

Géologie appliquée : le sous sol

Du point de vue disciplinaire, si la géologie est une science expérimentale qui a pour but la connaissance de la terre, la **géologie appliquée** met les connaissances géologiques au service de l'homme: ingénieur, artisan, commerçant, artiste, militaire, amateur de pierres précieuses...

1. Les roches non combustibles:

* les matériaux de construction et autres matières utilisées par les artisans et artistes

Selon l'usage (habitations, monuments, routes...) on privilégie certaines caractéristiques (résistance à l'écrasement, au gel, à la cassure..., masse...). On exploite ainsi des roches meubles (sables, loess, limons, argiles, graviers, lapilli...) ou cohérentes (calcaires, granites, basaltes...).

Les matériaux modernes sont de plus en plus des matériaux artificiels c'est-à-dire élaborés par l'homme qui modifie les matériaux naturels.

Ainsi le produit le plus utilisé par l'homme après l'eau n'est pas une roche naturelle mais une "roche" artificielle: le **béton**. C'est une roche au sens mécanique, minéralogique du terme mais pas en ce qui concerne sa genèse bien sûr. On fabrique le béton moderne à partir d'un mélange de ciment, de sable, de graviers et d'eau. Le **ciment** est une poudre obtenue en mélangeant du **gypse** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) au produit de la calcination (1500°C) d'un mélange de calcaire (80%) et d'argile (20%) auquel on ajoute de silice, de l'alumine et de l'oxyde de fer pour une faible part. Le ciment cristallise réellement (lorsqu'il est appliqué contre du calcaire, les cristaux du tobermorite: $3\text{CaO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$, principal minéral du ciment cristallisé, croissent dans le prolongement du réseau cristallin de la calcite). Le béton très peu poreux est peu sensible au gel mais il vieillit cependant.

Le gypse chauffé entre 100 et 140°C se transforme (perte d'eau) en **plâtre** qui recristallise après mélange avec de l'eau.

Le mélange calcaire-argile ne donne pas seulement le **ciment** mais aussi, notamment avec du loess (sédiment éolien périglaciaire contenant de l'argile et du calcaire...), les **briques, tuiles**, poteries, **grès** et cérames (grès vitrifiés).

Faïences et porcelaines sont fabriquées à partir de mélanges kaolinite (argile blanche alumineuse très fine)-feldspath.

Le **verre** enfin résulte de la fonte de sable siliceux puis de son refroidissement très rapide (trempe ou vitrification).

La toute jeune (fin du XIXème siècle) **science des matériaux** (si l'on oppose, de façon certainement indue, science et technique ainsi que science et pratique (ars)...) tente d'unifier l'étude de tous les matériaux, tant naturels (pétrologiques ou biologiques...) qu'artificiels, à l'aide d'une analyse structurale physique et chimique. La manière la plus moderne de classer les matériaux consiste à examiner les mécanismes qui lient entre eux les atomes ou les molécules; on distingue cinq types principaux de liaison: liaison ionique, liaison covalente, liaison métallique, liaison moléculaire ou de Van der Waals et liaison hydrogène. De façon plus classique, on distingue aussi:

- Les matériaux **cristallins** comprennent les métaux, une grande partie des céramiques, une partie des polymères et la plupart des minéraux. Les atomes y sont disposés régulièrement suivant un réseau tridimensionnel (voir roches).
- Les matériaux **amorphes** comprennent, en dehors des verres, de nombreux polymères de poids moléculaire élevé, quelques composés inorganiques et un petit nombre d'éléments chimiques. L'état amorphe est caractérisé, à l'inverse de l'état cristallin, par des atomes placés de façon plus irrégulière, dans lesquels on ne peut construire aucun réseau à grande distance. Sa structure, peu accessible par les rayons X ou par la diffraction électronique, est plus difficile à étudier. Les recherches concernant cette structure se sont développées de façon considérable, notamment à l'aide de la microscopie électronique.

* les matières premières de l'industrie chimique

Le pétrole et les charbons sont bien sûr utilisés comme produits de base d'une industrie chimique (pétrochimie et

carbochimie) qui fabrique des innombrables matières "plastiques" et autres caoutchouc synthétiques.

