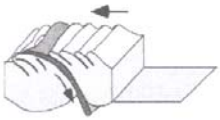
Etude de transformations minéralogiques à l'échelle locale et leur interprétation à l'échelle globale

Premier exemple dans les Alpes : les gabbros du Chenaillet

Dans les Alpes françaises, on retrouve des morceaux de l'ancien océan qui séparait (avant la collision) la marge européenne et la marge apulienne (ou africaine). De tels morceaux de lithosphère océanique, retrouvés dans des chaines de montagne, sont nommés **ophiolites** :

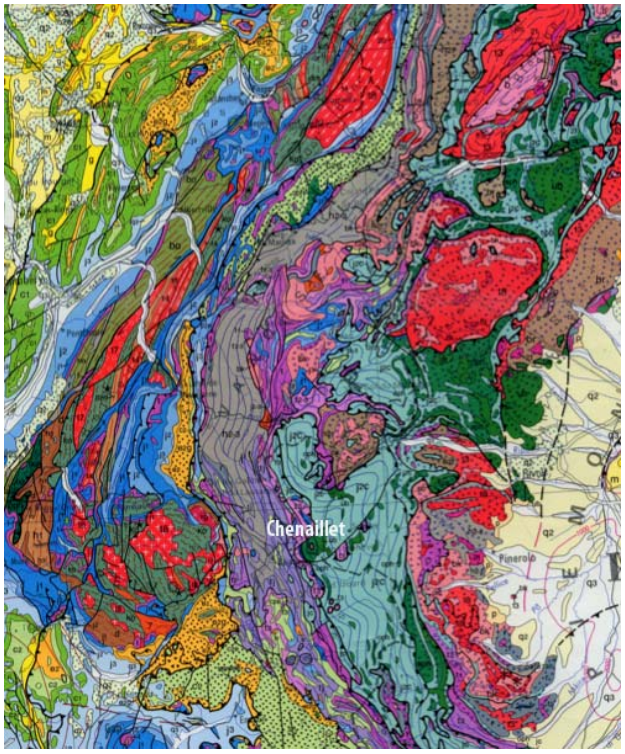
Avant la convergence Europe / Afrique

Marge européenne **Marge africaine**



Représentation schématique des Alpes, après la collision des deux marges. On a de la lithosphère océanique incorporée dans la chaine.

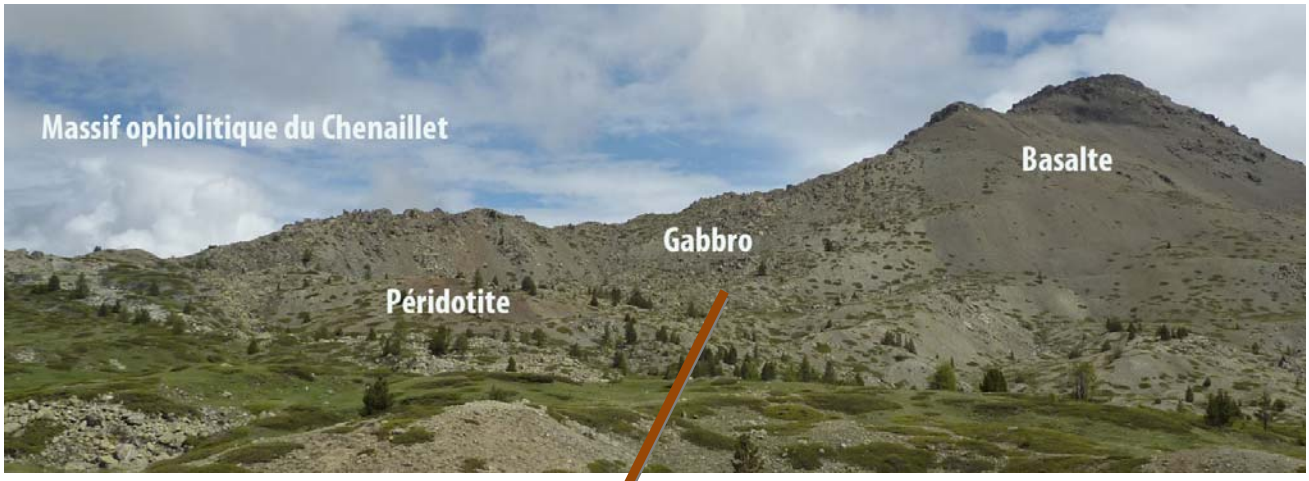
A côté de Briançon, il existe un massif d'ophiolites : le Chenaillet, visible sur la carte géologique de la France au millionième :

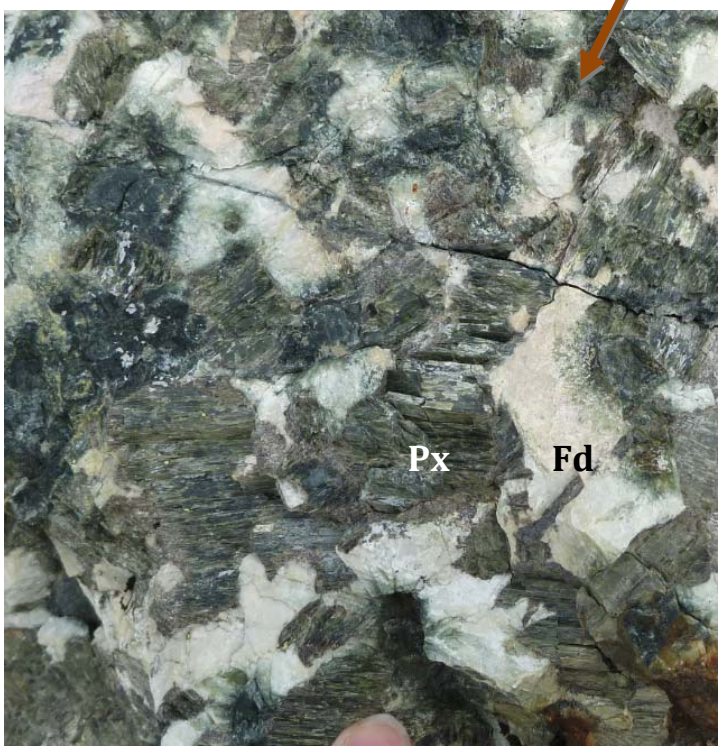


Extrait de la carte géologique de la France. (BRGM)

Les ophiolites sont en vert foncé sur la carte.

