

Géologie

par **Jean-Louis DURVILLE**

*Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées
Chef de la division Mécanique des sols et géologie
de l'ingénieur au Laboratoire central des Ponts et Chaussées*

et **Pierre POTHÉRAT**

Ingénieur géologue au Laboratoire central des Ponts et Chaussées

1. Qu'est-ce que la géologie ?	C 204 - 2
2. Matériaux	— 2
2.1 Minéraux	— 2
2.1.1 Généralités	— 2
2.1.2 Principales espèces minérales.....	— 3
2.1.3 Minéraux argileux.....	— 4
2.2 Roches	— 4
2.2.1 Roches sédimentaires	— 4
2.2.2 Roches résiduelles.....	— 5
2.2.3 Roches magmatiques.....	— 5
2.2.4 Roches métamorphiques.....	— 6
3. Structures tectoniques	— 6
3.1 Diaclases et fentes.....	— 6
3.2 Schistosité.....	— 6
3.3 Failles.....	— 6
3.4 Plis.....	— 7
4. Le temps en géologie	— 7
4.1 Méthodes de datation	— 7
4.1.1 Datation relative.....	— 8
4.1.2 Datation absolue.....	— 8
4.2 Reconstitution de l'histoire de la Terre	— 8
5. Importance de la géologie du Quaternaire	— 10
5.1 Formations superficielles.....	— 10
5.1.1 Formations apparentées avec le substrat.....	— 10
5.1.2 Formations sans parenté avec le substratum	— 10
5.2 Géodynamique	— 11
6. Outils de base du géologue	— 11
6.1 Cartes et coupes géologiques	— 11
6.2 Photographies aériennes et télédétection	— 11
7. Applications de la géologie au génie civil	— 13
7.1 Rôle du géologue.....	— 13
7.2 Méthodes.....	— 13
7.2.1 Levé de terrain	— 13
7.2.2 Étude structurale.....	— 13
7.2.3 Prélèvement et étude d'échantillons.....	— 13
7.3 Résultats de l'étude géologique	— 13
7.4 Tunnel sous la Manche	— 15
Pour en savoir plus	Doc. C 204

L'ingénieur de génie civil qui projette ou réalise un ouvrage se trouve nécessairement mis en présence du « terrain » qui constitue le support ou le matériau de cet ouvrage. Il est important pour lui de posséder des notions en Sciences de la Terre, afin de pouvoir dialoguer avec le géologue auquel il demande une intervention.

1. Qu'est-ce que la géologie ?

La géologie a pour objectif la reconstitution de l'histoire de la Terre depuis ses origines (l'âge des plus anciennes roches connues approche les 4 milliards d'années) jusqu'à nos jours par le biais de l'étude des matériaux constitutifs accessibles à l'observation.

Il s'agit d'une science récente dont les précurseurs furent Léonard de Vinci et Bernard Palissy aux XV^e et XVI^e siècles. Au passage du XVIII^e au XIX^e siècle, Hutton, Werner, Cuvier, Lamarck et Darwin lui donnèrent une nouvelle impulsion en introduisant les notions de plutonisme (distinction entre roches ignées et roches sédimentaires), de neptunisme (origine marine de tous les terrains, en raison de la présence de fossiles), de créations successives puis d'évolution. Wegener formule l'hypothèse de la dérive des continents au début du XX^e siècle, mais ce n'est que depuis une trentaine d'années que la tectonique des plaques ou tectonique globale a donné un cadre cohérent à beaucoup d'observations jusque là disparates.

La Terre a pratiquement la forme d'une sphère de 6 370 km de rayon, composée de couches concentriques (la croûte, le manteau, le noyau et la graine) dont la densité d augmente avec la profondeur de 2,3 à 12,5. La zone la mieux connue est la lithosphère : formée de la croûte et d'une partie du manteau supérieur, épaisse de 70 km (sous les océans) à 150 km (sous les continents), elle est considérée comme rigide et découpée en plaques mobiles qui flottent sur l'asthénosphère relativement visqueuse (figure 1).

Des courants de convection dans le manteau ont pour conséquence la mobilité des plaques et l'expansion des fonds océaniques ; l'affrontement entre deux plaques est à l'origine de la formation des chaînes de montagnes. La Terre est donc une planète en constante évolution, tant en profondeur, sous l'action des contraintes tectoniques internes dont séismes et volcans sont les manifestations les plus spectaculaires, qu'en surface par l'effet des agents atmosphériques qui façonnent le relief.

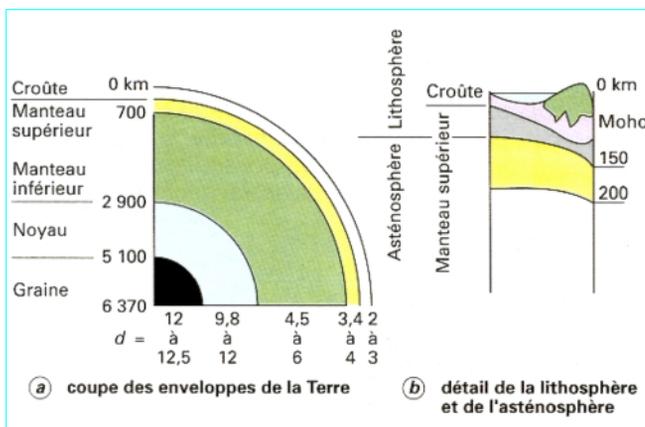


Figure 1 - Structure du globe terrestre

La géologie comprend classiquement trois domaines principaux :

- la **pétrographie**, qui s'appuie sur l'étude des minéraux (*minéralogie*) et des propriétés de l'état cristallin de la matière (*crystallographie*) pour décrire les roches ;

- la **stratigraphie** ou analyse de la succession des couches géologiques : elle s'appuie sur la connaissance de la nature des terrains (lithostratigraphie) et de leur contenu en fossiles (biostratigraphie) ; la *sédimentologie* s'intéresse aux conditions et à l'environnement des dépôts (climat régnant à l'époque...) ; la *paléontologie* étudie les fossiles d'origine animale ou végétale et permet de classer chronologiquement les formations ;

- la **tectonique** ou étude des déformations de la partie superficielle de la Terre, qui se traite de l'échelle du centimètre (microtectonique) à l'échelle du continent (tectonique globale).

En génie civil, l'étude d'un projet doit passer par la connaissance du terrain qui constitue soit le support (fondation) ou l'enveloppe (tunnel) de l'ouvrage, soit un matériau constitutif de celui-ci (granulats, enrochements) : comportement mécanique et hydraulique, caractère évolutif (altération), etc. Les phénomènes géodynamiques d'origine interne (sismicité) ou externe (instabilités de pentes, effondrements...) doivent également être pris en compte. La géologie du génie civil, ou géologie de l'ingénieur, s'est développée depuis une trentaine d'années [1].

2. Matériaux

Les roches, matériaux constitutifs de l'écorce terrestre, sont faites d'un assemblage de minéraux, qu'elles soient consolidées ou meubles. La pétrographie est l'étude de ces différents composants et de leurs relations mutuelles ; cette étude permet de reconstituer la genèse de la roche.

2.1 Minéraux

2.1.1 Généralités

Dans les roches, la matière peut se présenter sous deux états différents :

- l'état cristallin, le plus répandu : arrangement ordonné de la matière avec répétition périodique dans l'espace d'un atome ou d'un groupe d'atomes : le motif cristallin ;

- l'état amorphe, beaucoup plus rare, où les molécules sont disposées de façon désordonnée : cas des verres volcaniques, de l'opale ou de la calcédoine (les deux dernières étant des variétés de silice).

C'est vers 1800 que René-Just Haüy a jeté les bases modernes de la cristallographie, en introduisant la notion de maille élémentaire parallélépipédique. Par translation de cette maille dans trois directions, il est possible de remplir tout l'espace de manière à constituer un cristal. Ce dernier est généralement limité par des faces dont les directions correspondent aux plans qui contiennent le plus grand nombre d'atomes.

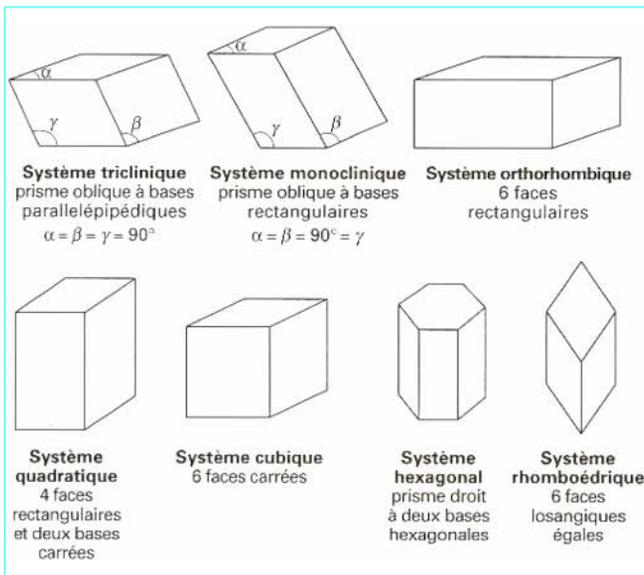


Figure 2 – Les sept systèmes cristallins

En fonction de la forme géométrique de la maille primitive, laquelle est étroitement liée à la présence d'éléments de symétrie, on dénombre 7 systèmes cristallins (figure 2). La symétrie du motif atomique est différente de celle du réseau périodique, de sorte que le nombre de classes de symétrie des cristaux s'élève à 32 (cf. article *Cristallographie géométrique* [A 1 305] dans le traité Sciences fondamentales).

Il existe plus de mille espèces cristallines. Les caractéristiques de chacune d'elles ont été mesurées et l'on s'y réfère pour identifier un cristal donné. Cette identification s'effectue comme suit :

- pour une dimension supérieure à quelques millimètres, on étudie la forme du cristal (classe de symétrie et angles), la couleur, l'éclat, la dureté (par rapport au verre et à l'acier), le clivage (aptitude à se casser suivant des plans particuliers), la densité ;
- pour un cristal de dimension inférieure, la détermination des minéraux se fait, sur une lame mince taillée dans la roche (figure 3), à l'aide du microscope polarisant (cf. article *Microscopie optique* [P 860] dans le traité Analyse et Caractérisation) qui permet en particulier d'apprécier l'indice de réfraction et, dans certains cas, de mesurer la biréfringence du cristal (différence entre les indices de réfraction extrêmes du cristal anisotrope) ;
- pour des minéraux de taille encore plus petite (quelques micromètres) on utilise la diffraction des rayons X sur poudre qui permet d'obtenir les dimensions de la maille élémentaire (quelques angströms).

