

Imagerie

Enseignement du 24 Novembre/17 décembre 2003

INFORMATION GEOLOGIQUE ET PROCESSUS GEODYNAMIQUES

La première partie de la formation a mis en évidence que l'analyse et la connaissance des phénomènes géologiques pouvait se concevoir comme une chaîne méthodologique continue, de l'acquisition des données à l'établissement de scénarios et de modèles prédictifs. La cartographie géologique numérique constitue une pièce maîtresse de ce dispositif de recherche. L'utilisation de logiciels assez conviviaux ouvre de nouveaux horizons aux géologues prêts à se lancer dans une standardisation minimale des données. L'information ainsi acquise doit ensuite être intégrée dans des scénarios évolutifs qui présupposent une connaissance académique de concepts géodynamiques et de modèles de référence. L'expérience montre qu'un rappel de ces références et la définition de clés de lecture sont nécessaires pour aboutir à une pratique courante et satisfaisante de l'analyse de l'information contenue dans un document tel que la carte au 1/1 000 000^{ème} de la France.

1. Quelques mots clés pour contraindre l'évolution géodynamique d'une région

Geo- implique une localisation, -dynamique implique de prendre en compte l'évolution et de décrire les forces et les changements intervenus, du site de formation initial de la roche à la position dans laquelle l'observation est faite. Ces changements sont globalement de 2 types :

- transformations mécaniques, correspondant principalement à des déplacements horizontaux (vitesse de l'ordre du cm/an) et verticaux (vitesse de l'ordre du mm/an)
- transformations thermodynamiques se marquant par des réajustements des équilibres minéralogiques au sein des roches en fonction des différents niveaux de la lithosphère (variation des conditions pression et température).

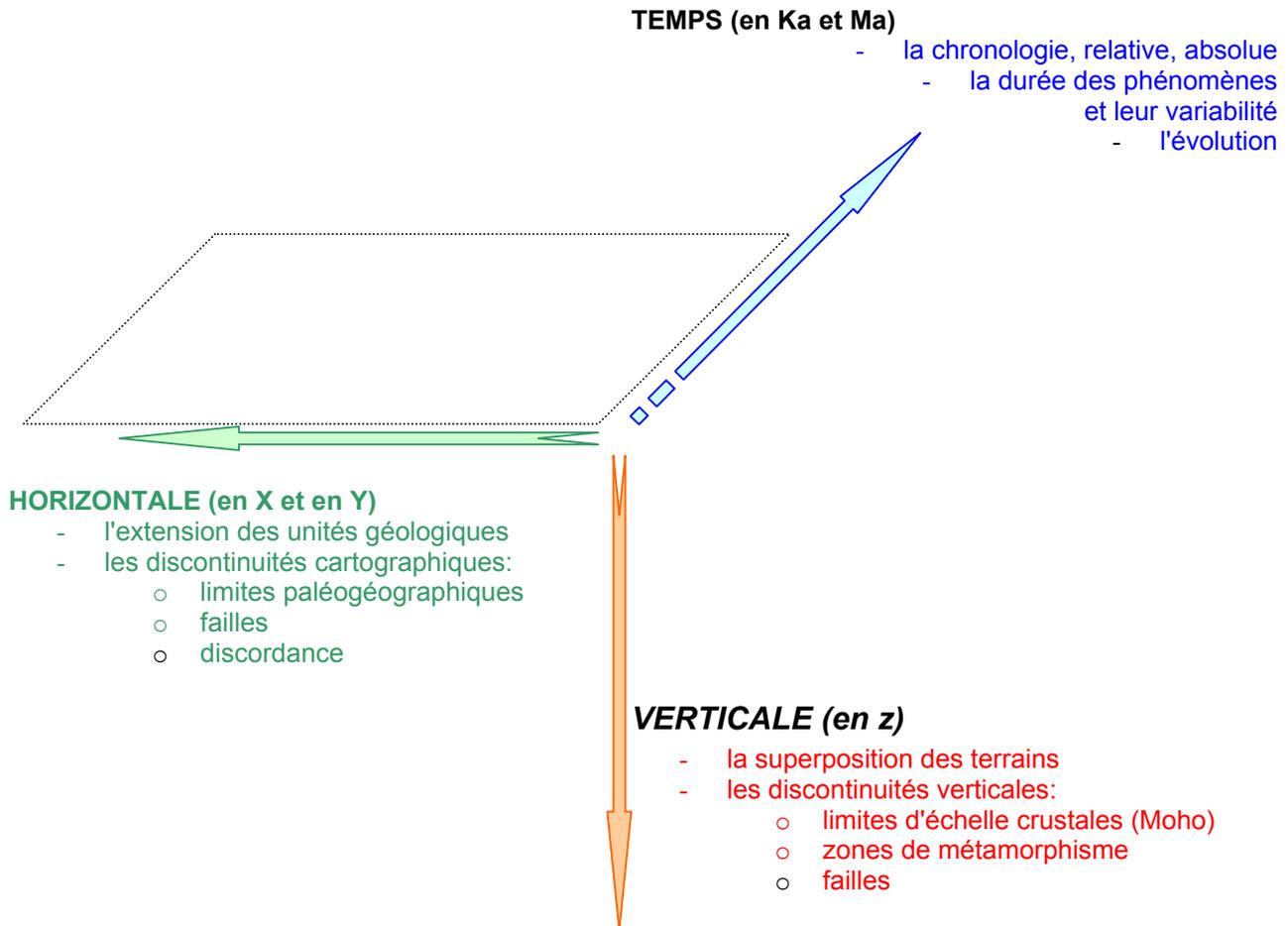
Ces changements sont par ailleurs interdépendant, les transformations thermodynamiques étant contrôlées à toutes les échelles par l'état de contrainte lié aux déplacements horizontaux et verticaux de la lithosphère. Ainsi les paragenèses minérales symptomatiques d'un métamorphisme se produisant à des profondeurs de l'ordre de 20 km dans la croûte terrestre s'orienteront dans les structures en cisaillement à proximité d'un chevauchement crustal ou dessineront des enveloppes concentriques autour d'un dôme gneissique.