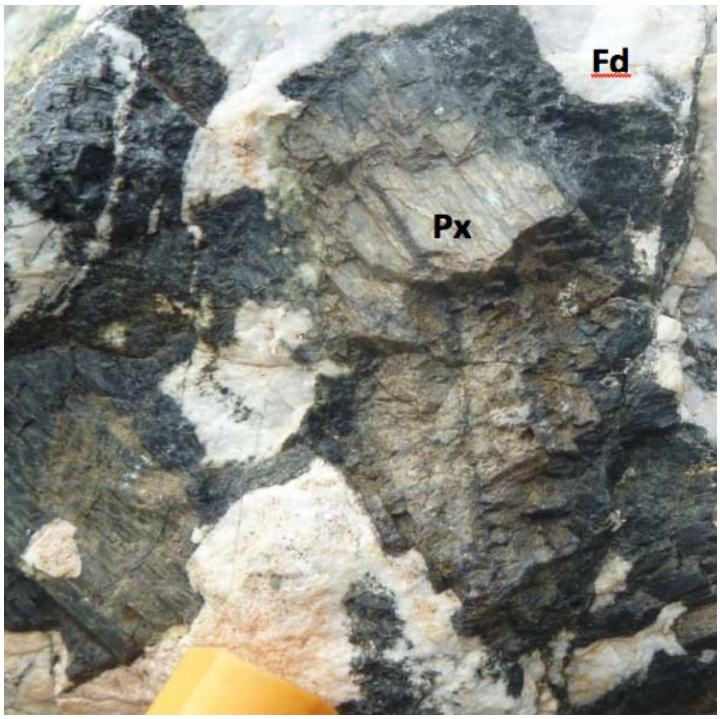
Au Chenaillet, on peut échantillonner les roches de la lithosphère océanique de l'ancien océan alpin : Basalte, gabbro et péridotite.





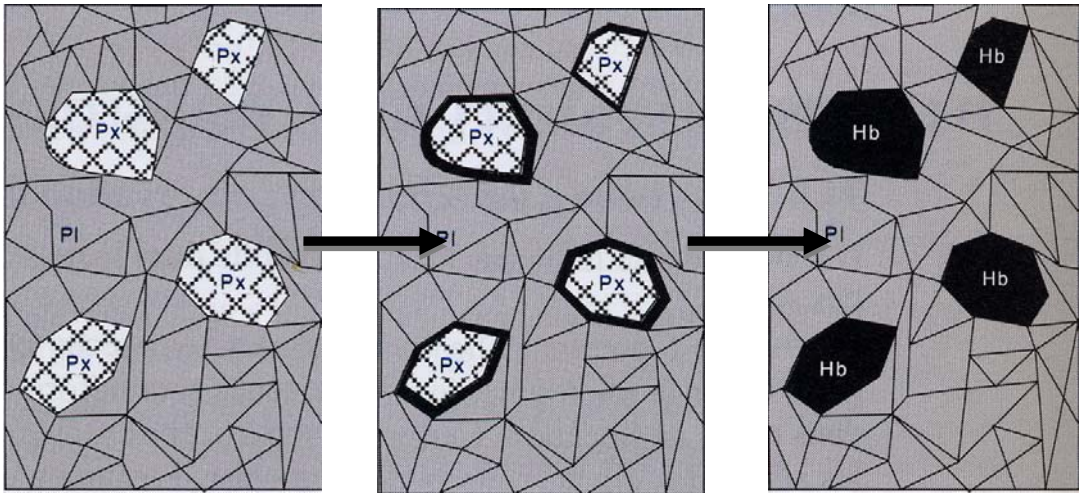
Les gabbros sont des roches qui se forment par refroidissement lent d'un magma à l'axe des dorsales océaniques : ce sont des roches **magmatiques plutoniques** qui renferment, comme on peut le voir sur la photo, deux types de minéraux :

Feldspaths (Fd) et pyroxènes (Px) (cf fiches roches magmatiques)



Cependant, si on regarde en détail les pyroxènes, on constate que certains (Px sur la photo ci-contre) présentent une auréole sombre. Au microscope, on constate que cette **couronne** autour du pyroxène est de **l'amphibole verte.**

Schémas d'interprétation :



Gabbro initial avec Pyroxènes (Px) et Feldspaths plagioclases (Pl) stables dans un domaine de P et T°.

(cf photo ci-dessus)

On modifie P et T°, le pyroxène et le plagioclase sont déstabilisés. Ils réagissent ensemble pour former un nouveau minéral : l'amphibole verte (ou Hornblende) qui sera stable dans les nouvelles conditions de P et T°.

La réaction est complète. Tout le pyroxène est remplacé par l'amphibole (Hb) stable dans les nouvelles conditions de P et T°.

La transformation minéralogique se fait par microdiffusion d'éléments chimiques entre le pyroxène et le plagioclase. Elle se fait bien à l'état solide, à la suite de variations de P et T°, c'est donc du métamorphisme !