Dans le microscope électronique à balayage, le bombardement d'électrons sur un fragment de roche fournit une image précise de la forme des cristaux et de leurs imperfections (figure 4). Un spectre d'éléments chimiques en chaque point de la surface de l'échantillon peut également être obtenu.

2.1.2 Principales espèces minérales

Parmi toutes les espèces minérales, seul un petit nombre est très répandu. Neuf éléments (O, Si, Al, Fe, Ca, Na, Mg, K, Ti) représentent à eux seuls 99 % de la composition pondérale de l'écorce terrestre et du manteau.



Les quartz sont en clair ou gris bleuté, les feldspaths en gris-brun et les micas en couleurs irisées ou en marron, (les cristaux ont 1 ou 2 mm de diamètre).

Figure 3 – Lame mince, vue en lumière polarisée, dans le granite du Hinglé (photo LCPC)



Figure 4 – Cristaux de kaolinite empilés en feuillets, vus au microscope électronique à balayage

Les **silicates et aluminosilicates** (quartz, feldspaths, micas, amphiboles, pyroxènes, olivines, argiles) sont caractérisés par le motif élémentaire tétraédrique composé d'un atome Si au centre et d'atomes O aux quatre sommets, les tétraèdres étant reliés entre eux par des cations ou par des atomes O en commun. Le quartz (SiO_2), le plus dur des minéraux courants, est formé d'un édifice compact de tétraèdres SiO_4 , chaque atome O étant partagé entre deux tétraèdres. Les aluminosilicates présentent des substitutions partielles de Si par Al dans les tétraèdres.

Avec les silicates d'alumine, dans lesquels les tétraèdres SiO_4 sont unis par des atomes d'aluminium (andalousite, sillimanite, disthène) et les silicotitanates, ils forment les constituants essentiels des roches magmatiques et métamorphiques qui composent 95 % de la lithosphère.

Les **carbonates**, les **sulfates**, et les **phosphates** sont les constituants majeurs des roches sédimentaires ; du premier groupe, on retiendra la calcite – CaCO_3 – et la dolomite – $(\text{Ca, Mg})(\text{CO}_3)_2$. Les **sulfures**, **oxydes** et **hydroxydes** sont abondants dans les gîtes métalliques.

2.1.3 Minéraux argileux

Les propriétés physiques et mécaniques de la plupart des sols fins sont conditionnées par leur contenu en minéraux argileux.

Les minéraux argileux [2] sont des aluminosilicates hydratés à structure lamellaire (feuillet). Les feuillets à deux couches se composent de la superposition d'une couche de tétraèdres, unis entre eux par les trois sommets d'une base, et d'une couche d'octaèdres $Mg(OH)_2$ ou $Al(OH)_3$. Les feuillets à trois couches possèdent une couche tétraédrique supplémentaire (figure 5).

Des substitutions sont possibles dans les couches tétraédriques et octaédriques : remplacement de Si^{4+} par Al^{3+} , de Al^{3+} par Fe^{2+} , Fe^{3+} ou Mg^{2+} . En fonction de ces substitutions et de la charge négative obtenue, divers cations (K^+ , Na^+ , Ca^{++}) se placent entre les feuillets.

La classification des argiles permet de les diviser en monophyllites, constituées d'un seul type de feuillet, ou en polyphyllites formées de l'empilement de différents types de feuillets (interstratifiés).

Les argiles monophylliteuses peuvent être divisées en trois grands groupes d'après l'épaisseur des feuillets :

- le groupe de la kaolinite (figure 4) : feuillets de 0,7 nm d'épaisseur, à deux couches unies par les atomes d'oxygène. L'halloysite est une forme hydratée de la kaolinite (espacement des feuillets de l'ordre de 1 nm) ;
- le groupe de l'illite : feuillets de 1 nm d'épaisseur, à trois couches unies par des liaisons fortes ;
- le groupe des smectites (montmorillonite en particulier) : feuillets d'épaisseur variable autour de 1,5 nm faiblement liés, de sorte qu'ils sont capables d'absorber une grande quantité d'eau en gonflant. Les cations étant plus mobiles, des échanges sont possibles avec le fluide environnant, et les propriétés mécaniques du sol peuvent en être affectées.

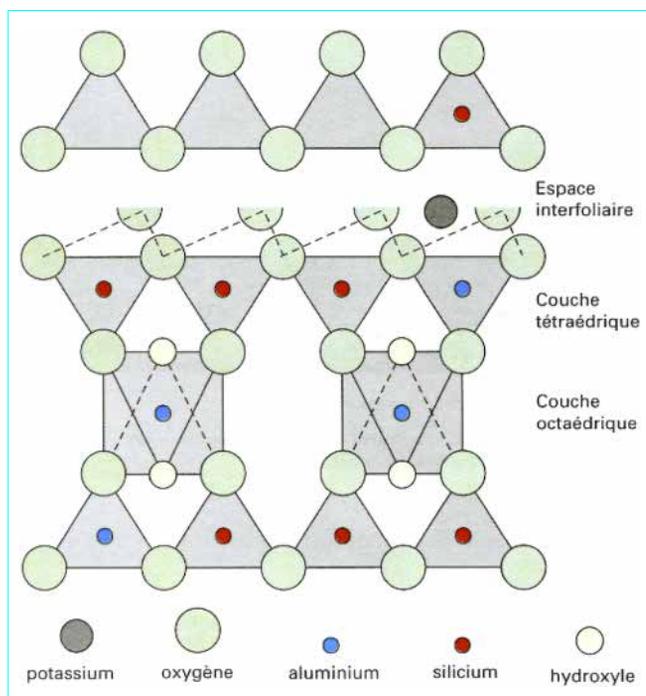


Figure 5 – Feuillet de type illite, à 2 couches tétraédriques et 1 couche octaédrique (d'après A. Le Roux, LCPC)

2.2 Roches

La description d'une roche se fait à plusieurs échelles. Au niveau de l'affleurement, on étudie l'homogénéité et le débit de la roche ; ce dernier correspond à la fracturation du massif et, éventuellement, à son litage pour les roches sédimentaires. À l'échelle de l'échantillon, la structure ou fabrique désigne la taille, la forme des grains et leurs relations spatiales. Au niveau du minéral, on observe la structure du cristal (zonation, déformation...).

Les roches sont classées, selon de nombreux critères, en différents groupes dont les principaux sont donnés ci-après. On distingue les roches exogènes (sédimentaires et résiduelles) formées à la surface de l'écorce terrestre, et les roches endogènes (magmatiques et métamorphiques) issues des profondeurs.

2.2.1 Roches sédimentaires

Représentant 75 % de la surface émergée, elles résultent de l'accumulation de fragments, débris de roche ou de coquille, et/ou de la précipitation à partir de solutions, donnant respectivement des roches détritiques, biogènes et physico-chimiques. L'étude des conditions de dépôt et des processus de sédimentation relève de la *sédimentologie* [3] ; une étude sédimentologique peut être nécessaire pour expliquer certaines propriétés des roches (anisotropie, hétérogénéité, par exemple).

Les roches sédimentaires se présentent en strates issues des dépôts successifs, et leur aspect actuel résulte de la diagenèse, c'est-à-dire d'une transformation d'un dépôt meuble en roche plus ou moins cohérente.

Les **roches détritiques**, composées d'au moins 50 % de débris (fragments de roches et/ou de minéraux) provenant de l'érosion d'un continent, sont classées selon leur granularité, selon la forme et la nature des grains, et selon le degré de cimentation (tableau 1).

Tableau 1 – Classification des roches détritiques

Dimension de la majorité des grains	Roche consolidée	Roche meuble
> 2 mm	Conglomérat. Brèche	Graviers. Blocs
63 μ m à 2 mm	Grès	Sable
2 μ m à 63 μ m	Siltite	Limon
< 2 μ m	Argilite	Argile

Le ciment des grès et conglomérats a une grande importance car il intervient dans la résistance de la roche : les grès vosgiens, par exemple, contiennent des oxydes de fer qui gonflent en s'hydratant et font éclater la roche.

Les roches argileuses possèdent au moins 50 % de minéraux argileux associés à d'autres minéraux d'origines diverses. Ce sont des roches tendres, souvent plastiques, parfois litées, varvées et intercalées dans d'autres couches sédimentaires. Elles proviennent en grande partie de l'altération de roches métamorphiques ou magmatiques (argiles héritées) ; cependant, elles peuvent être néoformées dans le bassin sédimentaire et appartenir, dans ce cas, au groupe des roches physico-chimiques. Du fait de leur imperméabilité, elles jouent un rôle important dans les circulations et les mises en charge de fluides.

■ Les **roches biogènes**, en général calcareuses, sont formées de débris de tests d'organismes (oursins...) et de squelettes (coraux...) ; un exemple est la craie, composée de calcite souvent pure, formée de morceaux de tests de quelques dizaines de micromètres. Certaines roches siliceuses (diatomites et radiolarites) sont également biogènes.

■ Le groupe des **roches d'origine physico-chimique** comprend essentiellement des roches carbonatées (calcaires, dolomies et marnes) et sulfatées (gypse et anhydrite).

● Roches carbonatées

Formées d'au moins 50 % de carbonates (calcite, dolomite), elles représentent 20 % des roches sédimentaires, couvrent de grandes surfaces sur les continents et ont une grande importance pratique.

Les **calcaires** représentent l'essentiel des roches carbonatées. Ils contiennent au moins 50 % de CaCO_3 , et font donc effervescence avec l'acide dilué (HCl à 10 %). Leur solubilité dans l'eau est à l'origine des réseaux et cavités karstiques.

Résultant généralement de l'accumulation de squelettes et/ou de coquilles calcaires (bivalves, foraminifères, etc.) cimentés par une précipitation chimique ou biochimique, ils sont, en fait, à cheval sur les groupes des roches biogènes et physico-chimiques.

Leur classification peut être fondée :

- sur la proportion de calcite et de dolomite : calcaires purs, magnésiens ou dolomitiques ;
- sur le milieu de dépôt : marin, lacustre, fluviatile ;
- selon la taille du grain : micritique, lithographique... ;
- selon la structure : calcaire massif, lité, oolithique, pisolitique... ;
- selon la nature et l'importance des fossiles : calcaires à entroques, à polypiers, à foraminifères (figure 6), lumachelliques... ;
- selon la nature des impuretés : calcaires gréseux, marneux...

