

PETROGRAPHIE DES ROCHES METAMORPHIQUES

2^{ème} STU – S2- 2019/2020

HEBIB HAKIM

Syllabus

Matière 2 : F412 : Pétrologie des roches métamorphiques

Crédits : 2

Coefficient : 1

Enseignant de la matière : Hebib Hakim

Année universitaire : 2018-2019

Semestre : 2

Objectifs de l'enseignement

Il s'agit de donner à l'étudiant les éléments lui permettant d'étudier les roches métamorphiques, leur mode de formation et leur classification afin de bien les différencier des autres grands groupes de roches (magmatiques et sédimentaires).

Connaissances préalables recommandées

Maîtriser la partie pétrographie du module de géologie du L1 ainsi que les cours de cristallographie et minéralogie.

Contenu de la matière :

Cours

I- Définition du métamorphisme

II - Les facteurs du métamorphisme

III - Les différents types de métamorphisme

- métamorphisme local

- métamorphisme général ou régional

IV - Les faciès métamorphiques

- dans le métamorphisme de contact

- dans le métamorphisme général

V - Classification et nomenclature des roches métamorphiques.

TP (3 Séances)

- Reconnaissance des structures des roches métamorphiques (schistosité, foliation).

- Reconnaissance et description des faciès de roches métamorphiques.

Mode d'évaluation :

Examen

Références bibliographiques :

J. Aubouin, R. Brousse, J.P. Lehman, **Précis de géologie. Tome 1 : pétrologie.** Dunod, 1968. 712 pages.

Jean-Claude Pons. **La pétro sans peine 2 : minéraux et roches métamorphiques.** CRDP de l'académie de Grenoble, 2002, 240 pages.

William S. MacKenzie, Anthony E. Adams. **Initiation à la Pétrographie.** Dunod, 2005, 192 pages.

Jean-François Beaux, Bernard Platevoet, Jean-François Fogelgesang. **Atlas de Pétrologie.** Dunod, 2012, 144 pages.

I- Définition du métamorphisme

métamorphisme n. m. [de méta-, et du gr. *morphê*, forme] - Transformation d'une roche à l'état solide du fait d'une élévation de température et/ou de pression, avec cristallisation de nouveaux minéraux, dits néoformés, et acquisition de textures et structures particulières, sous l'influence de conditions physiques et/ou chimiques différentes de celles ayant présidé à la formation de la roche originelle. Les phénomènes métamorphiques sont multiples et complexes, et les roches métamorphiques très variées, d'où une typologie et une nomenclature complexes elles aussi.

II - Les facteurs du métamorphisme

Les facteurs du métamorphisme sont la température et la pression auxquels peut s'ajouter le facteur temps.

II. 1 - la température est le facteur principal, qui augmente avec la profondeur (*gradient géothermique*) et/ou avec la mise en place des roches magmatiques ;

La température terrestre (T) augmente avec la profondeur. Les variations de T sont décrites par le gradient géothermique. Dans la lithosphère continentale, ce gradient est loin d'être homogène car il dépend de l'histoire tectonique de la région. Le gradient moyen est de 30 °C/km ; il s'élève à 50 °C/km dans les zones orogéniques et s'abaisse à seulement 6 °C/km dans les zones de subduction. La cause principale de la température élevée (600 °C) à la base de la croûte continentale est la présence d'une radioactivité importante (U, Th, K) dans cette enveloppe. Localement, un gradient thermique fort peut se développer, d'origine tectonique, hydrothermale ou magmatique. Les frottements au niveau des grands décrochements ou chevauchements, les circulations de fluides et la présence de plutons produisent également des élévations locales de T.