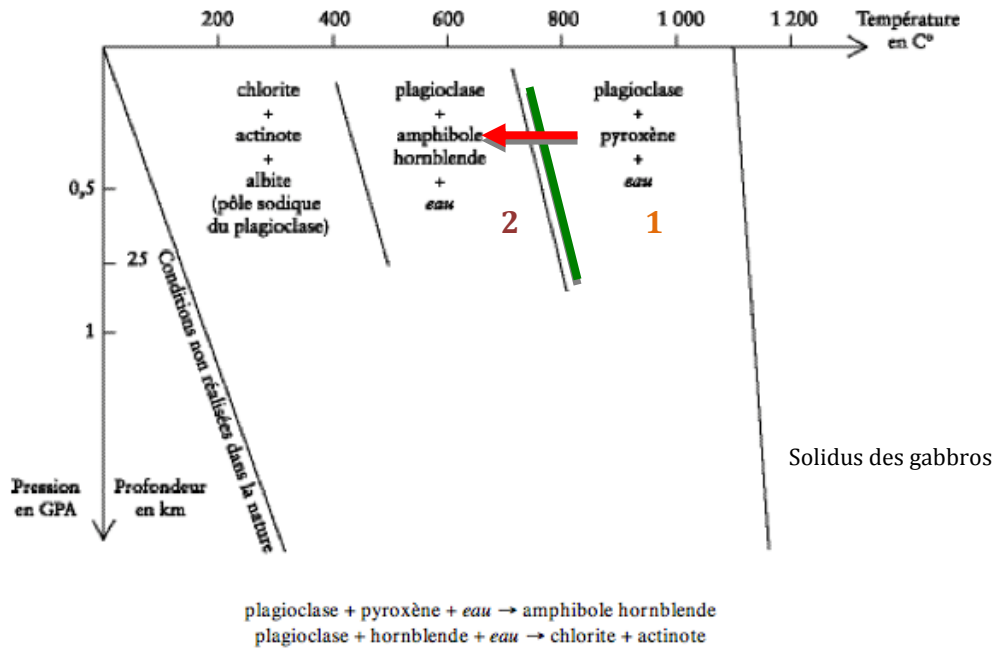
En chronologie relative (cf fiche), d'après le principe d'inclusion, le pyroxène est inclus dans la couronne d'amphibole, il lui est donc antérieur, et la réaction minéralogique est bien :

$$\mathbf{Px + Pl \underset{\Delta P\ T°}{\Rightarrow} Amphibole}$$

Cette réaction, pour se produire, nécessite des variations de P et T° par rapport aux conditions initiales de formation de la roche, mais également un **apport d'eau.**
En effet, les pyroxènes et les plagioclases n'en renferment pas (de l'oxygène O mais pas d'hydrogène H dans leur formule chimique), alors que l'amphibole est un minéral hydraté.

Recherche de la nature de la ΔP T°, subie par la roche :

L'apparition de l'amphibole montre que le gabbro initial subit des variations de P et T°. Pour connaître ces variations, on utilise des grilles expérimentales établies en laboratoire, qui donnent les domaines de stabilité des minéraux en fonction des deux paramètres du métamorphisme P et T° :



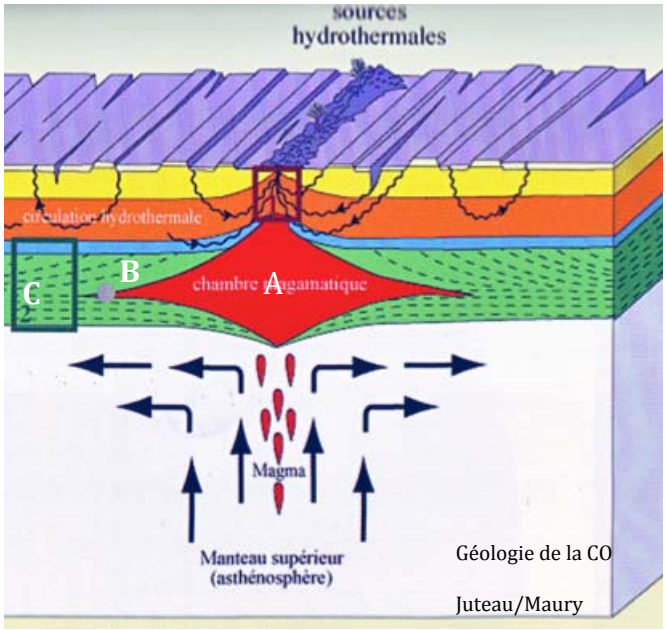
En **1** : domaine de stabilité des minéraux du gabbro, Plagioclase et Pyroxène
En **2** : domaine de stabilité de l'amphibole
Droite verte : droite qui sépare les deux domaines de stabilité des minéraux

Pour cette réaction observée dans les gabbros du Chenaillet : **Px + Pl ⇒ Amphibole,** le diagramme montre qu'on passe du domaine 1 au domaine 2, principalement par une **diminution de la T°**(flèche rouge), et une hydratation de l'échantillon.

La réaction coronitique avec apparition de l'amphibole indique donc un métamorphisme lié à une diminution de T° et à une hydratation de la roche.

Interprétation de ce métamorphisme à l'échelle globale :

Pour rechercher les origines du métamorphisme du gabbro et de son hydratation, il faut se replacer dans le cadre de la tectonique des plaques :



Basalte

Complexe filonien

Gabbro

Les gabbros prennent naissance à l'axe des dorsales (A), par refroidissement lent en profondeur du magma.