Les **dolomies** contiennent plus de 50 % de dolomite (carbonate double de calcium et magnésium). On distingue les dolomies primaires issues de la précipitation directe de la dolomite en milieu lagunaire sous climat tropical, et les dolomies secondaires, les plus abondantes, dues à la substitution de la calcite des calcaires par de la dolomite.

Les **marnes** sont intermédiaires entre les calcaires et les argiles. Leur comportement mécanique dépend de la proportion d'argile, mais aussi de leur structure et de la nature des minéraux argileux.

● Roches sulfatées

Le **gypse**, sulfate de calcium hydraté, et sa forme anhydre (l'anhydrite) sont les constituants principaux des roches évaporitiques. La forte solubilité de ces roches dans l'eau (2,5 g/l) en fait des matériaux à risque en raison de la possibilité de développement d'importantes cavités souterraines, susceptibles de s'effondrer quand elles sont proches de la surface (cas du Trias provençal, par exemple).



Les nummulites ont un diamètre de l'ordre de 1 cm

Figure 6 – Section polie de calcaire à nummulites du Lutétien du Bassin parisien (photo LCPC)

● Roches siliceuses

Elles se présentent sous la forme de niveau siliceux ou d'accidents siliceux formés d'opale ou de calcédoine (meulières, silex, chailles). Ce sont des roches très résistantes et très abrasives.

2.2.2 Roches résiduelles

L'altération météorique des masses rocheuses sous différents climats transforme progressivement, par des processus de lessivage, d'hydratation, etc., les roches affleurantes et laisse sur place de nouveaux types de roches, dites résiduelles, tels que les sols (au sens pédologique), les bauxites et les argiles résiduelles.

Le facteur essentiel de l'altération chimique est l'eau qui intervient selon divers processus en fonction du climat et du type de roche : **oxydation** du fer ferreux en fer ferrique pour les silicates et les sulfures, **hydratation** des oxydes de fer, de l'anhydrite, accompagnée d'une augmentation de volume, ou **dissolution** du gypse, des carbonates et des cations des silicates. L'altération des minéraux se fait dans l'ordre de fragilité décroissante : les ferromagnésiens (olivine, pyroxènes) étant attaqués en premier et le quartz en dernier, les gabbros seront donc plus facilement altérés que les granites.

Les variétés de sols sont fonction du type de climat et de la roche mère. Des régions froides vers les pays tropicaux humides, nous passons des podzols aux sols bruns riches en matière organique, puis aux croûtes calcaires (pays périméditerranéens) et aux sols ferrallitiques à hydroxydes de fer et aluminium qui forment les carapaces latériques.

Les bauxites, qui constituent des minerais d'aluminium (au moins 40 % Al_2O_3), se développent en milieu tropical humide aux dépens de tous les types de roches mères alumineuses (magmatiques, métamorphiques ou sédimentaires).

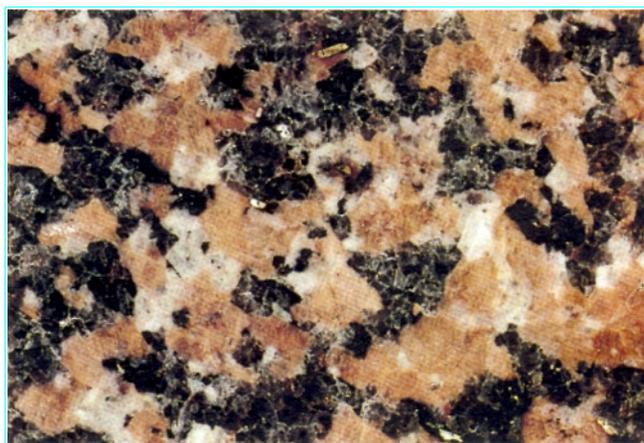
Les argiles résiduelles sont des roches restées sur place après lessivage ou altération des formations d'origine (argiles de décalcification par exemple).

2.2.3 Roches magmatiques

Elles résultent de la cristallisation de magmas à différentes profondeurs de l'écorce terrestre. Les roches **volcaniques** à structure vitreuse ou microlithique (gros cristaux noyés dans une pâte amorphe) cristallisent rapidement à la surface et les roches **plutoniques** à structure grenue (assemblage de cristaux visibles à l'œil nu, voir figure 3) cristallisent très lentement à quelques kilomètres de profondeur. Certaines roches telles que les roches filoniennes ont une structure intermédiaire dite microgrenue (gros cristaux dans une masse de petits cristaux visibles seulement au microscope).

La nature du magma, acide (c'est-à-dire riche en silice), basique (pauvre en silice) ou intermédiaire, détermine le type de roche (tableau 2). Les roches grenues les plus courantes sont les **granites** constitués principalement de quartz, de feldspaths et de micas (figure 7), puis les **diorites** à plagioclases (feldspaths calco-alcalins), amphiboles, biotites et rares quartz, et les **gabbros** à plagioclases, pyroxènes et olivine.

Tableau 2 – Nomenclature des roches magmatiques les plus répandues		
Type de magma	Roche plutonique	Roche volcanique
Acide	Granite	Rhyolite
Intermédiaire	Diorite	Andésite
Basique	Gabbro	Basalte



Les quartz apparaissent en gris foncé, les feldspaths en rose ou blanchâtre, les micas en noir (les cristaux de feldspaths sont de taille centimétrique)

Figure 7 – Section polie du granite de Ploumanach



La foliation est soulignée par les cristaux de feldspath en forme d'amande (taille centimétrique) et par des lits de micas noirs (biotite)

Figure 8 – Section polie du gneiss œillé de Bonneval (Savoie)
(photo LCPC)

Leurs équivalents microgrenus sont, respectivement les **microgranites**, les **microdiorites** et les **microgabbros** (dolérites) tandis que les roches microlithiques correspondantes (laves) sont les **rhyolites**, les **andésites** et les **basaltes**. Ces derniers forment plus de 90 % des laves continentales et océaniques.

2.2.4 Roches métamorphiques

Ce sont des roches formées sans fusion à partir de roches préexistantes (sédimentaires ou magmatiques), sous l'influence de hausses de température et/ou de pression qui provoquent le *métamorphisme* : cristallisation de nouveaux minéraux par réactions chimiques à l'état solide, accompagnée souvent d'une modification de la structure originelle (schistosité et foliation des micaschistes et gneiss œillés, figure 8).

On distingue deux grands types de métamorphisme :

— le **métamorphisme général**, lié à l'enfouissement progressif des couches qui produit une élévation de température et de

pression. Les roches obtenues dépendent de la composition initiale : les quartzites, gneiss et leptynites dérivent de grès, d'arkoses ou de rhyolites ; les micaschistes et les gneiss dérivent d'argiles et de pélites ; les marbres dérivent de calcaires ou de dolomies ;

— le **métamorphisme de contact**, qui affecte les terrains traversés par l'intrusion d'un corps magmatique à l'état liquide. Le rôle de l'élévation de température et sa durée est primordial. La zone métamorphisée dessine autour du massif intrusif une auréole de métamorphisme de contact, de largeur décimétrique à kilométrique, et dont l'intensité décroît vers la périphérie : les cornéennes passent progressivement aux schistes tachetés.

La plupart des roches métamorphiques sont anisotropes du point de vue mécanique (vitesse du son, résistance) en raison de la foliation qui les caractérise (orientation des micas, principalement).

3. Structures tectoniques

Les déformations subies par l'écorce terrestre au cours des phases orogéniques sont visibles aujourd'hui dans les structures dites tectoniques [4] [5]. Schématiquement, on distingue les déformations discontinues (tectonique cassante) et les déformations continues (tectonique souple).

3.1 Diaclases et fentes

Les **diaclases** sont des discontinuités sans déplacement relatif, d'extension métrique à décimétrique, d'espacement métrique et d'ouverture variable. Le réseau de diaclases est souvent à peu près perpendiculaire aux strates des roches sédimentaires. Leur origine est tectonique, mais il faut citer aussi les fractures de retrait liées au refroidissement des roches volcaniques.

Jointives aux extrémités, les **fentes** présentent souvent une allure sigmoïdale. Les ouvertures se font par traction sous contrainte parallèle à leur direction. Elles sont comblées par des cristallisations, souvent de calcite, croissant perpendiculairement à leurs lèvres.

3.2 Schistosité

La schistosité est un feuilletage plus ou moins intense, acquis sous l'influence de contraintes tectoniques, qui, dans certains cas, oblitère complètement la stratification quand il s'accompagne de dissolutions et recristallisations : la foliation des micaschistes et des gneiss est due à l'alternance de feuilletés micacés et quartzo-feldspathiques qui confèrent à la roche son aspect rubané. Plusieurs familles de plans de schistosité peuvent coexister, correspondant à autant d'épisodes de déformations.

3.3 Failles

Ce sont des fractures avec déplacement relatif des compartiments. Les surfaces de glissement ou miroirs de failles sont généralement striées et permettent de déterminer le sens du déplacement, fonction de la direction de raccourcissement générale Z.

Les différents types de failles, caractérisés par le mouvement relatif des compartiments, sont les suivants (figure 9) : **verticale** (compartiment effondré selon un plan vertical), **normale** (allongement horizontal, Z verticale), **inverse** (compression et raccourcissement, Z horizontale), **décrochement** (compression avec coulissage horizontal, Z horizontale). Le rejet désigne l'amplitude du déplacement relatif.

Les traces du mouvement sont inscrites sur le plan de faille (miroir). Un coulissage est dextre quand le compartiment observé

se déplace vers la droite, sénestre quand le déplacement se fait vers la gauche. Un décrochement a fréquemment aussi une composante verticale.

La dimension des failles va du mètre à la centaine de kilomètres (on parle alors de linéaments structuraux) ; le rejet varie de quelques centimètres à plusieurs centaines de mètres.

Les failles sont généralement remplies de roches broyées ou de matériaux argileux de mauvaise qualité, et constituent des plans de faiblesse du massif. Comme les diaclases, elles sont souvent le siège d'importantes circulations d'eau, en particulier celles qui sont parallèles à la direction de la contrainte principale, qui auront tendance à s'ouvrir et à constituer des drains privilégiés.