Les outils dont dispose le géologue pour mettre en évidence et quantifier ces transformations sont :

- l'analyse structurale des roches déformées et les méthodes de géophysique (in situ et télédétection) pour les déplacements horizontaux et verticaux
- l'étude des formations sédimentaires qui enregistrent à distance les phases de soulèvement et de mise à l'affleurement de roches dont l'exhumation peut être datée par ailleurs par les méthodes cosmogéniques
- l'analyse des chemins pression-température enregistrés par les roches lors de leur enfouissement et exhumation dans la lithosphère

Les clés de lecture proposées peuvent être ramenées à un problème à 4 dimensions : x,y pour les dimensions cartographiques, z pour l'extension verticale et t pour l'évolution historique. La méthodologie concerne ainsi :

- l'extension cartographique des systèmes géologiques, unités lithologiques et structures
- l'examen de ces systèmes dans une perspective géodynamique à l'échelle de la croûte, éventuellement de la lithosphère
- l'analyse de leur signification dans le déroulement historique des processus géologiques



2. Histoire de France et géologie numérique

2.1. Comment écrire l'histoire de France ?

Reconstruire l'évolution tectonique d'un territoire aussi varié que la France nécessite la prise en compte de la distribution des phénomènes en surface et en profondeur. Ces phénomènes étant fossiles, ils ne peuvent être approchés que par des « objets marqueurs » de leur occurrence passée. Plaçons nous dans des cas aujourd'hui contraints de la géodynamique de la planète terre : l'Himalaya, le rift Est Africain. L'imagerie satellitaire et la précision des instruments de mesure physique et chimique ont permis de définir les caractéristiques de processus qui impliquent la

lithosphère et se manifestent par des déplacements dont les effets les plus marquants sont les tremblements de terre et les éruptions volcaniques. Une quantification de ces phénomènes (vitesse de déplacement et de déformation, bilans énergétiques..) est possible et fournit des paramètres qui peuvent être utilisés pour bâtir des scénarios et des modèles prédictifs.

Question : comment reconnaîtra t'on dans 50 Millions d'années l'existence du chevauchement frontal himalayen, de la fusion du manteau supérieur dans le rift Kenyan ? Sachant que ces phénomènes auront migré et que le recyclage, l'enfouissement et l'exhumation des terrains répondent à des évolutions complexes liées à des conditions aux limites qui sont susceptibles d'être modifiées.

Réponse : en allant caractériser aujourd'hui les phénomènes par des « objets marqueurs » et ... en les gardant en mémoire...

Recueillir, décrire ces objets marqueurs et les relier dans les contextes actifs aux processus géodynamiques actuels est la clé du déchiffrement des mêmes objets marqueurs dans l'histoire géologique d'un domaine. Jusqu'au moment où les objets marqueurs ne seront plus les mêmes... et les équivalents actuels n'existeront plus.

