de roches dures. Au préalable, les ressources alluvionnaires restantes, dont le coût d'extraction est bien moindre, ont été passées « au crible ». Plusieurs régions ont lancé un véritable inventaire de leurs ressources

alluvionnaires. En particulier, un schéma directeur de l'approvisionnement de l'agglomération parisienne en granulats a été réalisé en 1996. Ce travail a été confié à l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Île-de-France (IAURIF) et au BRGM, et tous les acteurs ont participé (administrations, profession, environnement, associations). Les ressources ont été délimitées sur des cartes en utilisant les contours des formations alluvionnaires indiqués sur les cartes à 1/50 000. Pour calculer le volume de granulats disponible à l'aplomb de ces surfaces, on a recherché et dépouillé les quelques 8000 dossiers de sondages disponibles dans la BSS et dans les archives des laboratoires de l'Équipement et des Centres d'Études Techniques de l'Équipement (CETE) pour ces secteurs. On a aussi utilisé ces sondages et le modèle numérique de terrain de l'IGN à 1/20 000 pour tracer le profil transversal de chaque vallée alluviale au niveau du bed rock suivant des intervalles choisis en fonction du profil géomorphologique de la vallée. De la sorte, on a pu calculer le volume et le tonnage disponible « hors contraintes ». On a ensuite mesuré la part de ces surfaces qui est grevée irrémédiablement par des contraintes « de fait » (zones urbanisées, zones protégées) et celle soumise à des contraintes moins définitives, éventuellement révisables. Ainsi, on a remis aux décideurs et au public des chiffres de ressources et différents scénarios pour concilier leur utilisation la plus rationnelle possible et les autres utilisations du sol et du sous-sol.

*Le géologue cartographe du futur
(mais ce sera peut-être une femme...)*



Pour la recherche des gisements de roche dure, le géologue utilise la carte géologique au 1/50 000 mais il doit engager des études plus fines, tant sur le terrain qu'au laboratoire.

Enfin, une seconde voie de substitution pour les granulats alluvionnaires s'est ouverte il y a une décennie avec les granulats marins. D'importants gisements de ce type ont commencé à être inventoriés par l'IFREMER dans les années 70 au large des grands estuaires de la façade atlantique du pays (Baie de Seine surtout) et sur d'autres côtes. Depuis, l'effort des pouvoirs publics et des opérateurs s'est reporté comme à terre sur la réalisation de cartes factuelles des différentes autres ressources à préserver (flore sous-marine,

benthos, ressources de la pêche...) et des zones réservées (itinéraires de navigation etc.) qui imposent une gestion concertée de leur exploitation qui a commencé (par dragage) en certains points. La carte géologique est donc une des sources de données à prendre en compte. En ce qui concerne les matériaux pour remblais routiers (à terre) une grande finesse est requise pour la prospection. Les laboratoires des Ponts et Chaussées et les CETE associés sont passés maîtres dans ce domaine depuis des décennies. Ils utilisent au départ les cartes géologiques régulières à 1/50 000 mais ils doivent combiner leurs données avec de multiples paramètres géotechniques. La BSS est un de leurs outils mais

ils effectuent en outre de très nombreuses analyses de caractérisation des propriétés physiques des matériaux qui, dans l'état actuel, pour des motifs de lisibilité, ne sont pas reportables à l'échelle du 1/50 000 sur les cartes régulières. Ils doivent donc instruire et tenir à jour des documents de travail internes parallèles, sous forme de bases de données. Pour cette raison, les besoins en matière de cartographie géologique « pour le futur », ce sont désormais des cartes de paramètres et, globalement, un système qui permette de restituer ces données à la demande et de les superposer aux données cartographiques traditionnelles.

J.F.

VALEUR ÉCONOMIQUE DES CARTES GÉOLOGIQUES

Après la cartographie géologique à 1:24 000 des états du Kentucky et de l'Illinois, une étude a été entreprise pour estimer la valeur économique de ce travail.

L'établissement de la carte du Kentucky a coûté 90 millions de dollars dont 27,7 millions ont été récupérés dans la commercialisation des cartes. Une enquête a été menée auprès de 2 200 utilisateurs, dont 440 ont répondu. Elle fait apparaître que :

- la collecte des données aurait représenté 17 % des coûts des projets, en l'absence de la carte ;
- le coût minimum épargné dans la collecte des données se monte à 27 776 \$ par feuille de la carte ;
- l'existence de cartes géologiques détaillées a permis une économie de 43 527 \$ par feuille de la carte ;
- il faut en soustraire 342 \$ pour l'achat d'une feuille.