Ensuite, ces gabbros vont s'éloigner de l'axe de la dorsale (qui est une zone d'accrétion et de divergence), et on va les retrouver en (B), puis en (C)…

En conclusion :

Durant cet éloignement de l'axe de la dorsale, les gabbros vont se refroidir et s'hydrater :

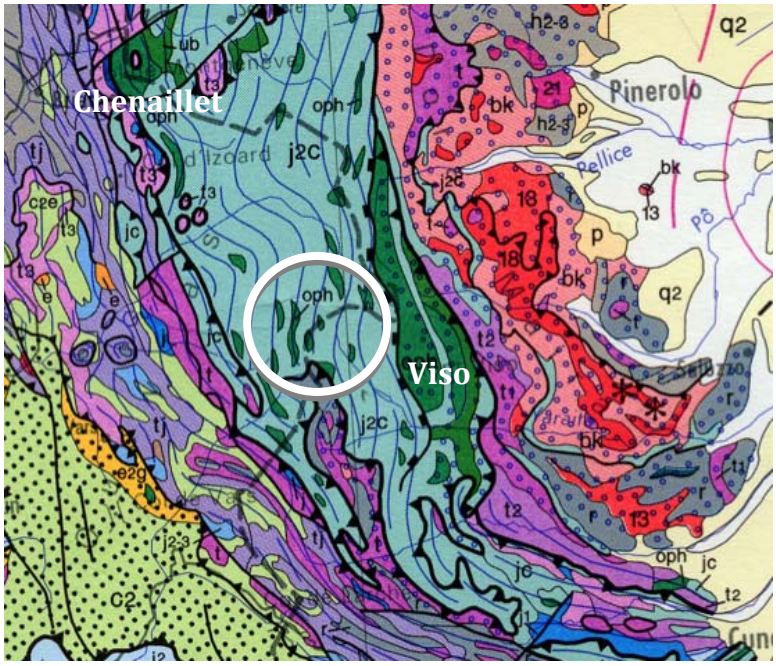
- carl'axe de la dorsale est un secteur chaud
- car l'eau de mer circule au sein de la croûte (**hydrothermalisme**, dont les manifestations les plus connues sont les sources chaudes hydrothermales ou fumeurs noirs, et les oasis de vie associées) qui permettent à la fois d'évacuer de la chaleur, et d'hydrater les gabbros (convection hydrothermale représentée sur le doc ci-dessus**).**
-

Ces conditions particulières vont entraîner un métamorphisme que l'on peut qualifier d'hydrothermal. Les gabbros métamorphisés seront par la suite incorporés à la chaine de montagnes.

Ainsi, un contexte géodynamique en divergence permet d'expliquer le métamorphisme avec hydratation et abaissement de T° des gabbros observés dans les Alpes, témoins d'une ancienne lithosphère océanique.

Etude de transformations minéralogiques à l'échelle locale et de leur interprétation à l'échelle globale

Deuxième exemple dans les Alpes : évolution du métamorphisme de gabbros d'Ouest en Est

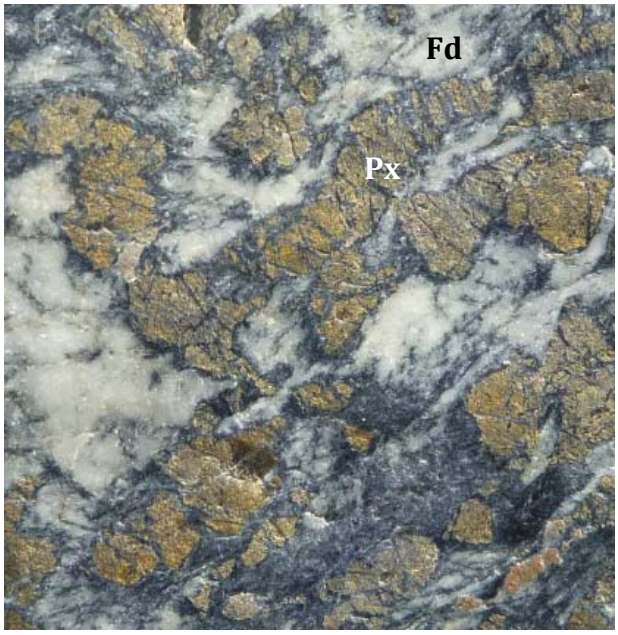


Dans cet exemple, nous allons étudier le **métamorphisme** qui affecte les **gabbros d'Ouest en Est** dans les Alpes (c'est-à-dire du secteur entouré en blanc au secteur du Viso, sur la carte ci-contre) pour finir par l'interpréter dans le cadre de la tectonique des plaques

1- Mise en évidence de transformations minéralogiques

⇒ ***Dans les gabbros du domaine entouré en blanc (domaine liguro-piémontais).***

Les gabbros sont échantillonnés au niveau de lambeaux d'ophiolites (en vert sur la carte, oph) :

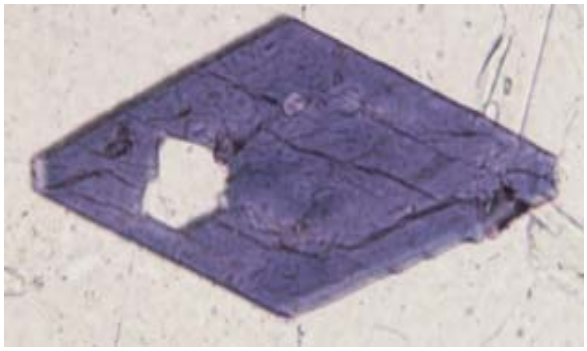


Réaction coronitique incomplète autour du pyroxène

La réaction est complète. Le pyroxène est totalement remplacé par un nouveau minéral

Comme dans l'exemple précédent, les minéraux du gabbro, déstabilisés, donnent un nouveau minéral sombre, en couronne autour du pyroxène. Sur la deuxième photo, le pyroxène est complètement remplacé par le nouveau minéral.