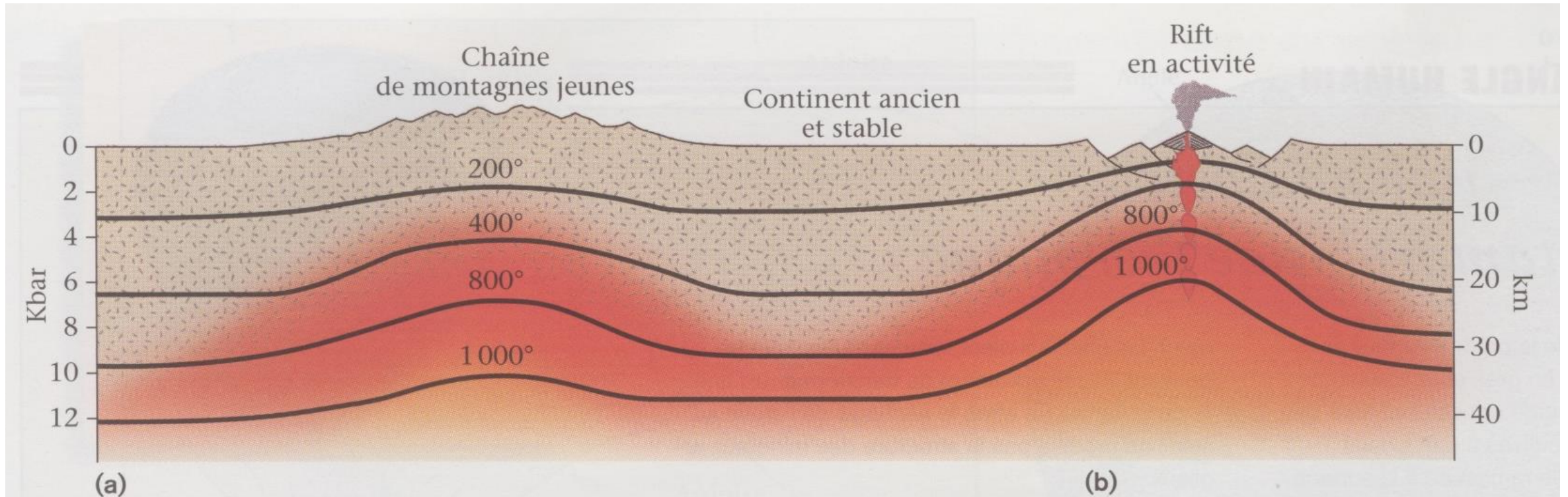


Fig.1 Le changement de température en fonction de la profondeur à différents endroits d'un continent. Les lignes en trait plein sont des isothermes — elles relient les lieux présentant une température identique (le long de l'isotherme 300°C, la température est toujours de 300°C). **(a)** Sous une chaîne de montagnes jeunes, due à une collision et **(b)** sous un rift en activité. Remarquez que les isothermes remontent à des profondeurs plus faibles sous les chaînes de montagnes, car les plutons transportent de la chaleur dans ces zones superficielles. Par contre, la croûte est plutôt froide sous les continents anciens et stables.

II. 2 - la pression, qui augmente avec l'enfouissement, mais aussi sous l'effet de contraintes diverses (*pressions orientées*).

L'augmentation de pression favorise, à partir des mêmes composants, l'apparition de minéraux plus denses. C'est un cas particulier de la loi de Le Chatelier : « un système chimique, comprimé à température constante, déplace son équilibre du côté où la réaction se fait avec diminution de volume ». Ainsi l'olivine réagit avec l'anorthite pour donner des grenats avec une contraction de 17 %. Les aluminosilicates sont eux plus denses à haute pression (*fig. 19.2*). L'albite, seule, fortement comprimée, perd de la silice et donne un pyroxène, la jadéite, soit globalement :



Becke avait noté, dès 1903, cette influence de la loi des volumes, amenant en profondeur la genèse de certains minéraux. Il avait d'autre part remarqué que la température joue en sens inverse de la pression pour bien des réactions résultant du métamorphisme.

on peut distinguer 3 "types" de pression s'exerçant sur une roche; Fig. 2

1) la pression lithostatique (P_L) qui est la pression exercée sur une roche, par les roches qui la surmontent. Cette pression est fonction de la densité des roches et de la profondeur à laquelle elle s'exerce. Elle est isotrope, c'est à dire homogène dans toutes les directions et n'engendre donc pas de déformation.

2) les contraintes tectoniques (C_T) : il s'agit de la pression exercée sur les roches par l'action des forces tectoniques, elle est liée aux chevauchements et aux processus orogéniques. Elle est donc anisotrope car elle n'est pas homogène dans toutes les directions de l'espace : elle est orientée et engendre des déformations et l'apparition de nouvelles structures à différentes échelles.

3) la pression des fluides (P_f) : c'est la pression exercée au sein des pores des roches par les fluides. Elle dépend de la présence d' H_2O et de CO_2 qui peuvent être présents dans les interstices et libérés lors de réactions chimiques de déshydratation ou de décarboxylation. La P_f favorise la circulation de fluides, accélère les réactions de transformations minérales, les échanges de matière et abaissent la température de début de fusion des matériaux.



Fig.2 - [Cours MasterPro](#) - Université de Bourgogne

⇒ L'action combinée de ces 3 pressions engendre des transformations.