On aboutit pour l'ensemble de la couverture du Kentucky à une valorisation entre 2,25 et 3,35 milliards de dollars, soit 25 à 39 fois le coût de la réalisation des cartes.

M.J. (d'après le Service géologique d'Illinois et Geotimes déc. 2000)

Les nouveaux besoins

La carte du futur

En France, comme à l'étranger, la carte géologique est l'un des vecteurs primordiaux pour la mise à disposition de la connaissance de l'infrastructure géologique, indispensable au développement économique d'un pays.

Outil de gestion et d'aide à la décision

Du point de vue des institutions publiques et des utilisateurs de l'espace souterrain, la carte géologique est devenue aujourd'hui un outil indispensable d'aide à la décision, souvent utilisé comme document de référence et combiné avec des bases de données. A titre d'exemples, on peut citer les politiques d'aménagement qui reposent sur la connaissance géologique des terrains et sur leur aptitude à être utilisés pour différentes finalités (stockage, enfouissement, percement de tunnels...) ; la prévention des risques naturels qui valorise la carte géologique pour dresser des cartes

d'aléas* (risques sismiques, cavités souterraines, retrait-gonflement des argiles, glissements de terrains, inondations, avalanches etc.). La gestion raisonnée des ressources (eau, énergies, matériaux...) exige également des modèles géologiques perfectionnés s'appuyant toujours en première analyse sur la carte géologique.

Pour toutes ces raisons, la carte géologique est un **instrument essentiel du développement durable**. C'est un produit qui évolue pour répondre au mieux aux demandes formulées dans les enquêtes régulières menées auprès de ses utilisateurs (industriels, services et agences de l'Etat, des régions, des départements, chercheurs, enseignants, particuliers).

Un modèle de représentation qui a évolué

La carte géologique est avant tout un modèle de représentation de l'information liée à l'histoire, à la forme et aux propriétés des objets géologiques. Ce modèle peut être conçu et

représenté à diverses échelles et se doit de préserver une cohérence géométrique dans les trois dimensions de l'espace.

Depuis une vingtaine d'années, la carte géologique a évolué en accompagnant les changements liés à trois révolutions conceptuelles et technologiques majeures :

La connaissance de la dynamique des enveloppes externes et internes de la terre a profondément été renouvelée par les applications de la tectonique des plaques mais aussi par l'essor des techniques de géochronologie absolue, la connaissance des structures des bassins et des chaînes de montagne, la caractérisation des liens entre érosion, climat et mouvements tectoniques, etc.

Cette évolution permanente de la connaissance impose inexorablement, même si elle ne change pas fondamentalement la façon dont le géologue lève la carte, une révision du modèle « carte » et une mise à niveau de l'information fournie par la carte géologique.

Dossier

Le développement des moyens de traitement numérique de la donnée

La carte géologique est devenue numérique, les informations ont été codées et standardisées et ont ainsi pu être intégrées à des modèles 3D complexes, combinant les données géophysiques. Cette évolution est en cours et nécessite de gros investissements et moyens techniques et humains. Les techniques de positionnement spatial (GPS, interférométrie, MNT...) permettent désormais à toutes les informations géologiques recueillies d'être géoréférencées dans les trois dimensions de l'espace (x,y,z) et ce de façon numérique dès l'acquisition sur le terrain. Cette définition spatiale des informations géologiques permet leur gestion en bases de données, leur intégration dans des modèles géométriques volumiques en trois dimensions et leur croisement avec d'autres sources de données, non géologiques.

Alors que l'essor industriel du 20^e siècle avait conduit à explorer les ressources du sous-sol profond dans une tranche 0-1000 m, les priorités se sont progressivement déplacées vers la surface en suivant les préoccupations croissantes concernant l'environnement et la préservation des espaces naturels. Les formations géologiques de la surface, dans une tranche 0-100 m, supportent l'activité humaine, sont une source de matériaux exploitables, offrent une zone de stockage et de transfert pour l'eau,



Notion de régolithe (source : British Geological Survey ; définition de l'ouvrage «glossary of geology»).