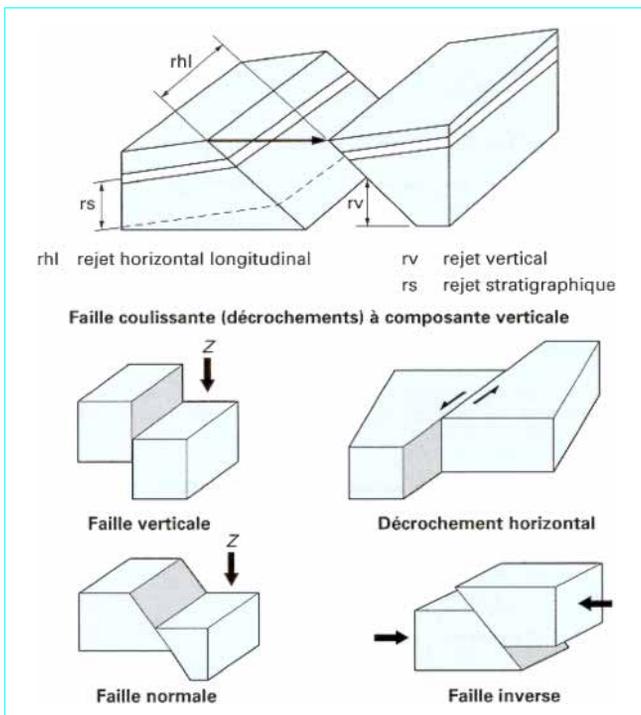


Figure 9 - Différents types de failles

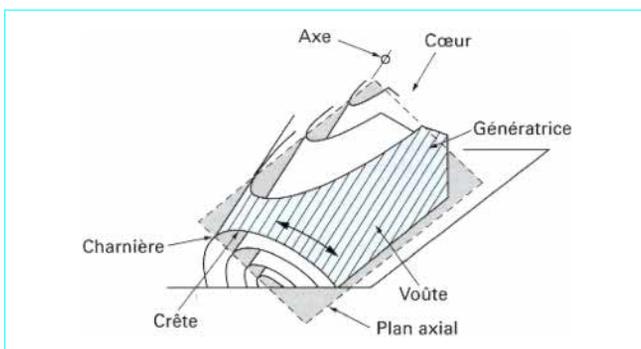


Figure 10 - Description d'un pli (lignes et surfaces remarquables)

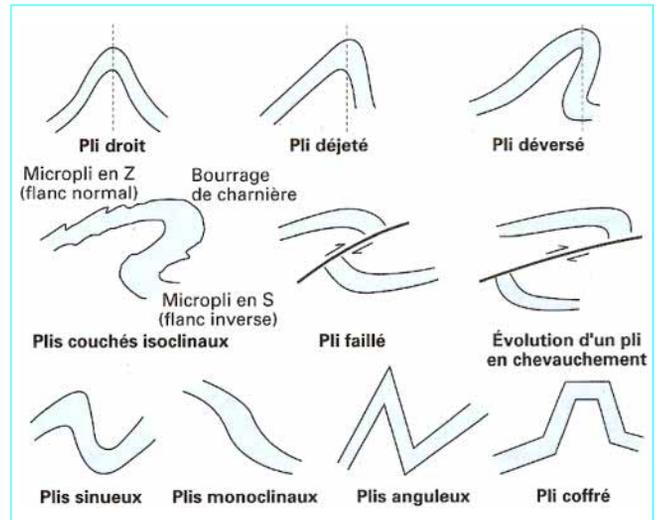


Figure 11 - Différents types de plis

3.4 Plis

La tectonique souple règne en profondeur, dans des conditions de pression et de température où la plupart des roches deviennent plastiques et se déforment avec le temps.

Les plis sont caractérisés par des lignes et surfaces remarquables (figure 10) : la **charnière** (zone d'inflexion maximale), l'**axe** (axe d'enroulement de la charnière), la **surface axiale** (contient toutes les charnières des surfaces plissées), le **cœur** du pli, qui est opposé à la **voûte**. Les différents types de plis sont définis d'après leur géométrie, elle-même conditionnée par la nature du terrain et par l'orientation des directions de contraintes principales (figure 11). L'amplitude des plis est très variable, du centimètre à plusieurs kilomètres (figure 12).

Les formes les plus fréquentes sont les formes anticlinales et synclinales, selon que, respectivement, le terrain le plus ancien ou le plus récent se trouve au cœur du pli, l'axe pouvant être indifféremment horizontal, vertical ou incliné.

Les couches plastiques alternant avec des roches compétentes se laminent ou donnent des bourrages (disharmonies, diapirs tectoniques). Un pli-faillé peut évoluer vers un chevauchement de terrain et par l'orientation des directions de contraintes principales (figure 11). L'amplitude des plis est très variable, du centimètre à plusieurs kilomètres (figure 12).

4. Le temps en géologie

4.1 Méthodes de datation

On distingue les méthodes de datation purement relatives et les méthodes de datation absolue.



a) pli couché, de taille hectométrique



b) microplis à axe horizontal matérialisé par le crayon

Figure 12 – Exemples de plis

4.1.1 Datation relative

Elle est basée sur les principes suivants utilisés en stratigraphie :

— **superposition** : la couche la plus récente surmonte les autres, sauf, bien sûr, si un événement tectonique (pli, chevauchement) est venu perturber l'ordonnement initial des couches ;

— **continuité** : les couches ont le même âge sur toute leur étendue ; à noter que des variations latérales de faciès sont toujours possibles : passage progressif d'un type de sédiment à un autre du même âge, en fonction d'une variation des conditions de dépôt (approfondissement du bassin, éloignement de la zone d'apports, etc.) ;

— **antériorité** : une formation recoupée par un corps intrusif (granite, cheminée volcanique, filon...) est antérieure à la mise en place de ce dernier ;

— **identité paléontologique** : les couches qui possèdent un fossile ou une association de fossiles spécifiques d'une période donnée sont de même âge.

L'application de ces principes permet de classer dans le temps les événements géologiques : sédimentation, fracturation, plissement, émergence, subsidence, etc. (figure 13).

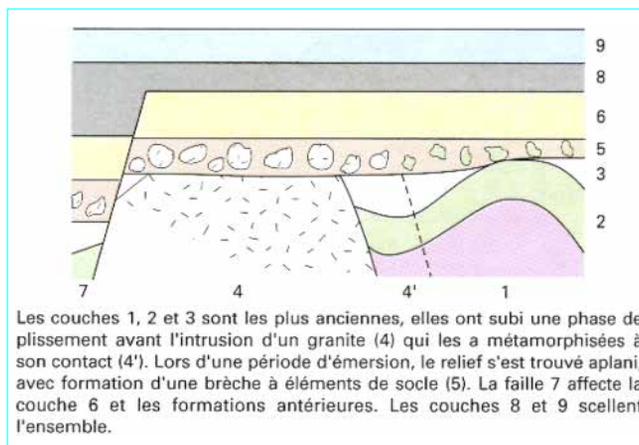


Figure 13 – Principes de superposition et d'antériorité

4.1.2 Datation absolue

Elle est basée sur diverses méthodes parmi lesquelles la radiochronologie est la plus répandue. Celle-ci est fondée sur la propriété pour chaque élément radioactif de se transformer spontanément (transmutation) en un autre élément d'une façon caractéristique et constante ; la quantité transformée (dN) dans un espace de temps (dt) dépend de la quantité initiale (N) :

$$dN = -\lambda N dt$$

avec λ constante de désintégration.

Les méthodes les plus pratiquées actuellement sont celles de l'uranium-plomb, du thorium-plomb, du rubidium-strontium, du potassium-argon et du carbone 14.

La résonance de spin électronique est basée sur le phénomène de l'irradiation naturelle par des éléments radioactifs. La quantité d'électrons piégés dans les défauts des tests carbonatés marins est proportionnelle à la dose d'irradiation reçue depuis sa formation. La mesure de cette quantité rapportée à la dose annuelle naturellement piégée permet d'évaluer l'âge du fossile.

La thermoluminescence utilise une technique voisine qui mesure la quantité d'électrons piégés dans la structure cristalline des grains de sable éolien enfouis dans des sédiments. Par chauffage, les pièges à électrons se déchargent en émettant une luminescence dont l'intensité est proportionnelle à la dose emmagasinée, donc au temps d'enfouissement du grain de sable.

Certaines méthodes sont spécifiques des époques anciennes (au-delà de dix millions d'années), d'autres, comme le carbone 14, la thermoluminescence et la résonance de spin électronique permettent de dater des formations ou des objets plus récents (figure 14).

4.2 Reconstitution de l'histoire de la Terre

La Terre, dont l'origine remonte à quelque 4,6 milliards d'années, possède une histoire complexe, dont les événements sont repérés, selon les principes de la chronologie relative, à l'aide de l'échelle stratigraphique. La construction de celle-ci est fondée sur des arguments sédimentologiques, paléontologiques et tectoniques. Les différentes coupures de temps utilisées sont les suivantes :

— l'unité élémentaire est la **biozone** qui correspond à l'ensemble des strates dans lesquelles un fossile caractéristique a vécu sans changer de caractères ;

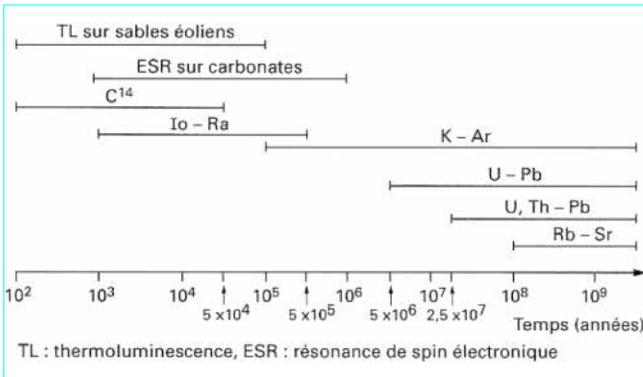


Figure 14 - Plages d'utilisation de quelques méthodes de datation absolue

— l'**étage** est défini par un contenu faunistique déterminé dont le type est pris dans un site précis nommé le stratotype (Turonien de Tours par exemple) ;

— la **période** ou **système** est une coupure d'ordre supérieur définie par des cycles sédimentaires importants marqués par trois phases principales : la transgression (avancée de la mer sur le continent), la sédimentation puis la régression (retrait de la mer). Les périodes portent le nom d'une région (Jurassique), d'une formation particulière (Carbonifère) ou d'un genre de fossile particulier (Nummulitique). Le système peut être divisé en sous-systèmes (Lias, Éocène, par exemple) ;

— la coupure d'ordre le plus élevé correspond à l'**ère** dont la définition repose sur des arguments stratigraphiques, paléontologiques (grands changements de faune ou de flore) ou orogéniques.