Le facteur temps, préservation des assemblages, vitesse d'exhumation

La plupart des minéraux sont *métastables* et se maintiennent sans changements notoires, en dehors de leur domaine de formation. La métastabilité permet d'observer à la surface terrestre des paragenèses d'origine profonde. Ainsi, des amphiboles, des pyroxènes, des grenats de haute pression sont-ils parfaitement conservés à la surface de la Terre.

Les réactions de formation des minéraux sont théoriquement réversibles. Dans une évolution orogénique, les réactions progrades se produisent lors de l'enfouissement mais les réactions rétrogrades dont la cinétique est extrêmement lente ne se produisent pas en général. Toutefois, les paragenèses acquises lors de l'enfouissement maximum pourront être partiellement ou totalement effacées si au cours de la remontée, les unités métamorphiques restent dans des conditions intermédiaires pendant un temps assez long.

Durant le cycle orogénique, les roches sont rapidement extraites des conditions P, T qui ont présidé à la genèse des assemblages progrades. La vitesse de remontée des unités profondes, ou *vitesse d'exhumation* est un facteur essentiel de conservation des assemblages métamorphiques. Dans le cas où plusieurs paragenèses de faciès différents sont conservées, une vitesse d'exhumation peut être calculée sur la base des datations radiochronologiques des différents assemblages.

(*) Paragenèse : association de minéraux qui sont, ensemble, stables dans certaines conditions pression-température et qui caractérise le chimisme général de la roche.

Les apports chimiques (dans certains cas), la composition originelle des roches ayant été modifiée par des apports, et des départs d'éléments, tels Si, Al, Na, K, etc. On dit alors que le métamorphisme est allochimique. Ce type de métamorphisme est d'extension limitée, et concerne surtout le métamorphisme de contact ou le métamorphisme hydrothermal.

Le plus souvent, et en particulier pour les roches du métamorphisme général, on a un métamorphisme **isochimique** (ou topochimiques, ou normal). A l'échelle de l'échantillon et de la formation, la composition originelle des roches n'a pas été modifiée, excepté pour les teneurs en H₂O et CO₂ qui diminuent lorsque le métamorphisme augmente.

II. 3 – Les limites du métamorphisme

Étant liées à divers facteurs, les limites du métamorphisme sont peu tranchées :

- **La limite inférieure**, correspondant au métamorphisme le plus faible, se situe vers $T = 100$ à 200°C , et vers $P = 1$ kbar.

Les transformations qui affectent les roches à T et P plus faibles correspondent alors soit à la diagenèse, soit à l'altération;

- **La limite supérieure** est atteinte, par définition, lorsque débute la fusion (V. anatexie) à T et P élevées variables selon les cas, avec en moyenne $T > 600^{\circ}\text{C}$ et $P > 3$ ou 4 kbar.

En conclusion : Le domaine du métamorphisme est borné par deux limites :

- La diagenèse pour les basses températures : ensemble des processus transformant un dépôt sédimentaire en roche sédimentaire (compaction, dissolution, lithification).
- L'anatexie pour les hautes températures : ensemble des processus par lesquels les roches métamorphiques subissent une fusion partielle.

III - Les différents types de métamorphisme

On distingue deux sortes primordiales de métamorphismes, les autres formes étant moins fréquentes :

III. 1 - métamorphisme général ou régional

III. 2 - métamorphisme local

III. 1 - métamorphisme général

Le métamorphisme général (ou métamorphisme régional), qui affecte l'ensemble des roches sur des épaisseurs et des superficies importantes

- dans les domaines non plissés, c'est la base des séries sédimentaires qui subit le métamorphisme **statique** ou d'**enfouissement**; **métamorphisme peu marqué et non déformant** ;
- dans les grandes chaînes plissées, le métamorphisme débouche sur la formation de roches métamorphiques cristallophylliennes (schistes, micaschistes, gneiss), ensembles importants constituants du substratum; ces roches ont subi de fortes déformations tectoniques, si bien que l'on parle de **métamorphisme dynamothermique**.

C'est le type de métamorphisme qui produit la plus grande quantité de roches métamorphiques. Les transformations observées sont liées aux mouvements tectoniques, affectant de vastes régions (des centaines de kilomètres-carrés). Elles peuvent résulter de :

- l'enfouissement par subsidence (partie profonde d'épais bassins sédimentaires),
- l'empilement d'unités tectoniques crustales dans le cas d'orogénèse,
- la subduction d'une lithosphère océanique
- la collision de lithosphère continentale.

Dans ce cadre, les transformations chimiques sont possibles mais limitées. Par contre, les transformations minéralogiques et structurales sont importantes : les recristallisations se font sous contraintes orientées. Des structures caractéristiques apparaissent (schistosité, foliation, linéation).