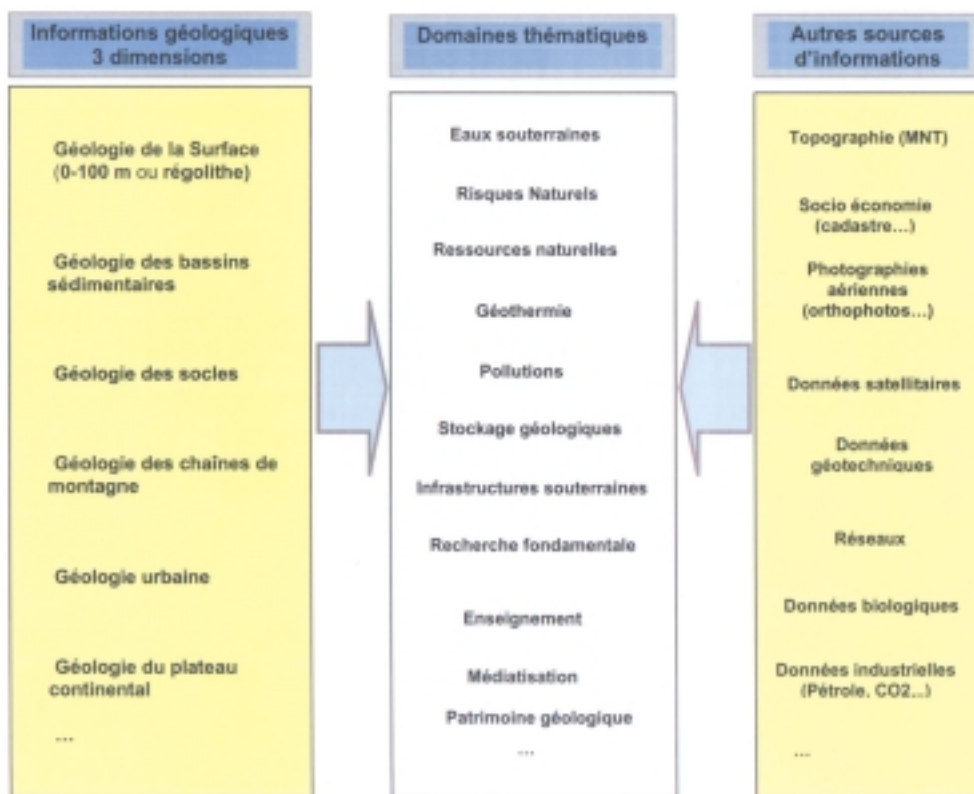
mais aussi un filtre ou un réceptacle pour les pollutions, entrent en compte dans la prévention et la gestion des risques naturels, sont le lieu de tous les aménagements et constituent un espace utilisable dans la production d'énergie (géothermie très basse énergie). Enfin, ce sont les supports de toute activité et production animale et végétale.

Ces formations de la surface sont encore appelées « régolithe* », terme remis à la mode par les anglo-saxons qui le définissent comme l'en-