Cinq ères se sont succédées depuis les origines de la Terre jusqu'à nos jours (tableau 3), sommairement décrites ci-après.

Le Précambrien, de l'origine de la planète à - 550 millions d'années, voit l'apparition des premières traces fossiles (structures algaires) vers - 2,5 milliards d'années. En France, il est représenté dans le Massif central et le Massif armoricain sous forme de terrains métamorphiques en bonne partie.

Tableau 3 - Principales divisions des temps géologiques

Âge (millions d'années)	Ère	Période	Orogenèse
2	Quaternaire	Holocène Pléistocène	
65	Cénozoïque (Tertiaire)	Néogène Paléogène	Cycle
250	Mésozoïque (Secondaire)	Crétacé Jurassique Trias	alpin
600	Paléozoïque (Primaire)	Permien Carbonifère Dévonien Silurien Ordovicien Cambrien	Cycle hercynien Cycle calédonien
	Précambrien	Protérozoïque Archéen	Nombreuses phases orogéniques

L'**ère primaire ou Paléozoïque**, de - 550 à - 250 millions d'années, est divisée en six périodes. Sur le plan paléontologique, elle est caractérisée par la présence des trilobites (arthropodes marins primitifs) qui disparaîtront avant l'ère secondaire, et surtout par la conquête du milieu aérien par les premiers végétaux terrestres (flore houillère) et par les premiers vertébrés vers la fin du Paléozoïque inférieur. En France, les terrains primaires affleurent largement dans les Alpes, les Pyrénées, le Massif central, le Massif armoricain, les Vosges et les Ardennes.

L'**ère secondaire ou Mésozoïque**, de - 250 à - 65 millions d'années, comprend trois périodes : le Trias, le Jurassique et le Crétacé. Elle voit l'apparition des angiospermes, des mammifères et des oiseaux, et l'apogée des gymnospermes et des grands reptiles (dinosaures). Elle se termine avec la disparition des ammonites et des dinosaures. En France, le développement maximal de ces formations concerne le bassin de Paris, le bassin d'Aquitaine, le Jura et les Alpes.

L'**ère tertiaire ou Cénozoïque**, de - 65 à - 2 millions d'années, comprend deux systèmes : le Paléogène (Éocène et Oligocène) et le Néogène (Miocène et Pliocène). Elle est remarquable par sa richesse paléontologique et, en particulier, par l'explosion du groupe des mammifères qui supplantent les grands reptiles. En France, le comblement des bassins de Paris et d'Aquitaine s'achève au Tertiaire ; de fortes épaisseurs se déposent également dans les sillons rhodanien et rhénan, et dans la Limagne. L'orogénèse alpine, qui se poursuivra au Quaternaire, forme les Alpes, le Jura, les Pyrénées.

L'**ère quaternaire**, de - 2 millions d'années à nos jours, fut désignée à tort sous le terme d'Anthropozoïque car les origines de l'homme semblent remonter à près de 5 millions d'années. Elle est divisée en deux parties : le Pléistocène qui correspond aux périodes glaciaires et l'Holocène ou période post-glaciaire (de - 10 000 ans à aujourd'hui).

Dans une région donnée, en simplifiant à l'extrême, l'histoire géologique peut donc se résumer à une succession de périodes de sédimentation marine, de phases tectoniques souvent accompagnées de métamorphisme, de surrections et d'émersions, suivies d'érosion continentale, puis de retour de la mer (ou transgression, figure 15), etc.

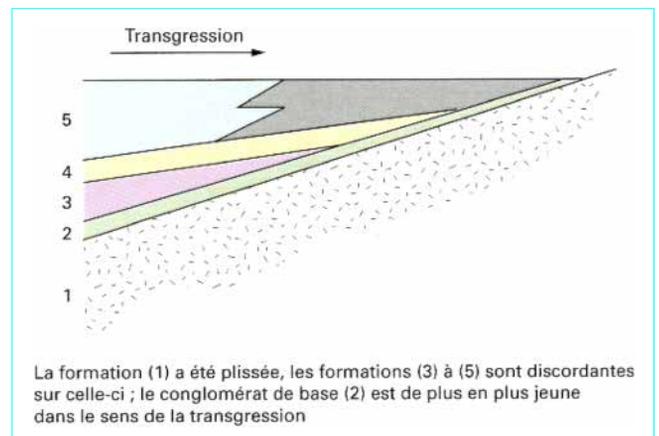


Figure 15 - Schéma de transgression marquée par une discordance angulaire

5. Importance de la géologie du Quaternaire

Pour les projets de génie civil, les événements géologiques récents (soit depuis le début du Quaternaire, environ) sont d'une grande importance. D'une part, les formations quaternaires sont pour la plupart situées à l'interface lithosphère-atmosphère et donc les ouvrages les rencontrent presque toujours ; nous « héritons » en particulier de formations issues de périodes où le climat était fort différent du nôtre : dépôts glaciaires, par exemple. D'autre part, les processus d'évolution actifs à la surface du globe peuvent poser des problèmes de sécurité aux personnes ou de stabilité aux ouvrages ; or les processus actifs aujourd'hui, éruptions volcaniques ou séismes par exemple, l'ont presque toujours été également dans un passé géologique récent, et peuvent donc être étudiés par les méthodes de la géologie.

5.1 Formations superficielles

Les sédiments quaternaires continentaux constituent bien souvent une couche de dépôts meubles reposant sur un substratum plus ancien. Nous pouvons distinguer deux types de formations superficielles [6] : les formations présentant un lien avec le substrat ou autochtones et les formations sans parenté avec ce dernier ou allochtones.

5.1.1 Formations apparentées avec le substrat

Les **roches résiduelles** sont issues de modifications du substratum sous l'effet d'agents climatiques, biologiques et/ou chimiques. Les mécanismes mis en jeu lors de l'altération sont la gélifraction, la thermoclastie (écarts thermiques) et les processus chimiques (dissolution et hydrolyse).

En France métropolitaine, les roches résiduelles, ou altérites, les plus répandues, sont les arènes sur roches magmatiques grenues (figure 16), les argiles et sables de décarbonation, les argiles à silex sur la craie, les concentrations ferrugineuses, etc.

Les **formations de versant** résultent des forces gravitaires qui s'exercent sur les matériaux du versant, avec plus ou moins d'efficacité selon la nature et la structure du substrat, le climat, la végétation, les mouvements tectoniques. Le transport des matériaux se fait avec intervention de l'eau par ruissellement, reptation, glissement en masse et coulées boueuses, ou sans intervention de l'eau par chutes de blocs et écroulements de falaises.

Les principaux types de dépôts de versant sont les éboulis, les grèzes litées, les colluvions, les moraines de névés en haute montagne, les loupes de glissement, les cônes de déjection, etc.

5.1.2 Formations sans parenté avec le substratum

Ces formations résultent du transport de particules par les glaces, l'eau ou le vent.

Les **formations glaciaires** les plus typiques sont les moraines, latérales ou frontales, des glaciers actuels ou datant des dernières périodes glaciaires (Würm pour la plus récente, soit de - 80 000 à - 10 000 ans). Plus généralement, on appelle **tills**, en langage international, les dépôts d'origine glaciaire, caractérisés par une forte hétérométrie des éléments constitutifs qui vont des gros blocs aux argiles.

Les **alluvions** sont les dépôts d'origine fluviale. Elles constituent la première source de granulats et le principal réservoir d'eau exploitable.

Les éléments transportés par l'eau courante, arrondis du fait de l'usure lors de leur transport, forment des dépôts, classés en fonction de la compétence du courant, qui s'organisent dans des cônes alluviaux et dans des chenaux, uniques ou anastomosés. La nature des matériaux déposés est fonction des provinces traversées. La sédimentation, contrôlée par des facteurs tectoniques (soulèvement ou affaissement local) et climatiques (fluctuation des paramètres hydrologiques) présente dans les vallées une répartition en terrasses emboîtées ou étagées (figure 17).

Les épandages fluviaux quaternaires sont généralement peu épais (10 à 20 m maximum), sauf dans les zones subsidentes que constituent les cours inférieurs de certains fleuves et les deltas (delta du Rhône, plaine du Pô : plus de 1 000 m de sédiments par endroits).

Les **vases** sont des sédiments meubles, fins, plastiques, constitués :

- de grains détritiques (quartz, feldspaths, micas, débris coquilliers), très fins (quelques μm pour la plupart) ;
- d'hydroxydes ou de sulfures ;
- de matière organique (grains de pollen, débris végétaux, etc.).

La teneur en eau peut atteindre 300 %. Une texture maillée confère aux vases une forte compressibilité et des propriétés thixotropiques.

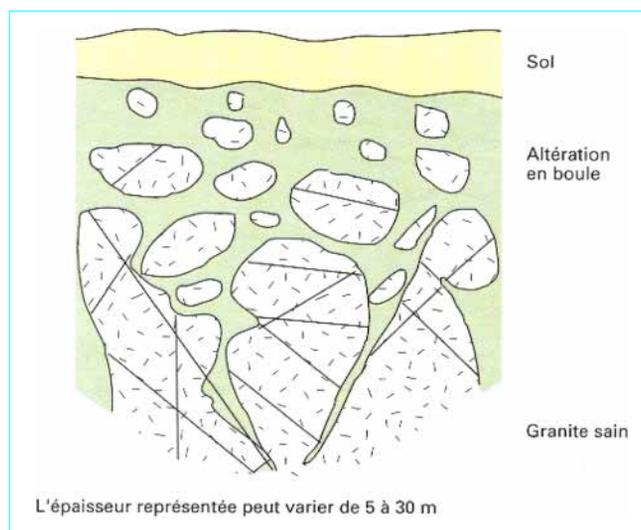


Figure 16 – Profil d'altération sur granite

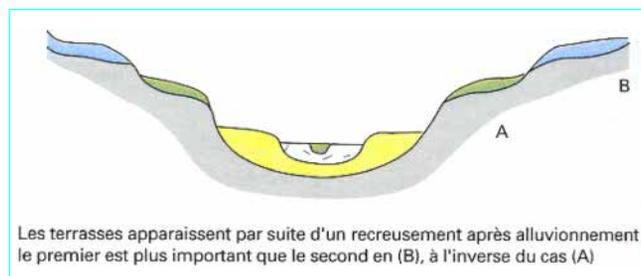


Figure 17 – Terrasses alluviales emboîtées (A) et étagées (B)

Ce sont des sédiments quaternaires et actuels que l'on rencontre dans les estuaires, polders, marais côtiers et lacs. Les vases riches en matière organique s'apparentent aux tourbes formées par l'accumulation de débris végétaux.