L'acide sulfurique est ensuite le plus utilisé des acides minéraux de l'industrie (allumettes, pharmacie, caoutchouc, papier, pharmacie...); il est élaboré à partir de soufre trouvé à l'état natif (déposé par des fumerolles volcaniques ou associé à l'hydrothermalisme ou encore aux hydrocarbures) ou fabriqué à partir de la pyrite (sulfure de fer: FeS₂). Les roches salines (sel (halite, NaCl), la sylvinite (KCl) et phosphates) sont exploitées à partir de dépôts anciens: gisement de sel lorrain par exemple, gisement de sylvinite d'Alsace ou phosphates d'Afrique du Nord.

* les minerais:

Classiquement, on appelle **minerai** une substance naturelle de laquelle il est possible d'extraire un métal d'une façon rentable économiquement. La qualification en minerai et non minerai fluctue donc avec le marché mondial des métaux. L'argile n'est pas un minerai d'aluminium alors que la bauxite, moins riche en aluminium que l'argile, en est un. C'est un problème de coût d'extraction. On traite aussi actuellement des résidus de l'extraction d'uranium car les techniques ont évolué et il est devenu rentable de traiter ce qui était auparavant un rebut.

Plus récemment, on tend à appeler **minerai tout matériau naturel (pétrologique) à valeur économique** (on supprime la référence aux métaux, ce qui permet d'y inclure les minéraux en général...).

La science de la genèse des gîtes métallifères est la **métallogénie**. Du point de vue géologique les gisements des minerais dépendent bien sûr du type de minerai: natif, sel, oxyde, carbonate... mais aussi des processus qui lui ont donné naissance; on trouve ainsi :

- des gisements sédimentaires (accumulations de fer, d'or, roches salines et phosphates...) mais aussi
- des gisements associées au magmatisme
 - (essentiellement de roches basiques et ultrabasiques : diamants des kimberlites (voir plus bas), nickel déposé par exemple à la base d'un pluton aplati (laccolithe) à Subdury au Canada (1er producteur mondial de Ni !);
 - des concentrations par les fluides donnant naissance à des pegmatites, roches magmatiques souvent en filons, à superbes cristaux de très grande taille sont cependant pauvres en métaux;
 - des concentrations chromifères des péridotites des ophiolites), et
 - des processus hydrothermaux concentrant Pb, Zn, Cu...
- des gisements associés au métamorphisme (cuivre, zinc...).

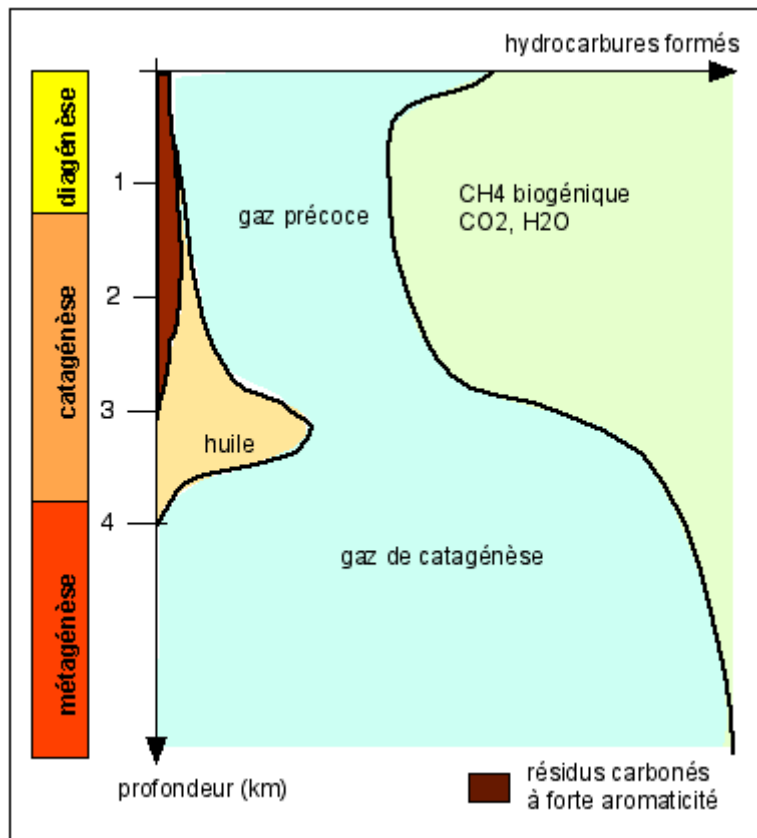
Un **métal** est un corps simple caractérisé par un éclat particulier (éclat métallique), conducteur de chaleur et d'électricité.