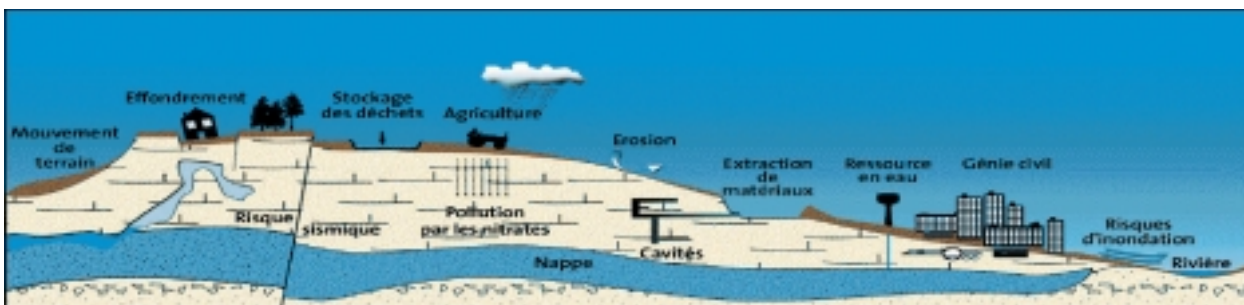
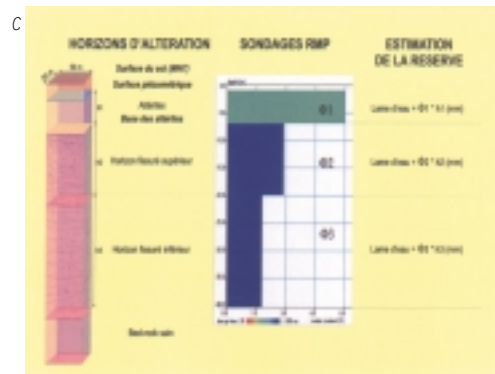
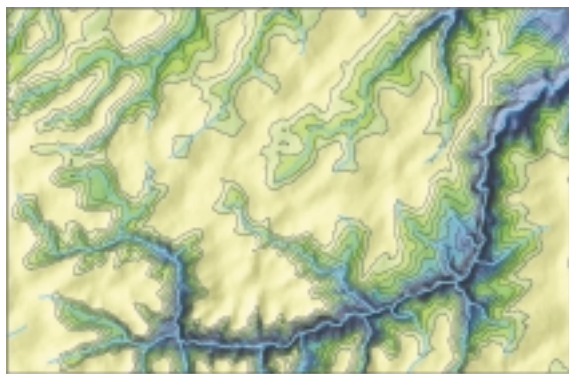
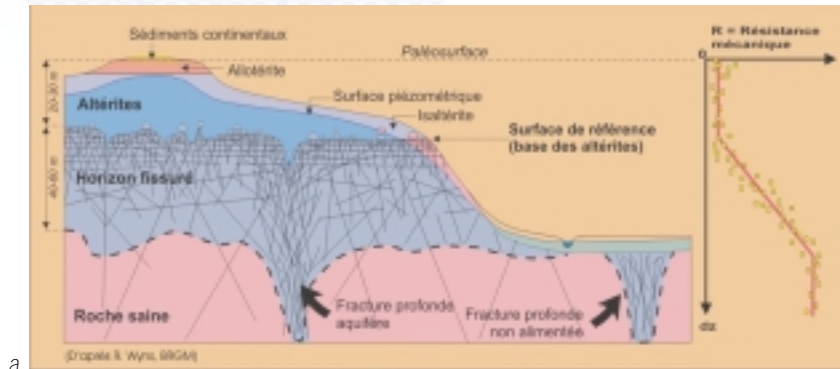
semble des roches non consolidées, en place ou non, recouvrant le substratum rocheux. Une connaissance fiable de ces formations de la surface est nécessaire pour leur associer des cartes de paramètres qui sont nécessaires aux autres thématiques. Les cartes géologiques futures devront alors mieux caractériser certaines propriétés (physiques, chimiques, hydrogéologiques...) des formations géologiques dans cette tranche 0-100 m.

Les paramètres qui pourront être associés aux informations géologiques seront différents en fonction des applications thématiques (cf. fig. p. 33). Par exemple, les paramètres nécessaires dans le domaine des eaux souterraines ne seront pas ceux utiles à la prévention des risques naturels. Une meilleure connaissance de cette tranche superficielle de notre planète passe également par la modélisation des processus qui président aux échanges solides, liquides ou gazeux entre les interfaces de la géosphère, de la biosphère et de l'atmosphère ainsi que de leurs évolutions dans le temps.

Classement des informations géologiques 3D par échelles et par domaines thématiques, contribution des autres sources d'informations.



Cartographie de paramètres (documents R. Wyns) :
 a : coupe du régolithe.
 b : cartographie de la résistance de pointe sur la feuille Chemillé.
 c. Organigramme de réalisation de la carte 3D de la réserve en eau souterraine de la région de Plabennec : la colonne du centre indique la teneur en eau (en %) obtenue par sondages géophysiques qui ont mesuré la Résonance Magnétique Profonde.



Eau
 - perméabilité
 - porosité
 - volume...

Risques
 - résistance mécanique
 - teneur en argiles
 - teneur en eau
 - taille cavités...

Pollution
 - teneur en argiles
 - perméabilité
 - adsorption...

Géothermie
 - conductivité
 - perméabilité
 - dureté...

Paramètres et thématiques dans la tranche 0 - 100 m.

Une nouvelle palette de techniques spatiales pour l'acquisition de données géologiques

La géophysique aéroportée et l'observation satellitaire font partie des techniques grâce auxquelles une connaissance du sous-sol toujours plus pointue peut se développer sans remplacer les observations et les prélèvements sur le terrain. La combinaison des données géologiques, géophysiques et satellitaires permet d'obtenir une cartographie géologique semi-automatique dite intégrée. La particularité de ce type de cartographie repose sur l'utilisation d'algorithmes statistiques permettant de cartographier des zones homo-