Les **loess** sont des sédiments éoliens formés pendant les périodes glaciaires. Ce sont des dépôts limoneux issus des zones périglaciaires dénudées. Leur épaisseur ne dépasse pas quelques mètres en France.

5.2 Géodynamique

Les agents responsables du façonnement du relief (dont l'étude relève de la *géomorphologie*) peuvent être d'origine externe : l'altération superficielle (agents physiques et chimiques), les modes de transport en masse (éboulements, glissements, laves torrentielles), les eaux courantes, les actions littorales, l'action éolienne et celle des glaciers.

D'origine interne, les manifestations volcaniques et la *néotectonique* participent également au modelage du relief. Le surcreusement des vallées (soulèvement régional), la formation d'escarpements sur failles actives, la déviation de thalwegs sont des phénomènes consécutifs au rajeunissement des chaînes de montagnes.

Les concepteurs de projets auront à en tenir compte car l'édification de montagnes comme les Alpes ou le Jura, qui n'est pas terminée, s'accompagne de secousses sismiques et est à l'origine de glissements de terrain ou d'éboulements rocheux. Le creusement d'une vallée ou le retrait glaciaire conduisent à une détente des contraintes et à l'élargissement des discontinuités dans les versants, souvent à l'origine d'instabilités de grande ampleur.

6. Outils de base du géologue

Toute étude géologique commence par l'examen de la documentation disponible. Deux sources sont fondamentales : la carte géologique et la photographie aérienne.

6.1 Cartes et coupes géologiques

La carte géologique est une carte topographique sur laquelle sont reportées en couleur des informations sur les terrains de surface (lithologie, âge) et sur les structures.

La carte géologique comprend deux documents :

- la carte proprement dite, assortie d'une légende géologique, qui donne la signification des différentes couleurs et signes employés, et d'une légende technique (matériaux exploités, carrières, sources, etc.) ;
- la notice explicative qui contient un aperçu géographique et géologique, la description détaillée des différents terrains (échelle stratigraphique), un résumé de l'histoire tectonique régionale, des indications sur les ressources du sous-sol (hydrogéologie, mines, carrières), et une documentation générale.

La France, totalement couverte par des coupures à l'échelle 1/80 000, l'est maintenant presque entièrement par des cartes à l'échelle 1/50 000 publiées par le BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières). Localement, on peut trouver des cartes à plus grande échelle (1/25 000 à Paris par exemple).

À partir de ces documents, la réalisation d'une coupe géologique est possible (figure 18). Il s'agit de reporter, sur un profil topographique, les différents types de terrains et accidents en les reliant entre eux en fonction de considérations géométriques basées sur les limites de formations et sur des indications structurales figurant sur la carte et la notice (pendages, épaisseurs des couches, etc.).

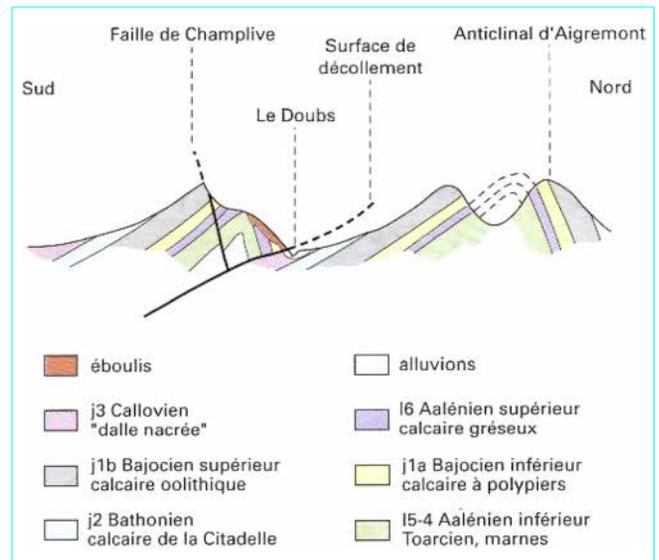


Figure 18 - Coupe géologique schématique nord-sud dans l'anticlinal du Doubs au droit de Laissey (Doubs)

6.2 Photographies aériennes et télédétection

Les photographies aériennes, qu'elles soient en noir et blanc, en couleur ou en fausse couleur (infrarouge), se révèlent précieuses dans l'étude d'une région, du fait qu'elles permettent :

- d'obtenir une vision globale due à la perception à distance ;
- de dresser des constats objectifs (l'information est figée à une date donnée) ;
- d'effectuer des zooms sur certains secteurs à étudier en détail à l'aide de photos à différentes échelles ;
- d'étudier des mouvements évolutifs au moyen de photos prises à plusieurs dates (glissements lents, modification du trait de côte, etc.).

Les photos aériennes sont, de plus, commodes à utiliser et disponibles sur tout le territoire français ; en particulier, la couverture photographique à l'échelle 1/30 000 est renouvelée tous les cinq ans par l'IGN (Institut géographique national). Il s'agit, en outre, d'un outil discret, non destructif et bon marché.

L'utilisation la plus courante des photographies aériennes découle de la possibilité de restitution du relief par vision stéréoscopique. Cette particularité est obtenue grâce à la technique de prise de vue verticale avec recouvrement partiel des clichés : chaque objet se trouve photographié sous deux angles différents et peut être vu en relief à l'aide de lunettes stéréoscopiques.

La morphologie du terrain est donc perceptible de même que les unités lithologiques et structurales (figure 19) : l'analyse du modèle renseigne sur la nature des matériaux de surface ou de subsurface, sur les structures géologiques et sur les évolutions géodynamiques récentes ou actives (néotectonique, glissements de terrain, etc.).

L'imagerie satellitaire permet aisément de saisir des structures de grandes dimensions, mais son utilisation pour des études ponctuelles est freinée par la résolution, qui n'est pas encore du niveau de celle des photos aériennes, et par le prix élevé. L'imagerie radar permet de s'affranchir des conditions climatiques (présence d'une couverture nuageuse), mais son utilisation demande une solide expérience.

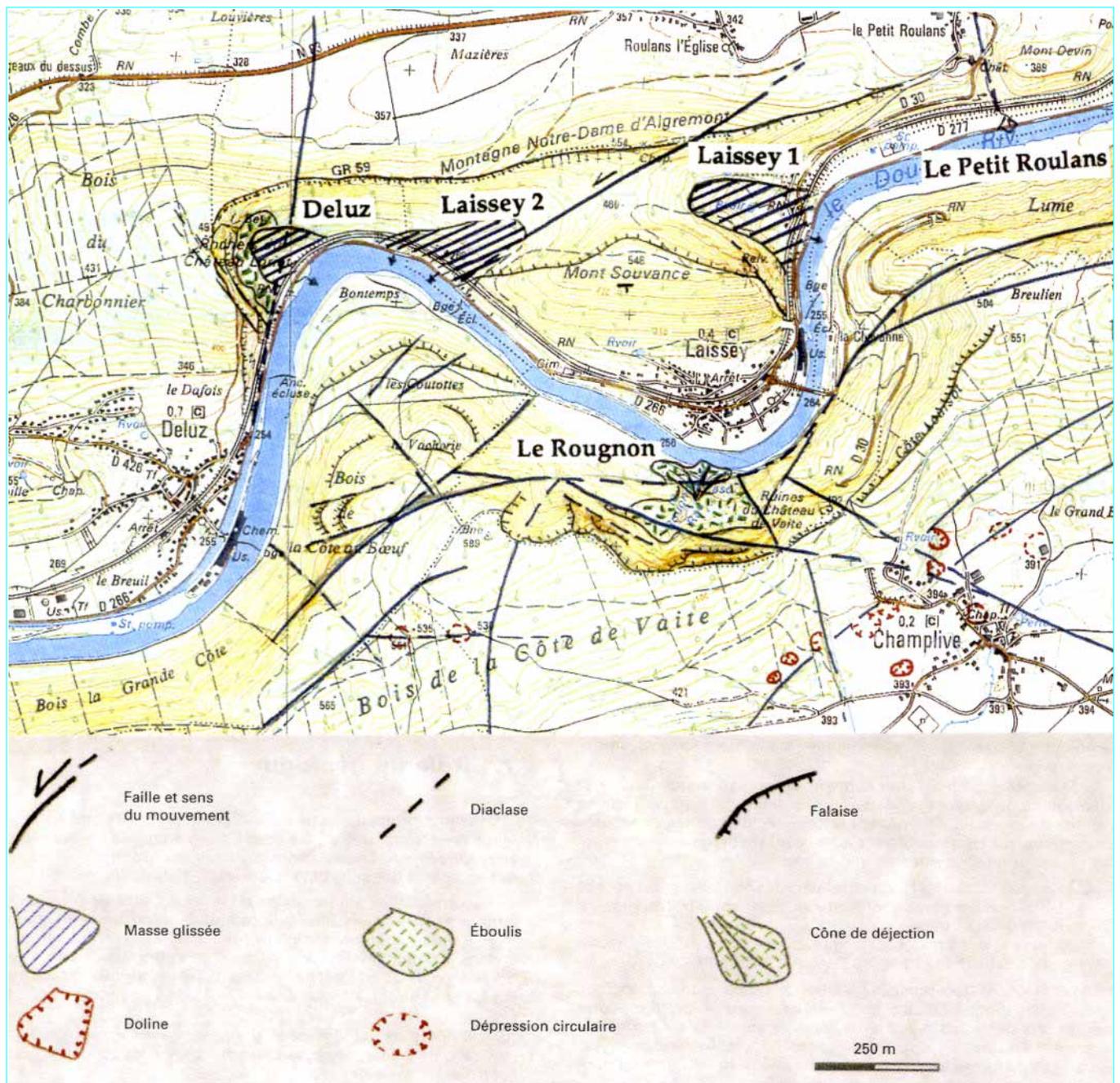


Figure 19 – Schéma photointerprétatif du secteur de Laissey (Doubs)

7. Applications de la géologie au génie civil

7.1 Rôle du géologue

Dans tout projet de génie civil, le géologue intervient, en concertation avec le maître d'œuvre et en liaison avec les différents spécialistes (ingénieur de structures, en technique routière, mécanicien des roches ou des sols, paysagiste, etc.), à plusieurs étapes :

- à l'amont des études, dans le choix des sites en fonction des impératifs techniques (liés à la topographie ou à des contraintes lithologiques, structurales ou environnementales) ou économiques, et dans la définition des reconnaissances à effectuer ; à ce niveau, il est primordial pour le géologue d'identifier les contraintes majeures liées à la nature des terrains, à la structure, à la morphologie, aux évolutions actives ;

- au cours des études géotechniques, dans l'interprétation des résultats, dans leur interpolation, pour affiner les connaissances et contrôler les hypothèses ;

- au cours des travaux, dans la réorientation éventuelle du projet pour cause de résultats non conformes aux hypothèses de départ, ou si un incident se produit (glissement de terrain, venues d'eau, etc.).