Les métaux natifs exploités sont l'or, le platine et plus rarement le cuivre, l'argent et le mercure. De nombreux métaux sont extraits à partir de sels: les sulfures sont des minerais fréquents de cuivre, plomb, zinc, mercure, molybdène...; les chlorures sont aussi courants. La plupart des minerais sont des oxydes ou des hydroxydes. Par exemple les oxydes de **fer** (limonite, hématite, goethite...), ou d'**aluminium** comme les bauxites (complexes de kaolinite (argile=silicate d'alumine hydraté) et d'hydrates d'alumine (gibbsite...)). L'uranium est extrait de la *pechblende*, une forme impure de l'*uraninite*: l'oxyde d'uranium: U₂O.

Le **diamant** naturel (carbone cristallisé (avec uniquement des liaisons de covalence) dans le système cubique avec un atome central entouré de quatre autres atomes, sommets d'un tétraèdre) cristallise dans des roches très particulières comme les kimberlites (roches des cheminées volcaniques de Kimberley en Afrique du Sud) qui contiennent des éclogites issues du manteau dans lesquelles on trouve ces diamants. La masse d'un diamant est donnée en *carat* (5 carats = 1 gramme ; 1 carat = 0,2 gramme); le plus gros diamant naturel connu fût trouvé en 1905: le Cullinan (du nom d'une mine d'Afrique du Sud) de 3106 carats (taillé en 105 pierres dont l'étoile d'Afrique (130,2 carats) et deux pierres de 530 carats et 317 carats exposées avec les bijoux de la couronne à Londres .

2. Les roches combustibles = les roches carbonées: charbons, pétroles et gaz naturels

Les **roches carbonées** (qui contiennent du carbone mais aussi de l'hydrogène) brûlent au contact de l'air ce qui en fait des roches "énergétiques" (terme anthropomorphique). L'énergie calorifique dégagée lors de la combustion est non renouvelable et ces roches étant issues de processus très longs de diagenèse, on parle aussi d'énergie fossile, produite par la combustion de ces roches, même si, actuellement, des processus conduisant à la formation de telles roches carbonées sont sans aucun doute à l'œuvre. L'énergie emmagasinée par ces roches est une **énergie chimique de liaison** (liaisons covalentes C-C principalement) et une **énergie chimique d'oxydo-réduction** (la matière organique des roches carbonées est fortement réduite). Cette énergie chimique vient d'une part de la matière organique initiale qui s'est enfouie dans les sédiments: on peut donc la qualifier alors d'énergie solaire fossile car en fait toute énergie contenue dans la matière organique est issue de l'énergie solaire convertie en énergie chimique par les producteurs primaires (organismes photosynthétiques) puis transférée successivement aux différents membres des réseaux trophiques avec des pertes calorifiques à chaque niveau trophique (voir cours sur la nutrition). Cependant l'énergie des roches carbonées vient aussi (et surtout) des processus de maturation qui sont intervenus après l'enfouissement qui transforment une matière organique peu réduite (le terme de **kérogène** désigne la matière organique en cours de transformation après son enfouissement) en matière organique très réduite (et donc à haut pouvoir calorifique). Ces mécanismes comprennent dans les premiers mètres (on parle de **diagenèse précoce**) des transformations dues aux bactéries qui oxydent une bonne part de la matière organique. Contrairement donc à une idée persistante, les bactéries ne sont pas du tout les principales responsables de la formation des roches carbonées, même si elles y participent incontestablement. En effet, la principale transformation, qualifiée de **diagenèse thermique**, est due à l'augmentation de la température (et secondairement de la pression), elle-même due à l'enfouissement. C'est elle qui, par des réactions thermos-catalytiques conduit à une perte d'azote et surtout d'oxygène (CO₂ et H₂O) ce qui est une réduction. Plus bas encore (entre 1,5 à 4 km de profondeur) la matière carbonée très réduite subit un craquage thermique (**catagenèse**), aboutissant à une séparation entre une *phase fluide* (huiles et gaz MOBILES: on parle de fenêtre à huile pour désigner ce domaine de pression-température car c'est à cette étape que l'on observe des migrations et donc des accumulations) et en *phase solide*: qui sont des résidus carbonés (avec une grande quantité de résidus aromatiques). Des stades ultimes (métagenèse) peuvent conduire, au-delà de 4 km de profondeur à du graphite cristallin et à une libération de méthane (CH₄).