Ce nouveau minéral s'identifie très facilement en microscopie :



Il s'agit de **l'amphibole bleue ou glaucophane.**

La couleur bleue est bien visible en lame, mais en macroscopie, comme tous les minéraux ferromagnésiens, l'amphibole est sombre.

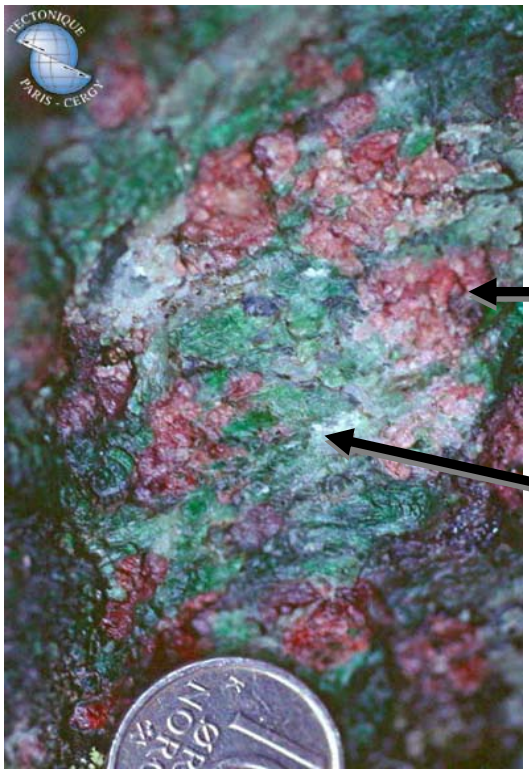
La réaction observée ici est donc :

Px + Fd ⇒ Glaucophane

Comme dans le premier exemple, l'apparition du glaucophane indique que ces gabbros de l'ancien océan alpin ont subi des variations de P et T°.

⇒ Dans les gabbros du secteur du Viso (cf carte)

Dans le secteur du Viso, les minéraux initiaux des gabbros ont été complètement remplacés par une nouvelle association minérale (ou paragenèse) :



Grenat

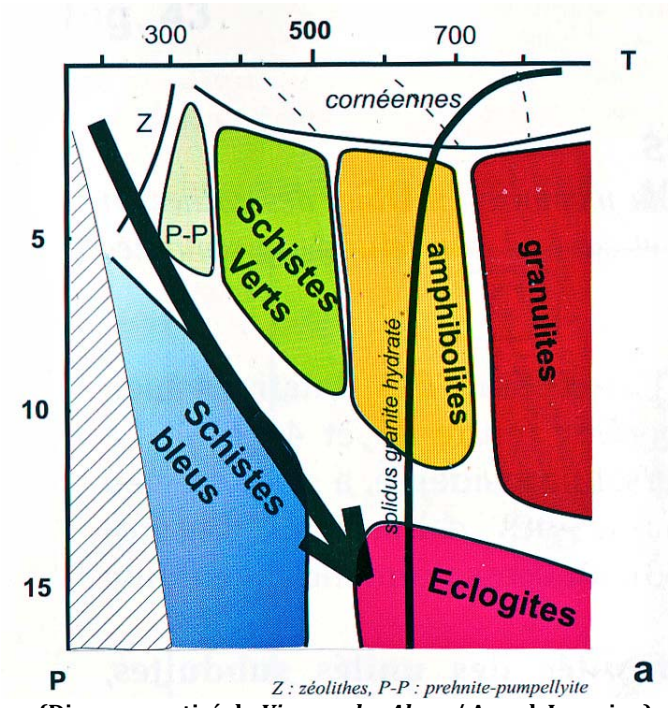
Omphacite (pyroxène particulier)

Cette association minérale caractérise également des variations de P et T° subies par les gabbros de ce secteur.

2- Utilisation des grilles expérimentales pour interpréter les variations de P et T°

A partir des grilles expérimentales, on regarde la signification de :

- l'apparition du glaucophane dans les gabbros du secteur entouré en blanc
- l'apparition du grenat + omphacite plus à l'Ouest, au niveau du Viso



(Diagramme tiré de *Visages des Alpes* / Agard, Lemoine)

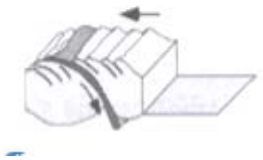
- Le domaine de stabilité du **glaucophane** est coloré en bleu sur le diagramme (domaine des schistes bleus). Il se trouve proche de l'axe des pressions (au minimum 5 Kbar = 3 x 5 = 15 Km d'enfouissement), pour des T° relativement faibles (par rapport aux autres domaines du diagramme).

- Le domaine de stabilité du **grenat + omphacite**, caractérise un domaine de haute pression : domaine des éclogites. On voit sur le diagramme que cet assemblage minéralogique ne peut pas se développer en dessous de 14 Kbar, soit un enfouissement de 3 x 14 = 42 Km.

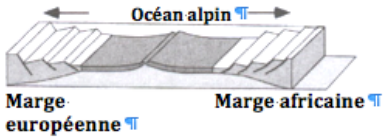
D'après ces données, on constate que le métamorphisme d'Ouest en Est dans les Alpes est **croissant ou prograde** (flèche noire sur le doc). Ce métamorphisme est qualifié de **haute pression/basse température (HP/BT°)**. En effet, normalement pour un enfouissement d'un kilomètre, l'augmentation de T° est de 30°C (gradient géothermique moyen au niveau du globe).