7.2 Méthodes

Outre la consultation des cartes géologiques et l'observation des photographies aériennes, le géologue met en œuvre plusieurs méthodes d'étude, les plus typiques de la géologie étant présentées ci-après.

7.2.1 Levé de terrain

Le premier travail du géologue est la reconnaissance de surface basée sur une cartographie à grande échelle (1/5 000 à 1/500). Une attention particulière est portée aux formations superficielles, souvent délaissées par le géologue universitaire, mais qui sont généralement les plus concernées par les travaux. À la différence des cartes géologiques conventionnelles, les cartes géotechniques privilégient les caractéristiques des terrains plutôt que la stratigraphie (figure 20). Les structures et les hétérogénéités seront reconnues par les méthodes géophysiques [8]. Le modèle géologique élaboré à la suite de cette première phase de travaux sera précisé par une campagne de sondages carottés [9] ou destructifs accompagnés de diagraphies (γ -ray notamment).

7.2.2 Étude structurale

L'étude structurale a pour objectif le relevé des structures tectoniques ; elle repose sur l'observation des surfaces ou des lignes créées ou déformées par la tectonique, dont les attitudes (direction et inclinaison) témoignent du caractère de la déformation.

La projection stéréographique est un mode de représentation et de construction géométrique abstrait qui analyse les rapports d'orientation des éléments tectoniques dans l'espace, indépendamment de leur position géographique. Le principe de la projection stéréographique, illustré dans [10], consiste à amener par translation les éléments parallèlement à eux-mêmes pour les rapporter à une demi-sphère de référence. Ils sont alors projetés sur un plan, au moyen d'une transformation géométrique qui a la propriété de conserver les angles.

Cette technique (figure 21) permet de construire des objets tectoniques (plans à l'aide de pendages apparents, intersection de deux plans, axe d'un pli à l'aide de mesures sur ses flancs, etc.), de

faire des études statistiques sur des populations d'objets géologiques tels que les failles, les diaclases, les stries, les axes de plis, etc., ou de rechercher l'orientation des contraintes fossiles ou actuelles [7].

7.2.3 Prélèvement et étude d'échantillons

L'analyse pétrographique des faciès, de même que l'identification et la caractérisation des matériaux se font sur échantillons provenant de l'affleurement, de subsurface (tarière à main, fouilles à la pelle mécanique) ou de sondages destructifs ou carottés. Les échantillons sont transportés dans un emballage apte à la préservation de leurs caractéristiques (paraffine, plastique).

Le prélèvement d'échantillons concerne notamment les niveaux susceptibles de poser problème tels que : les niveaux argileux, synonymes de barrières imperméables, de risque de gonflement et de plans de rupture potentiels ; les niveaux de gypse (risques de dissolution) ; les niveaux altérés ; etc.

L'étude des terrains mobilise différentes techniques qui vont de l'observation rapide aux essais de laboratoire.

■ Reconnaissance rapide

Elle repose sur l'observation naturaliste, à l'œil nu, tant sur le plan pétrographique que sur le plan structural. Elle peut rapidement fournir des données exploitables qui serviront à orienter les programmes de reconnaissance complémentaires (présence de failles, de pendages défavorables, de terrains compressibles, de roches solubles, etc.).

■ Études en laboratoire

Les études de laboratoire comprennent en général :

- pour les matériaux rocheux, une détermination pétrographique au microscope optique polarisant et, éventuellement, une identification de minéraux ou de microstructures particulières au microscope électronique à balayage ;

- pour les sols, une granulométrie et une détermination qualitative des minéraux argileux à l'aide de diffractogrammes aux rayons X ;

- des analyses chimiques visant à quantifier les proportions en différents éléments (majeurs et traces) de manière à préciser la nature des matériaux (calcimétrie pour une marne) ou à identifier des matières polluantes.

Par ailleurs, on effectue sur les échantillons les essais classiques d'identification et les essais mécaniques correspondant au problème posé. Lors des premières phases de reconnaissance, le nombre d'échantillons étant restreint, les résultats des essais seront extrapolés en fonction de la connaissance de la géologie locale.

7.3 Résultats de l'étude géologique

La reconnaissance géologique et géotechnique, en fournissant toutes les informations nécessaires sur le sous-sol, permet d'élaborer un **modèle géologique** qui sert de base à l'implantation, au dimensionnement et à la planification d'exécution des ouvrages. En cas de structure complexe, plusieurs hypothèses peuvent être admises, le modèle étant affiné par des reconnaissances complémentaires ou en cours de travaux. Le plus souvent, ce modèle sera présenté à deux dimensions (profil en long d'un tracé routier, par exemple). Si cela est nécessaire, on prendra en compte la troisième dimension au moyen de coupes sériées ou d'un bloc-diagramme. Les différentes formations identifiées dans ce modèle seront décrites avec leurs caractéristiques.

L'étude géologique doit également permettre de détecter des **anomalies**, ou du moins de suspecter leur présence : cavités karstiques dans du rocher, gros blocs noyés dans une formation de sols fins, zones faillées et broyées, poches d'altération dans une roche saine, venues d'eau ponctuelles, etc.

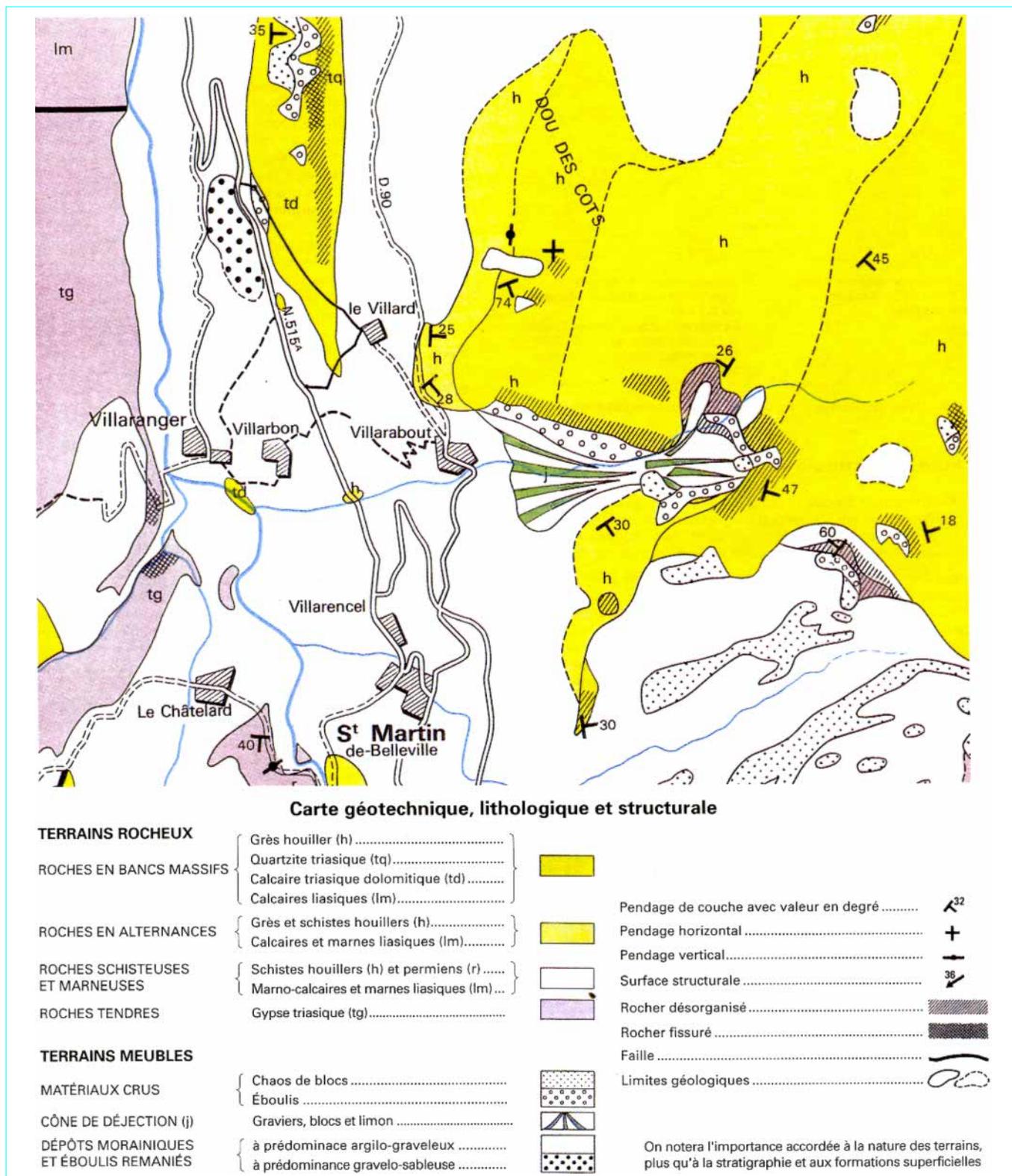


Figure 20 - Carte géotechnique, lithologique et structurale d'un secteur près de Saint-Martin-de-Belleville (d'après G. Ollivier)

7.4 Tunnel sous la Manche

Le cas du tunnel sous la Manche a été choisi pour illustrer l'importance de l'étude géologique d'un ouvrage. Le percement de ce tunnel, mis en service en 1994, aura duré de juin 1988 à juin 1991. Il n'a pu être exécuté qu'après de multiples études et reconnaissances qui se sont étalées sur plus d'un siècle.