Un diagramme qualitatif montrant la genèse des hydrocarbures en fonction de la profondeur (en supposant un gradient géothermique moyen). (d'après Enseigner la géologie, Nathan, p 193)

Dans les stades précoces de diagenèse et de la catagenèse, ce qui permet de retrouver l'origine d'un produit organique combustible est sa signature géochimique représentée par différents marqueurs: les porphyrines dérivées de la chlorophylle, les géo-hopanoïdes, marqueurs de la paroi bactérienne. Dans le diagramme ci-dessous on utilise 2 marqueurs: le rapport atomique H/C et le rapport atomique O/C:

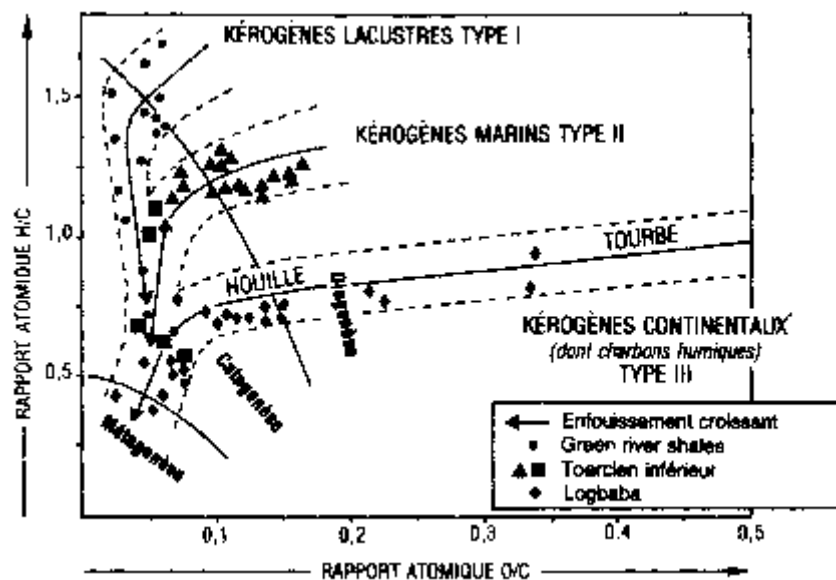


Diagramme de Van Krevelen: on distingue 3 grands types de kérogènes avant la maturation où plus aucune distinction n'est possible:

- * kérogènes lacustres de nature algaire, pauvres en oxygène et riches en hydrogène
- * kérogènes d'origine planctonique marine (contenant notamment certaines algues comme les tasmanacées...)
- * kérogènes continentaux issus de la décomposition de tissus végétaux supérieurs (pauvres en H et riches en O) avec des spores, des cuticules, des algues...

Il est important de ne pas associer trop vite un produit avec une origine organique: certains charbons donnent des gaz naturels et on cherche actuellement à prouver actuellement qu'ils peuvent aussi donner des pétroles. Le terme **charbons** (du latin *carbona* = charbon) désigne des roches sédimentaires stratifiées, combustibles, de couleur sombre, formées principalement de débris végétaux. On distingue plus précisément (voir *Dictionnaire de géologie*, Masson, pour d'autres termes):

- la **tourbe** (65% de C), légère, brune, médiocre combustible: ce n'est pas une roche, c'est un sédiment essentiellement organique en cours de diagenèse; elle n'est connue que dans des tourbières actuelles.
- le **lignite** (70-75% de C), brun noir et terne, à débris ligneux bien reconnaissables, à pouvoir calorifique de l'ordre de 5000 kcal/kg, est connue dans des dépôts fossiles d'âge secondaire ou tertiaire.
- la **houille** (sens large) ou charbon (85% de C), noire, mate ou brillante, tachant les doigts, bon combustible, principalement d'âges paléozoïques.
- l'**anthracite** (92-95% de C), noir, brillant, ne tachant pas les doigts, possède le pouvoir calorifique le plus élevé: plus de 8000 kcal/kg.

Les **pétroles** (du grec *petrelaion* = huile de pierre) sont des **hydrocarbures** comportant * des carbures saturés (paraffiniques) de formule $C_n H_{2n+2}$ ($5 \leq n \leq 15$, les **bitumes** correspondent à des carbures saturés de même formule avec $n > 15$, mais la terminologie est fort complexe et les produits nombreux), liquides à 20°C et de teinte d'autant plus sombre qu'ils sont denses (0,83 à 0,96; de toute façon plus légers que l'eau)
 * et des hydrocarbures cycliques naphéniques de formule $C_n H_{2n-3}$
 * et plus rarement des hydrocarbures cyclique aromatiques de formule $C_n H_{2n-6}$.