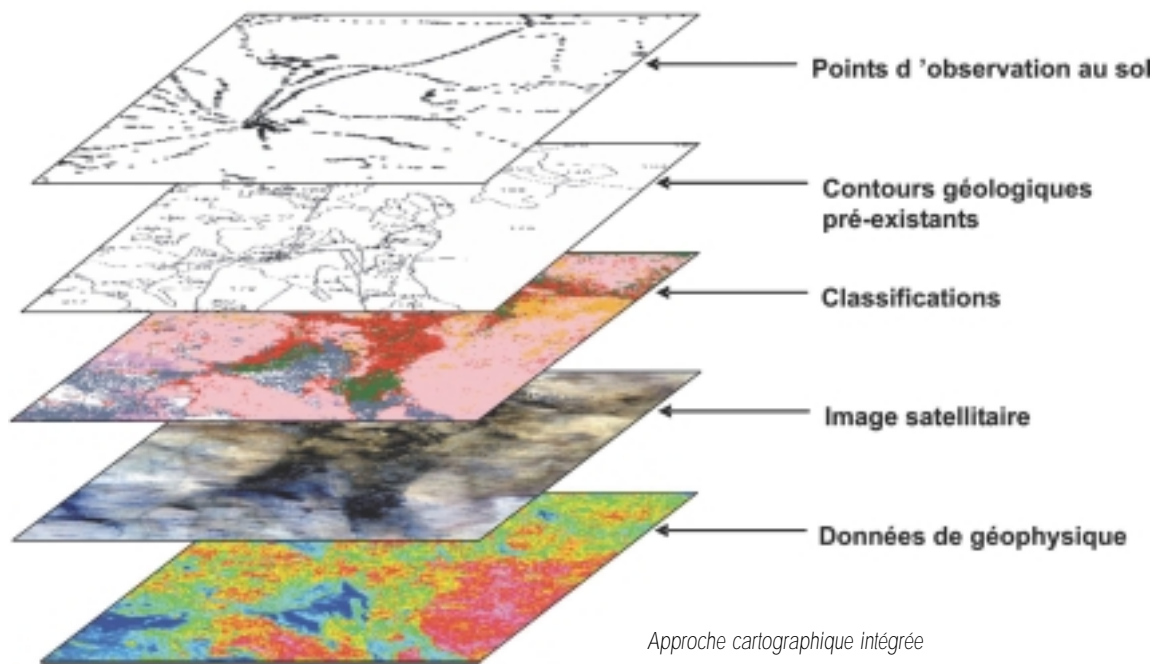
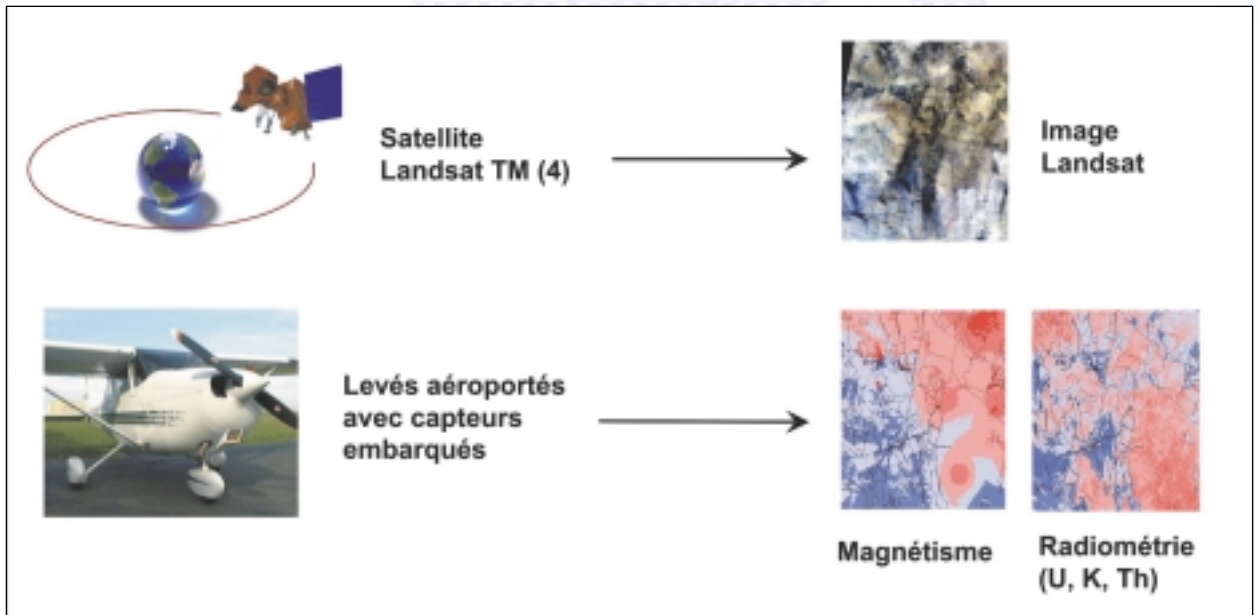
gènes et définies à partir d'une ou plusieurs caractéristiques des formations géologiques.