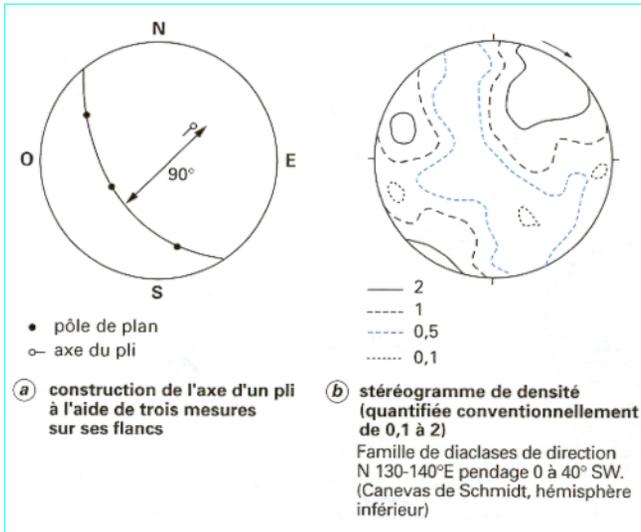


Figure 21 – Deux applications de la projection stéréographique

Dès la fin du siècle dernier, on recherche un tracé dans les niveaux de base du Cénomaniens (craie bleue), dont la qualité est excellente. Les investigations ultérieures ont donc eu pour but d'améliorer la connaissance de la géométrie et des caractéristiques mécaniques de ce niveau, d'identifier les problèmes pouvant être liés à la structure (plis, failles) et à la proximité du fond marin (existence d'anciens chenaux comblés). À partir de 1960, les investigations furent basées sur la sismique-réflexion et sur des sondages carottés en mer avec diagraphies. On a pu ainsi préciser la nature des matériaux, estimer les pendages des couches, le degré d'altération de la craie en surface, sa fracturation et sa perméabilité, etc.

La craie bleue cénomaniens, intercalée entre les argiles de l'Albien (argile du Gault) et la craie grise du Cénomaniens supérieur, est un peu argileuse, peu perméable ; son épaisseur est de 25 à 30 m. La craie grise sus-jacente est plus fracturée et plus perméable ; les argiles sous-jacentes sont gonflantes et auraient pu causer un blocage des tunneliers lors d'un arrêt en cours de foration.

L'allure générale des couches, compte tenu des affleurements de part et d'autre du détroit, est celle d'un synclinal à grand rayon de courbure (figure 22). Cette structure est compliquée, côté français, par un anticlinal dont la charnière est située directement à l'est du puits de Sangatte, et par la présence de failles dont le rejet vertical varie entre 2 et 20 m. Des ondulations des couches furent également à prendre en compte dans le choix du tracé.

L'optimisation de la position du tunnel, liée à une meilleure connaissance des structures géologiques, a été rendue possible à la suite de la campagne géotechnique et géophysique de 1986/1987 qui a permis, grâce au progrès des techniques géophysiques et à une modélisation du sous-sol du détroit, d'améliorer la définition de l'interface Gault/craie bleue (à 2 ou 3 m près) et de l'épaisseur de la craie bleue (à 1 ou 2 m près).

La qualité et la précision de ces études ont contribué au bon déroulement de la foration des galeries, avec des avancements qui ont parfois dépassé 1 000 m par mois, de sorte que les travaux de percement se sont terminés dans les délais prévus sans incident technique majeur.

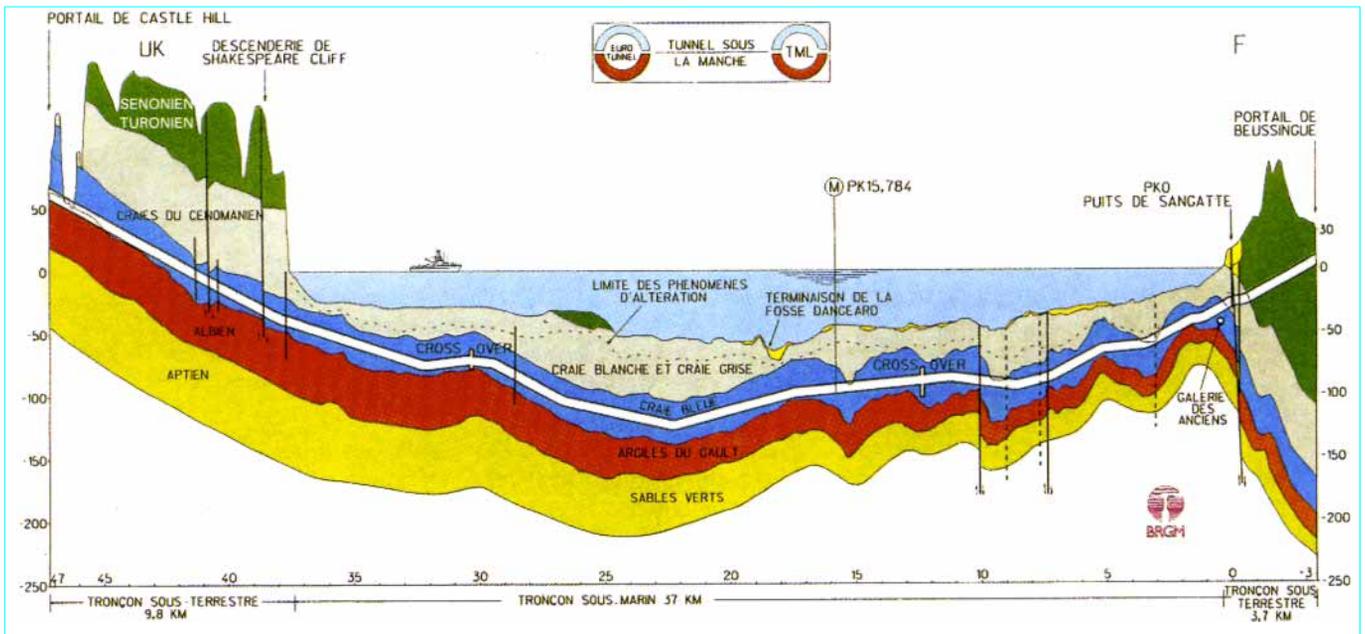


Figure 22 – Profil géologique simplifié le long du tunnel sous la Manche, voie Sud (doc. BRGM)

Géologie

par **Jean-Louis DURVILLE**

*Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées
Chef de la division Mécanique des sols et géologie
de l'ingénieur au Laboratoire central des Ponts et Chaussées*

et **Pierre POTHÉRAT**

Ingénieur géologue au Laboratoire central des Ponts et Chaussées

Bibliographie

Références

- [1] GOGUEL (J.). – *Applications de la géologie aux travaux de l'ingénieur*. 374 p., Masson (1967).
- [2] CAILLÈRE (S.), HÉNIN (S.) et RAUTUREAU (M.). – *Les argiles*. 122 p., Éditions SEPTIMA, Paris (1989).
- [3] CHAMLEY (H.). – *Les milieux de sédimentation*. 173 p., TEC et DOC Lavoisier, Paris (1988).
- [4] GIDON (M.). – *Les structures tectoniques*. Collection Manuels et Méthodes du BRGM, n° 15, 206 p. (1987).
- [5] BLÈS (J.-L.) et FEUGA (B.). – *La fracturation des roches*. Collection Manuels et Méthodes du BRGM, n° 1, 121 p. (1981).
- [6] CAMPY (M.) et MAQUAIRE (J.-J.). – *Géologie des formations superficielles : géodynamique, faciès, utilisation*. Masson (1989).

- [7] Chambre syndicale de la recherche et de production de pétrole. – *Méthodes modernes de géologie de terrain – 2b : Manuel d'analyse structurale*. 67 p. (1976).

Dans les Techniques de l'Ingénieur

- [8] LAGABRIELLE (R.). – *Géophysique appliquée au génie civil*. C 224 (à paraître), traité Construction.
- [9] MAILLARD (J.-F.). – *Forages et sondages*. C 228, traité Construction, fév. 1985.
- [10] DURVILLE (J.-L.) et HÉRAUD (H.). – *Description des roches et des massifs rocheux*. C 352, traité Construction, nov. 1995.

Livres

- POMEROL (Ch.) et RENARD (M.). – *Éléments de géologie*. 630 p., 10^e édition. Armand Colin (1995).

DERCOURT (J.) et PAQUET (J.). – *Géologie : objets et méthodes*. 342 p., Dunod (1995).

FOUCAULT (A.) et RAOULT (J.-F.). – *Dictionnaire de la géologie*. 352 p., 4^e édition. Masson (1995).

TRICART (J.). – *Géomorphologie applicable*. 204 p., Masson (1978).

Pour se procurer des cartes géologiques :

Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

Pour se procurer des photographies aériennes :

Institut géographique national (IGN)

Géologie

Références

- [1] GOGUEL (J.). – *Applications de la géologie aux travaux de l'ingénieur*. 374 p. 1967. Masson.
- [2] CAILLÈRE (S.), HÉNIN (S.) et RAUTUREAU (M.). – *Les argiles*. 122 p. 1989. Éditions SEPTIMA, Paris.
- [3] CHAMLEY (H.). – *Les milieux de sédimentation*. 173 p. 1988. TEC et DOC Lavoisier, Paris.
- [4] GIDON (M.). – *Les structures tectoniques*. Collection Manuels et Méthodes du BRGM, n° 15. 206 p. 1987.
- [5] BLÈS (J.-L.) et FEUGA (B.). – *La fracturation des roches*. Collection Manuels et Méthodes du BRGM, n° 1. 121 p. 1981.
- [6] CAMPY (M.) et MAQUAIRE (J.-J.). – *Géologie des formations superficielles : géodynamique, faciès, utilisation*. 1989. Masson.

Bibliographie

- [7] Chambre syndicale de la recherche et de production de pétrole. – *Méthodes modernes de géologie de terrain – 2b : Manuel d'analyse structurale*. 67 p. 1976.

Dans les Techniques de l'Ingénieur

- [8] LAGABRIELLE (R.). – *Géophysique appliquée au génie civil*. [C 224] (1998), traité Structure et gros œuvre.
- [9] MAILLARD (J.-F.). – *Forages et sondages*. [C 228] (1985), traité Construction (épuisé).
- [10] DURVILLE (J.-L.) et HÉRAUD (H.). – *Description des roches et des massifs rocheux*. [C 352] (1995), traité Structure et gros œuvre.

Livres

- POMEROL (Ch.) et RENARD (M.). – *Éléments de géologie*. 630 p. 1995. 10^e édition. Armand Colin.

DERCOURT (J.) et PAQUET (J.). – *Géologie : objets et méthodes*. 342 p. 1995. Dunod.

FOUCAULT (A.) et RAOULT (J.-F.). – *Dictionnaire de la géologie*. 352 p. 4^e édition. 1995. Masson.

TRICART (J.). – *Géomorphologie applicable*. 204 p. 1978. Masson.

Pour se procurer des cartes géologiques :

Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM)

Pour se procurer des photographies aériennes :

Institut géographique national (IGN)