Parmi ces objets marqueurs, la distribution des terrains et des structures en surface constituent la première clé. La carte géologique est une fenêtre ouverte sur la structure naturelle tri dimensionnelle de la Terre.

Et que le facteur temps peut être appréhendé. Que l'on peut atteindre par la chronologie absolue (âges géochimie isotopique) et relative.

D'autre part l'analyse comparée de la nature de deux mêmes terrains dans des contextes différents définit des gradients, autre clé d'écriture de l'histoire : la caractérisation d'un gradient implique que les termes les plus évolués sont passés par un stade moins évolué et que les termes les moins évolués auraient pu poursuivre leur évolution si le phénomène n'avait pas cessé.

Si la question est « Comment écrire l'histoire de France ? », la réponse est faire parler la carte...

2.2. Analyse des chaînes de montagne, l'exemple des Alpes

Les Alpes sont utilisées comme cas d'étude pour formaliser la méthodologie d'analyse de la structure d'une chaîne de montagne. L'étude de la répartition géographique des terrains et des phénomènes géologiques témoigne de l'histoire géologique et de la structure générale du domaine étudié

La problématique de l'analyse de l'information disponible sur les cartes numériques est abordée à partir de la carte géologique de la France au Millionième. L'analyse des différents thèmes et leur représentation graphique par des éléments géométriques orientés permettent de reconstruire l'évolution géologique en référence à un cadre géodynamique. Il peut ainsi être menée une réflexion sur la pertinence des cartes thématiques susceptibles d'être produites par les procédures de requête des SIG sur une géotransverse des Alpes. Sachant que la répartition géographique des terrains et des phénomènes géologiques témoigne de l'histoire géologique et de la structure générale du domaine étudié, il est possible de créer [des cartes thématiques illustrant l'extension des terrains et des phénomènes géologiques et fournissant les mots clés pour reconstituer l'évolution géodynamique.](#)

Exemple de commentaires réalisés à partir des images extraites du SIG sur un transect alpin

Clef de lecture lithologie et temps (incluant l'analyse des ages et des sites de mise en place)

- i. Les terrains Paléozoïque sont très représentés sur le domaine occidental des massifs cristallins externes, il s'agit de la marge orientale européenne, peu ou pas impliquée dans la collision alpine
- ii. Une bande de terrain Paléozoïque occupe un large espace au cœur de la zone: les formations houillères briançonnaises. Peu déformées ailleurs en France (formation post-orogénique, discordante sur les terrains tectonisés lors de l'orogène varisque), elles sont intensément déformées et métamorphosées lors de l'orogène alpin (faciès schiste bleu)
- iii. De larges domaines Paléozoïque sont éclogitisés dans la partie orientale (Dora Maira)
- iv. Les domaines magmatiques témoignent d'une accréation océanique d'âge Mésozoïque (j2-c) bien représentée dans les parties centrale et orientale de la zone étudiée

Clef de lecture métamorphique et temps

- v. Le métamorphisme amphibolitique et migmatitique est restreint aux terrains Paléozoïque du domaine occidental
- vi. Le métamorphisme varisque est absent de la zone orientale affectée par le métamorphisme HP, le métamorphisme alpin est restreint à des zones linéaires dans la marge continentale européenne
- vii. Une zonéographie Est Ouest montre la juxtaposition de 3 grands domaines métamorphiques: un domaine éclogitique, un domaine HP-BT, un domaine schiste vert
- viii. La zone de métamorphisme schiste bleu affecte des terrains issus de l'océan ligure (Jurassique Crétacé) et les terrains houiller briançonnais
- ix. La présence de séries mises en place lors de phases d'accréation océanique affectées de métamorphisme éclogitique implique des phénomènes de subduction de lithosphère océanique
- x. L'existence de complexes non métamorphiques au sein de ces ensembles de métamorphisme schiste bleu, comme le complexe du Chenaillet, implique l'existence de phénomènes d'obduction

Clef de lecture structurale et temps

- xi. Les failles majeures se superposent aux grandes limites de métamorphisme, parmi celles ci: la faille de Digne, le front pennique...
- xii. Les trajectoires de foliation sont globalement parallèles aux grandes structures de faille suggérant des liens entre le développement de cette structure pénétrative synchrone du métamorphisme et le fonctionnement de ces grandes structures d'échelle régionale
- xiii. Le caractère persillé des accidents frontaux témoigne de leur position sub-horizontale
- xiv. Le caractère chevauchant du front pennique est marqué par la présence des terrains cénozoïques sous le chevauchement pennique des terrains Mésozoïque et Paléozoïque, la superposition de domaines schiste bleus et éclogitiques sur des domaines schistes verts (métamorphisme inverse)
- xv. La bordure orientale du domaine briançonnais montre des critères de chevauchement à vergence est superposés à une première tectonique à vergence ouest
- xvi. Un grand accident en faille normale affecte la bordure ouest des domaines éclogitiques des Alpes internes