Plusieurs applications de ces méthodes statistiques de classification automatique à partir des signaux physiques (optiques, magnétiques, radiométriques...) ont été réalisées dans plusieurs pays d'Afrique de l'Ouest, en Namibie, mais également en Guyane et sur le Massif Armoricain à la suite de programmes d'acquisitions aéroportés.

A titre d'exemple, l'enregistrement du champ magnétique lors d'un survol aéroporté, permet

de cartographier l'aimantation des roches, propriétés caractérisant certaines formations géologiques. D'autres techniques comme la radiométrie spectrale, permettent de mesurer les rayonnements gamma, eux-mêmes proportionnels à la teneur en radioéléments d'uranium (U), de potassium (K) ou de thorium (Th), naturellement présents dans certains types de roches. Le traitement statistique de ces cartes élémentaires permet d'établir de manière semi-automatique des cartes géologiques prédictives, qui rendent compte de la variabilité des formations géologiques et que l'on ira ensuite valider sur le terrain (cf. fig. p. 35).

Dossier



Aujourd'hui les géologues utilisent deux familles d'images fournies par différents capteurs aéroportés et satellites. L'imagerie optique, de même nature que la photo aérienne, permet de caractériser la surface dans des bandes spectrales allant en général du visible à l'infrarouge. L'imagerie radar, issue de capteurs actifs, résulte de l'interaction entre l'onde radar émise et le sol, fournissant localement des informations de sub-surface. Outre la cartographie des formations géologiques, les applications concernent la cartographie des zones de pollution, des zones à risque, à ruissellement, érosion, mouvements de terrain, des types de culture... Là encore les données fournies

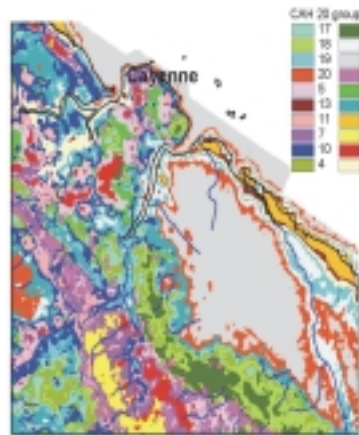
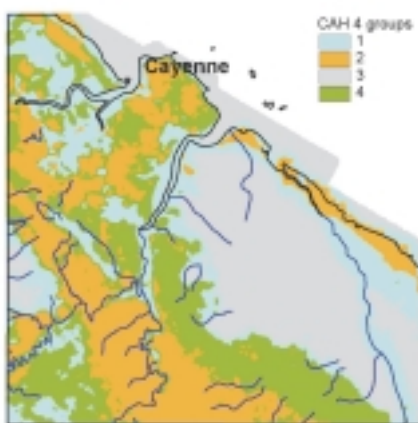
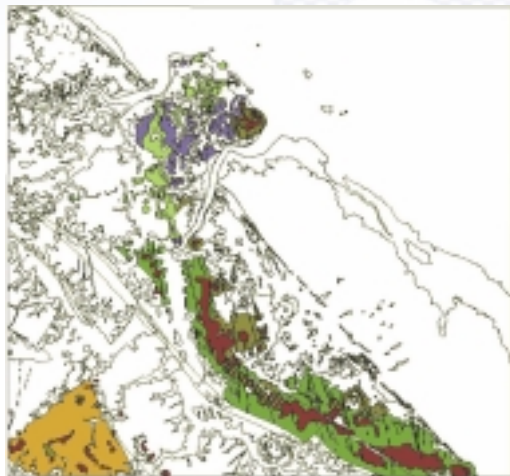
par les images doivent être corrélées avec des observations de terrain.

Consensus sur la nécessité de disposer d'un référentiel géologique 3D de la subsurface

L'intégration, réussie par la carte géologique, de données naturalistes et de mesures (physiques, chimiques...) dans un même référentiel est cruciale pour livrer une information synthétique et non biaisée. L'utilisateur souhaite désormais disposer d'une information précise, fiable, en temps réel sur son ordinateur personnel, et la visualiser en diverses dimensions. Images de synthèses, imagerie 3D, réa-

lité virtuelle etc. constituent aujourd'hui des vecteurs privilégiés pour une restitution claire et compréhensible de l'information géologique.