Ici, dans les Alpes, pour un enfouissement de 1 km, l'augmentation de T° est de l'ordre de 8°C seulement. Seul un contexte géodynamique particulier va permettre d'expliquer ce métamorphisme de HP/BT° observé dans les Alpes :

3- Interprétation de ce métamorphisme à l'échelle globale :



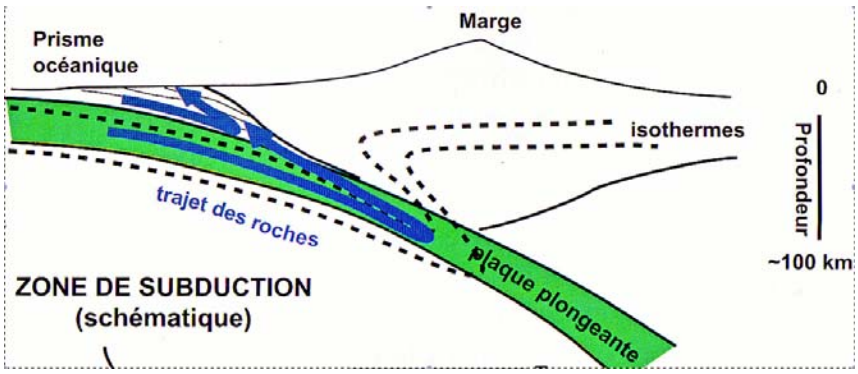
Les gabbros métamorphisés que nous venons d'étudier ont été incorporés au niveau des Alpes au moment de la collision.



Ils appartenaient à l'ancien océan alpin qui séparait la marge européenne de la marge apulienne.

Le métamorphisme qui affecte ces gabbros indique qu'ils ont subi une forte augmentation de pression, pour une augmentation de T° relativement faible. Ces conditions métamorphiques indiquent qu'ils sont **entrés en subduction :**

Au cours de cette subduction, les gabbros ont subi un enfouissement, donc une augmentation de P importante. Par contre, la lithosphère froide ainsi enfouie a mis du temps à se réchauffer. Par conséquent, il existe au niveau de la lithosphère plongeante une dépression des isothermes (en pointillés noirs sur le diagramme):



Ainsi, les T° exercées pour une pression donnée sont inférieures à ce qu'elles devraient être dans un secteur stable de l'écorce terrestre.

Ce métamorphisme **de HP/BT°** observé dans les gabbros est un des **marqueurs géologiques de la subduction de l'océan alpin** qui s'est faite avant la collision et la formation de la chaine des Alpes.

(Les gabbros de la lithosphère entrent dans la subduction, subissent le métamorphisme de HP/BT°, certains vont remonter (flèche bleue sur le doc ci-dessus) et seront incorporés à la chaîne de montagne au moment de la collision : on parle d'**exhumation** pour ces gabbros.

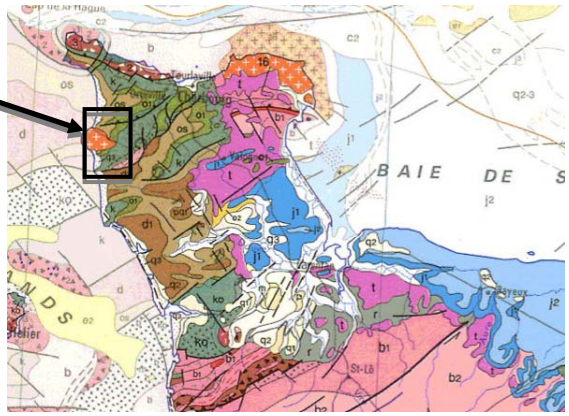
Etude de transformations minéralogiques à l'échelle locale et de leur interprétation à l'échelle globale

Troisième exemple en Normandie : cas particulier du métamorphisme de contact

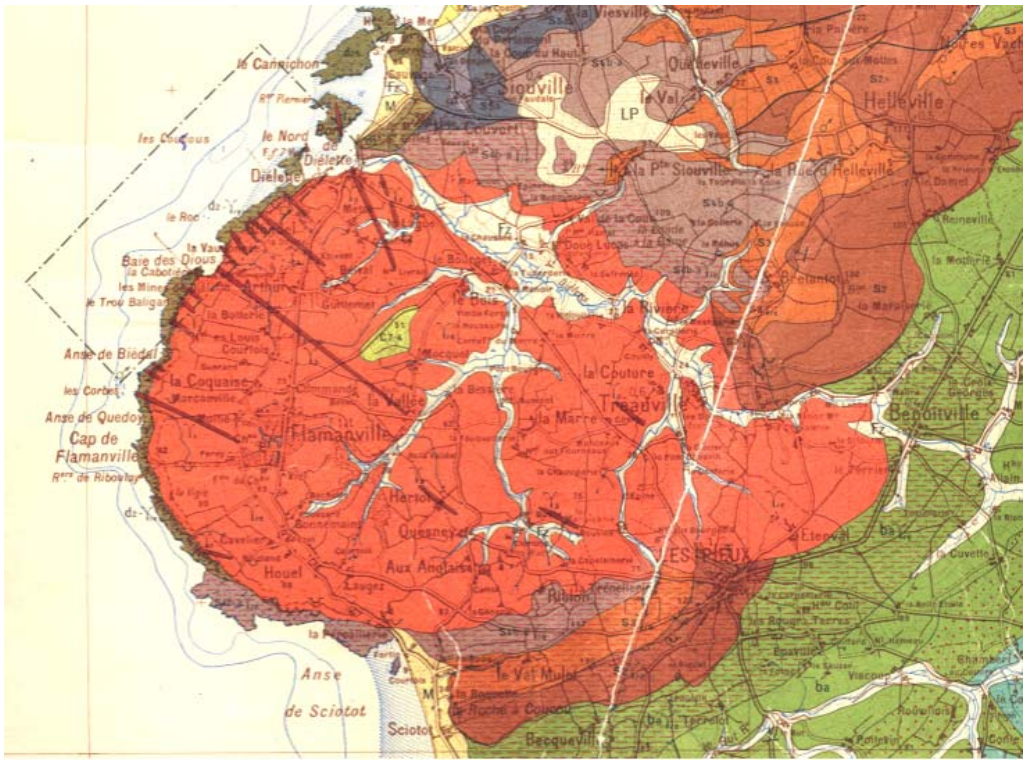
Nous allons étudier un cas de métamorphisme dans le Cotentin, dans le secteur de Flamanville.