Le **gaz naturel** est un mélange de carbures saturés de formule $C_n H_{2n+2}$ avec $n < 5$: méthane(1), éthane(2), propane(3), butane(4); dans les gisements ils peuvent être sous forme gazeuse (méthane et éthane) ou liquide (propane, butane) et coexistent ou non avec des pétroles ou des charbons.

La genèse de kérogène en grande quantité dépend d'une part de la quantité d'apport de matière organique (plus la productivité est importante, plus on aura des chances de trouver une accumulation) et d'autre part des conditions de son enfouissement en milieu réducteur, à l'abri de l'oxygène (aussi bien en milieu marin profond où l'oxygène est renouvelé très lentement, malgré la faible productivité, que sous une faible couche d'eau (stable) d'une lagune marécageuse où l'oxygène n'est pas renouvelé assez vite pour l'énorme quantité de matière organique produite à l'oxyder).

Malgré la complexité des phénomènes, si l'on tient absolument à relier la formation des roches carbonées à leur contexte géodynamique, il me paraît suffisant de savoir qu'en fonction de ce qui a été dit au-dessus:
 * dans le cas d'un gisement de charbon, on a toutes les chances que le produit soit en place; on peut donc déduire de l'étude du contexte géodynamique local les conditions de formation du dépôt
 * alors que dans le cas des gaz et pétroles, les produits sont le plus souvent dans une **roche réservoir** (magasin), poreuse ou fracturée, et il est parfois plus difficile de trouver les **roches mères** au sein desquelles ils ont pris naissance.

* les principaux contextes géologiques favorables (paléomilieus) sont les suivants: lacs et marécages d'un bassin intracontinental, lacs et marécages de bassins d'effondrement (mer du Nord, bassins à la limite de marges passives comme le bassin du Congo...), lagunes ou grands deltas (Nigeria, Bornéo...), bassins orogéniques (associés à la formation d'une chaîne de montagne, comme par exemple le bassin de Vienne lié à l'orogénèse alpine)...

3. l'eau, une ressource du sous-sol

(chapitre à part du fait de son importance: voir hydrogéologie).

4. la géothermie

La **géothermie** s'intéresse globalement au régime thermique du globe terrestre. En géologie appliquée elle s'attache à maîtriser l'exploitation de la capacité calorifique du sous-sol. Elle extrait cette énergie soit des roches directement (géothermie "sèche" pour laquelle on injecte des fluides pour récupérer l'énergie calorifique) soit des eaux chaudes circulantes dans le sous-sol (géothermie de sources et nappes chaudes). On distingue classiquement une **géothermie basse énergie** si les fluides impliqués (naturels ou injectés) atteignent 50 à 90°C et une **géothermie haute énergie** pour des températures de 150-300°C.

Deux éléments sont à prendre en compte:

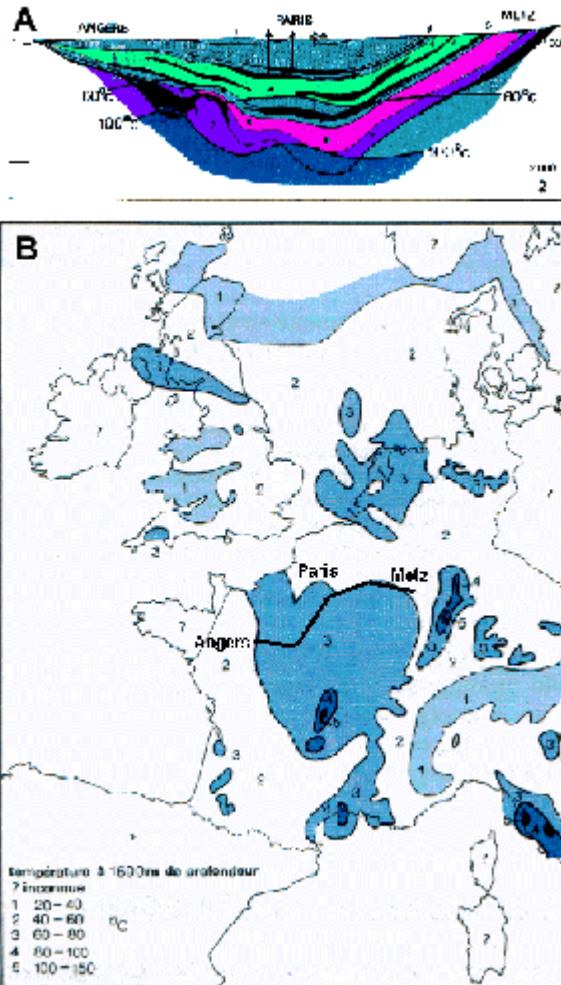
- * la température du sous-sol augmente avec la profondeur: c'est le **gradient géothermique**.
- * le contexte géodynamique: dans une croûte continentale stable le gradient géothermique est de quelques degrés Celsius par kilomètres alors que dans une zone d'accrétion océanique ou dans une zone volcanique insulaire ou continentale on peut atteindre 100°C par kilomètre.