L'objectif est de visualiser et de modéliser en trois dimensions la géométrie et les propriétés du sous-sol, à partir du couplage des cartes géologiques à différentes échelles, des données altimétriques, des données en géologie de surface, des données géophysiques et des données de forages. La 4^e dimension, celle du temps, déjà intégrée dans la carte géologique, doit aussi figurer dans les modélisations (4D). Cette dimension temporelle est primordiale pour développer les simulations.



Classification par ascendance hiérarchique en Guyane.
Le traitement croisé des paramètres n'aboutit pas à une cartographie directe des formations géologiques mais à une carte d'anomalies ou de subdivisions jusqu'alors insoupçonnées qui avaient échappé au lever de terrain et qui invitent le géologue à des contrôles sur place.

En conclusion, la carte géologique papier est une vision en 2 dimensions d'un modèle en trois dimensions de la répartition géographique des propriétés de lithologie, d'âge, d'orientation des formations géologiques. Autrement dit, les informations géologiques, géoréférencées, sont associées à des paramètres quelle que soient l'échelle, la profondeur, l'âge...

La réponse aux besoins actuels et futurs

Le produit de mise à disposition de la connaissance géologique, qui répondra aux besoins des utilisateurs est un modèle continu en 3D qui fournit l'information en tout point de l'espace sur la lithologie et les propriétés physiques des roches. Ce modèle nécessite l'intégration des données géologiques avec les données multi-sources géophysiques. Les propriétés physiques essentielles à la modélisation géophysique (densité, susceptibilité magnétique, conductivité thermique, électrique...) doivent désormais être acquises pour cette modélisation géophysique. La carte géologique devient alors un produit dérivé, papier et numérique, d'un produit nouveau

de mise à disposition de l'information géologique. Plusieurs conséquences découlent de cette évolution future :

- l'une des conséquences et non des moindres est qu'aujourd'hui (et demain) ce « **modèle carte géologique** » doit être conçu pour un produit final en 3D par le géologue, dès l'acquisition de la donnée ;
- une seconde conséquence va consister à franchir des sauts technologiques importants pour **acquérir des informations en continu** (méthodes indirectes d'acquisition en géophysique etc.) que ce soit pour acquérir des données en géologie de surface (0-100 m) comme à grande profondeur (sismique profonde, géophysique aéroportée...);
- une troisième conséquence concerne les méthodes de traitement qui permettent l'harmonisation et **l'actualisation** des données et leur modélisation en 3D et 4D avec la dimension temporelle. Il n'est pas exagéré de parler de « carte à la carte » ou de « blocs 3D d'information numérique » le tout bien entendu disponible en ligne (via Internet par exemple) ;

- une quatrième conséquence concerne la restitution des informations qui devra être sous forme numérique et 3D/4D aussi bien que sur papier on peut prédire que les différentes formes de cartographies géologiques auront toujours besoin d'édition papier ;
- enfin une cinquième conséquence est implicite ; elle concerne l'évolution obligatoire des programmes géologiques qui devront désormais garantir de façon pérenne le stockage des données, leur accessibilité et leur interopérabilité.

D.V., C.T., P.L.

**Aléa : événement naturel (ou non) dont on essaie d'évaluer la probabilité qu'il se produise et les dégâts qu'il entraînera.*

**Régolithe : ensemble des roches non consolidées comprenant les altérites, les formations superficielles et les sols ; elles sont exposées dans une tranche comprise entre zéro (roche affleurante) et 100 mètres d'épaisseur, d'où le vocable « 0-100 m ».*