Éléments géodynamiques déduits de l'analyse cartographique

- xvii. La zonéographie régionale
- xviii. Une logique d'épaississement crustal
- xix. L'échelle crustale des phénomènes et l'extension naturelle en profondeur
- xx. Les grandes phases d'édification de la chaîne

2.3. Méthodologie d'analyse des chaînes de montagne

L'analyse des documents cartographiques est facilitée par le recours aux Systèmes d'Information Géographiques qui fournissent des analyses thématiques des différentes informations disponibles qui sont principalement classées suivant la Stratigraphie et l'âge des protolithes, le métamorphisme et le magmatisme. Les clés de lecture proposées guident l'analyse et l'interprétation d'informations significatives et susceptibles de contraindre la reconstruction de l'évolution tectonique.

Les processus tectoniques actifs à la surface de la terre, à l'échelle de la croûte continentale et lithosphérique sont fondamentalement l'extension qui se marque par un amincissement et la convergence qui est responsable d'un épaissement. L'analyse de l'information cartographique révèle des objets témoignant de ces phénomènes :

- Amincissement crustal : préservation de cortèges ophiolitiques, accréation océanique d'âge Mésozoïque
- Epaissement crustal : failles inverses, superposition de terrains anciens sur des terrains plus jeunes, métamorphisme inverse, évolution métamorphique impliquant des stades d'enfouissement

Cette analyse doit être confrontée à d'autres sources d'information, principalement géophysiques. Ainsi, l'illustration de ce processus d'épaississement se fait dans les Alpes par l'analyse de différentes imageries géophysiques:

- les profils sismiques montrent l'existence de réflecteurs d'échelle crustale correspondant à l'enfouissement de la croûte européenne sous l'Apulie,
- la carte du Moho, déduite des profils sismiques et de la sismologie, indique une transition croûte-manteau à des profondeurs supérieures à 60 km,
- l'anomalie de Bouguer est fortement négative sur l'ensemble de la chaîne alpine et traduit une épaisseur anormalement élevée de la croûte continentale.

Il est bien sûr important de noter que, généralement, les processus d'amincissement ne peuvent être imagés que dans les domaines de marge passive préservées des processus d'épaississement.

En conclusion, les analyses des données cartographiques et de l'imagerie géophysique fournissent des gammes d'informations qui, à l'échelle régionale et à l'échelle crustale (voire lithosphérique) contraignent la nature des orogènes. C'est de la comparaison entre ces gammes d'informations avec celles disponibles sur les orogènes actifs que l'interprétation peut être menée à son terme. Ainsi, la préservation de sutures océaniques, la cartographie des grandes structures de chevauchement, les profils sismiques et tomographiques à travers l'Himalaya sont autant « d'objets » témoins de processus liés à la résorption d'une aire océanique en prélude d'une collision continentale que l'on peut aujourd'hui observer et mesurer. De la similitude des caractères à l'échelle crustale, on déduit le caractère collisionnel passé de l'orogène alpin.

La reconstruction des structures des chaînes plus anciennes est rendue délicate par la disparition des zones profondes des orogènes lors des phases de désépaississement post collisionnelles. En effet, une croûte continentale épaissie est en déséquilibre gravitaire et tendra, généralement, à retrouver une épaisseur moyenne après quelques dizaines de millions d'années. C'est notamment le cas de la

chaîne varisque dont le Moho, situé entre 30 et 35km de profondeur, marque la base d'une croûte inférieure caractérisée par un aspect lité, attribué à la granulitisation de la croûte continentale. Ainsi, la comparaison entre les chaînes varisque et alpine est instructives à plusieurs niveaux:

- les objets marqueurs des processus d'épaississement et amincissement sont identiques, à l'intensité de transformation subie près,
- les structures marquant les stades d'épaississement majeurs dans les Alpes sont en grande partie obliérées par l'évolution post-orogénique dans la chaîne varisque,
- dans la mesure où les objets marqueurs des stades d'évolution tectonique sont suffisamment caractéristiques, leur extension limitée spatialement ne peut pas être considérée comme un élément altérant leur signification.