A l'échelle de la carte au millionième (1 cm pour 10 km) ci-contre, le métamorphisme n'est pas visible.

Il faut passer à une carte au 50 000ème (1 cm représente 500 m) pour qu'il soit représenté.



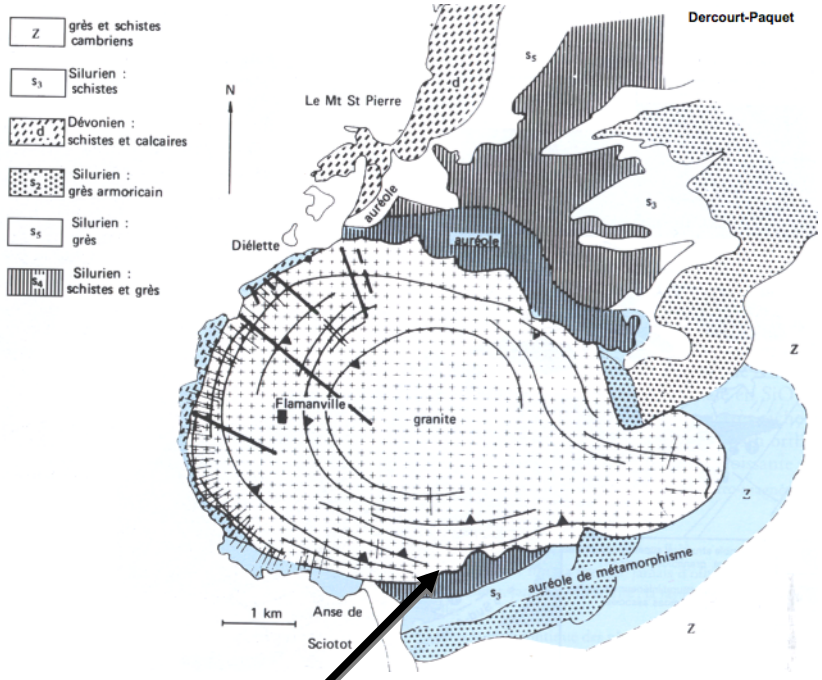
1- Nature du métamorphisme



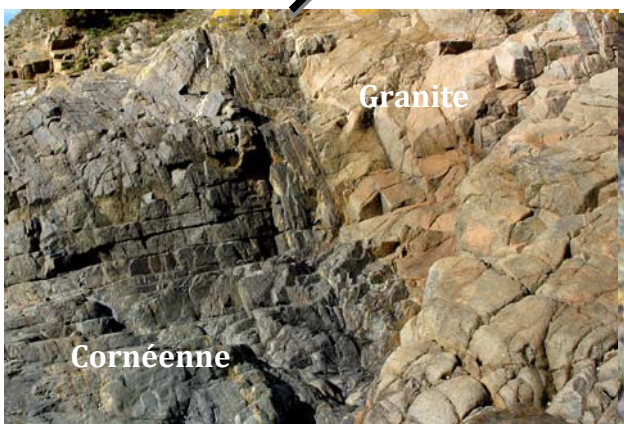
Carte géologique de Cherbourg au 50 000ème

Sur la carte géologique de Cherbourg, et même sur la carte au millionième, on remarque (en rouge) un pluton granitique aujourd'hui à l'affleurement : le granite de Flamanville.

Quand on regarde la légende de la carte, on constate que le granite est entouré par des roches au départ sédimentaires : des grès, des calcaires. Ceux ci sont très anciens, puisqu'ils sont cambriens, siluriens ou dévoniens = ère primaire.



Cependant, dans tout le secteur bleuté autour du granite, ces roches sédimentaires d'origine sont transformées, elles ont subi un métamorphisme.



Les roches sédimentaires au contact du granite ont été métamorphisées. Elles apparaissent ici très sombres, légèrement déformées. On y observe surtout en lame de nombreuses recristallisations des minéraux : ce sont des **cornéennes**