Dossier

LA CARTE DU PLATEAU CONTINENTAL

Une cartographie géologique de la transition Terre-Mer et du plateau continental répond aux questions posées à toutes échelles par l'aménagement et la protection de l'environnement des régions littorales et maritimes. Celles-ci sont soumises à des pressions toujours croissantes : aquifères côtiers, ressources en matériaux, dynamique sédimentaire et évolution des côtes, risques géologiques, protection des écosystèmes... La connaissance du sol et du sous-sol marins a constamment bénéficié des développements importants des systèmes acoustiques et des moyens informatiques pour l'acquisition, le traitement et l'interprétation de données analogiques puis numériques de plus en plus précises. Il est aujourd'hui possible de constituer un ensemble complet de couches d'informations numériques détaillées sur la morphologie et les structures des fonds marins (modèles numériques de terrain au pas de quelques mètres), leur réflectivité (carte d'imagerie acoustique géoréférencée), la géométrie et les faciès acoustiques des unités sédimentaires, à des résolutions sans cesse améliorées : d'une dizaine de centimètres pour les couches les plus superficielles à quelques mètres pour les premières centaines de mètres du sous-sol. Les atlas cartographiques présentant les informations disponibles sur les divers niveaux du sol et du sous-sol marin sont aussi aujourd'hui constitués sous forme de SIG et de bases de données présentant de nombreuses données traitées et interprétées. Ces bases permettent d'élaborer des modèles 3D à diverses échelles. Face au nombre de plus en plus élevé des données, un des principaux objectifs immédiats réside dans la constitution à l'échelle nationale d'ensembles bien gérés de données homogènes et aisément accessibles sur les domaines côtiers et le plateau continental. La réalisation d'un programme de cartographie systématique, à l'instar de ce qui est entrepris par certains pays (Irlande, Belgique, Pays-Bas...), représente un challenge à long terme qui implique des moyens très importants pour l'acquisition, la gestion et le traitement mais aussi pour l'interprétation des données. Il faut souligner que l'emploi de données indirectes toujours plus précises et les modèles sans cesse améliorés nécessiteront toujours une calibration et des contrôles par des données géologiques fiables, notamment les carottages dans les sédiments sableux et les forages courts dans les unités sédimentaires.

P.G.

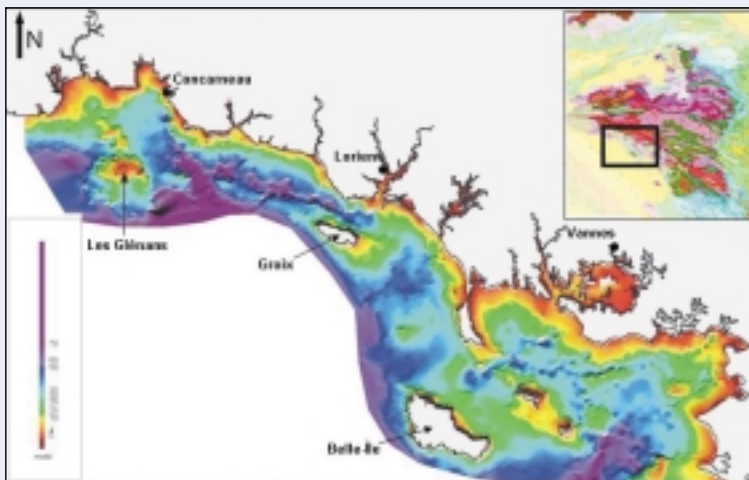
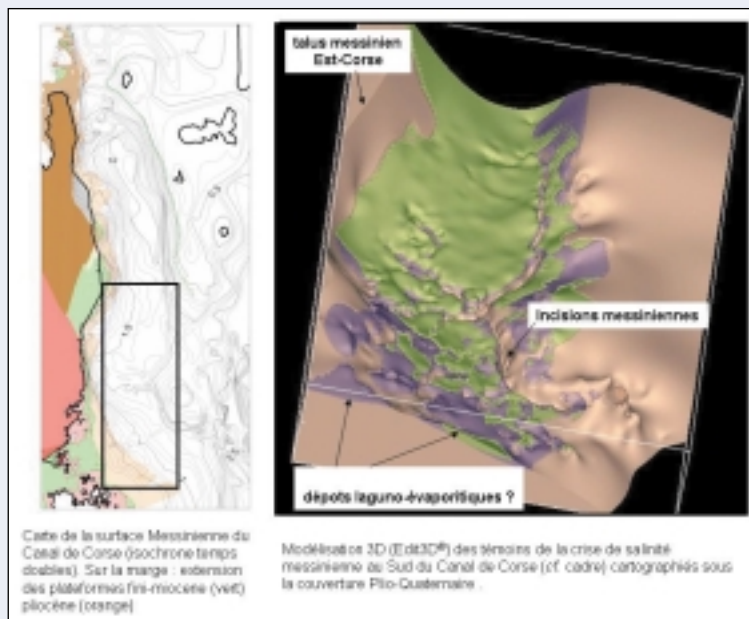


Plate-forme sud-armoricaine : carte isochrone (seconde temps double) du toit du substratum montrant les incisions quaternaires de la plate-forme interne (carte Perros-Guirec, projet Cotarmor, données Géosciences Rennes, Université de Vannes et BRGM).



Modèle 3D de la surface messinienne du Canal de Corse (marge orientale) élaboré à l'aide du logiciel « Editeur géologique 3D » du BRGM à partir de profils sismiques interprétés (données IUEM Brest et BRGM).