Si on ramène à la surface de la France, le calcul du flux de chaleur par unité de surface (qui varie de quelques dizaines à quelques centaines de milliwatts par mètre carré), on obtient un équivalent de 20 millions de tonnes équivalent pétrole (tep) par an. On estime la puissance géothermique de la Terre à 30 milliards de kilowatts. Cependant la géothermie garde une place modeste dans le bilan énergétique mondial (quelques fractions de pour cent) du fait de l'inaccessibilité de la ressource.

La **géothermie sèche** consiste à injecter un fluide froid dans un réseau fracturé de roches chaudes. On peut accélérer la fracturation en injectant le liquide sous pression. Ce type de géothermie est encore expérimental et est principalement limité aux zones à fort gradient géothermique.

La géothermie utilisant des eaux profondes chaudes présente deux formes habituelles:

- * les **sources chaudes** dont les plus spectaculaires sont les sources chaudes à jaillissement intermittent (les geysers). Le principe en est simple: des eaux météoriques s'infiltrent en profondeur le long de fractures jusqu'à un aquifère profond dont la température des fluides peut atteindre 250 °C (la phase liquide est maintenue du fait de la pression). La densité d'une telle eau chaude atteint 0,8 ce qui la pousse à remonter. Au cours de l'ascension le long des fractures, la pression diminuant, la phase gazeuse a tendance à apparaître (ébullition) ce qui provoque le jaillissement du geyser, le gaz poussant violemment à l'air libre une petite colonne d'eau liquide. Le système est auto-entretenu tant que les nappes sont approvisionnées.
- * les **nappes phréatiques chaudes** peuvent aussi être exploitées par des forages comme les nappes du Bassin Parisien présentées ci-dessous. L'eau chaude, une fois utilisée pour alimenter des pompes à chaleur, devrait être réinjectée pour éviter de trop modifier les équilibres naturels (tant thermiques que géochimiques).



La coupe A (non rectiligne) est située sur la carte de France B.

La coupe indique quelques nappes phréatiques chaudes (**en noir**) du Bassin Parisien (1. Tertiaire, 2. Crétacé sup., 3. Crétacé inf., 4(vert). Jurassique sup., 5. Jurassique moy., 6(rose). Jurassique inf., 7(violet). Trias)

Les profondeurs en ordonnées sont en mètres.

(figures extraites et modifiées (volontairement de mauvaise qualité) de *Enseigner la géologie, collège-lycée*, Nathan, 1990)

5. le génie civil

Les grands ouvrages de **génie civil** mettent en jeu les connaissances de géologie et font donc partie de la **géologie appliquée**. Le terme génie civil est pris ici dans son acception la plus récente et désigne tous les ouvrages de constructions de grande ampleur (bâtiments, ponts, jetées, réservoirs, chaussées...) réalisée pour la société civile, quel qu'en soit la destination (usage civil ou militaire...). Une étude géologique préalable à tout ouvrage de génie civil, toute souhaitable qu'elle soit, est pourtant rarement entreprise, d'autant qu'elle ne garantit pas la sécurité de l'ouvrage. L'ingénieur voudrait des certitudes (résistance, étanchéité d'une couche, ...) que le géologue ne peut fournir. On parle d'ailleurs le plus souvent d'une étude des risques et de faisabilité plutôt que d'une expertise géologique, puisque si la géologie appliquée ne peut être une science exacte (non du fait de ses concepts mais dans ses prévisions).

Des exemples de grands ouvrages d'art (ponts, tunnel sous la manche, métropolitain...) ont été traités en cours de SVT dans cette optique dans les programmes du secondaire (1ère S, 1ère L et ES) mais sont actuellement abandonnés.