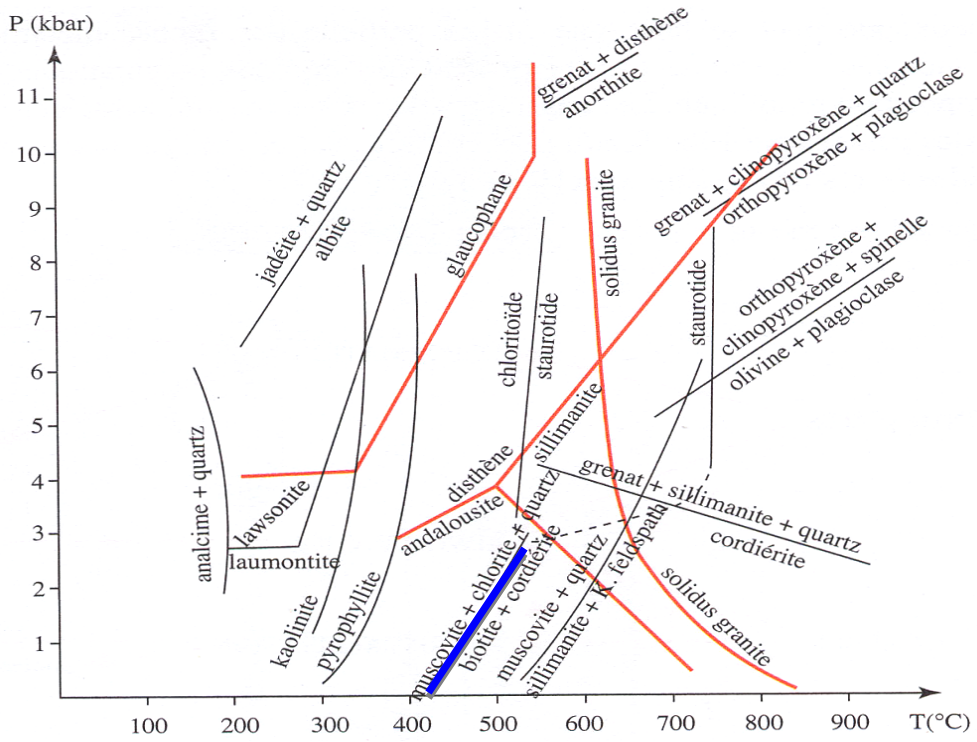
Photo lithothèque de Normandie

Au delà de 500 m du granite, les roches sont moins déformées et présentent un aspect tacheté, lié à la présence d'un minéral du métamorphisme : **la cordiérite**. On trouve également un autre minéral du métamorphisme : **l'andalousite (cf. cours).**

Photo lithothèque de Normandie

2- Intensité de ce métamorphisme

C'est la présence des minéraux du métamorphisme : **cordiérite et andalousite** qui va nous permettre d'estimer son **intensité.** Pour cela, on utilise les grilles expérimentales (cf. cours) :



L'andalousite est une des trois formes minérales du silicate d'alumine, de formule : **Al_2SiO_5.**

C'est la forme de **basse pression (moins de 4 kbar),** mais de T° relativement élevée. Ce qui est confirmé par la présence de la cordiérite : la droite d'équilibre en bleu montre que la cordiérite apparaît pour une **T° de l'ordre de 400/500°C.**

On a donc ici un métamorphisme lié essentiellement **à la température,** on parle de **thermométamorphisme.**

3- Origine de ce métamorphisme

- **Le métamorphisme est en auréole autour du granite.**
- **Il est plus intense au contact du granite, et décroit rapidement quand on s'en éloigne.**
- **Il est essentiellement lié à une augmentation de T°**

A partir de ces différentes observations, on peut penser que l'origine de ce métamorphisme est à rechercher au moment de la mise en place du granite.

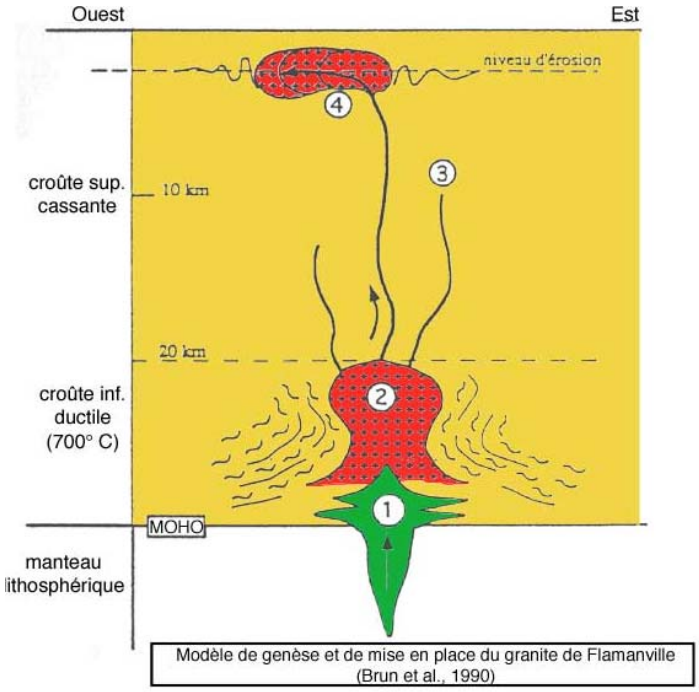


Fig issue du site de la lithothèque de Normandie

Secteurs 1 et 2 : naissance du magma qui va donner le massif granitique de Flamanville en 4

Secteur 4 : Le magma granitique qui a pris naissance dans la croûte inférieure remonte par des filons, et donne naissance à un massif granitique dans la croûte supérieure cassante (4) : massif de Flamanville. Celui ci sera par la suite mis à l'affleurement (niveau d'érosion).

Le liquide granitique remonte au sein de la croûte en raison de sa faible densité (poussée d'Archimède). La remontée est assez rapide pour qu'il reste chaud (à peu près 800°C).

En s'accumulant dans un secteur donné (comme en 4), ce magma va progressivement élever la T° des roches encaissantes, en raison de sa T° propre, mais également parce qu'il commence à cristalliser. En effet, les réactions de cristallisation sont des réactions exothermiques qui vont libérer de la chaleur et échauffer les roches encaissantes. Celles ci subissent alors un métamorphisme essentiellement par augmentation de la T°.

Les roches affectées sont d'autant plus métamorphiques qu'elles sont au contact du granite. Le gradient de T° décroit rapidement lorsqu'on s'éloigne du massif granitique, il est très localisé (quelques km), on parle de **métamorphisme de contact** ou **thermométamorphisme.**