EXPLICATION

Le métamorphisme régional ou dynamo-thermique : Le métamorphisme sous les montagnes

Au cours du développement de grandes chaînes de montagnes, en réponse à la tectonique des marges convergentes ou à la collision entre deux continents, de grandes tranches de croûte continentale chevauchent d'autres parties de la croûte. De ce fait, la roche qui était autrefois à proximité de la surface terrestre le long de la marge d'un continent (► Fig. 8.26a) finit par se retrouver à des profondeurs importantes sous la chaîne de montagnes (► Fig. 8.26b). Dans ce nouvel environnement, trois changements se produisent : (1) le protolithe s'échauffe à cause du gradient géothermique et de l'activité magmatique, (2) le protolithe est soumis à une pression plus importante à cause du poids de la roche surincombante et (3) le protolithe subit l'écrasement et le cisaillement à

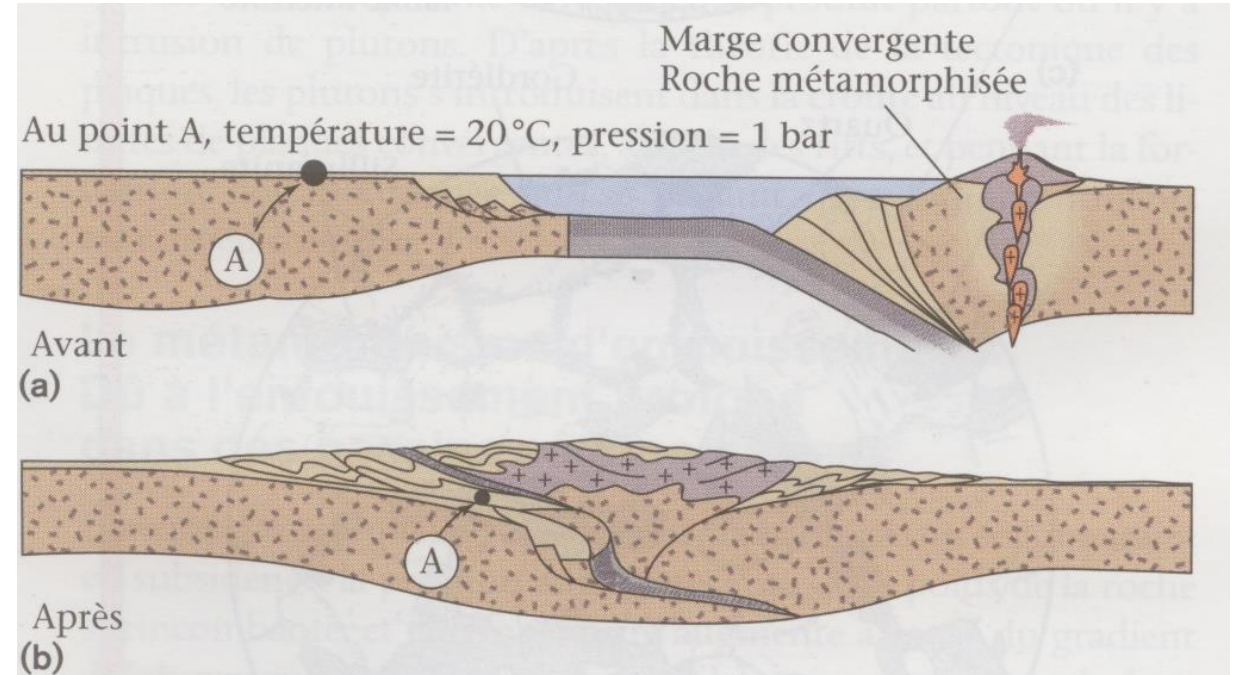


FIGURE 8.26 (a) Le métamorphisme se produit là où il y a une activité plutonique le long d'une limite convergente. Le métamorphisme peut être thermique mais, à cause de la compression et du cisaillement qui se produisent le long des limites convergentes, le métamorphisme peut aussi être dynamo-thermique. (b) La roche sédimentaire qui se trouve au sommet d'une marge passive (point A) est amenée à une profondeur importante par la collision entre deux continents qui conduit à la formation de montagnes. En conséquence, elle subit un métamorphisme dynamo-thermique. Une large région située sous la zone de collision se trouve dans le champ du métamorphisme.

cause de la contrainte différentielle générée par l'interaction des plaques. Suite à ces changements, le protolithe se transforme en roche métamorphique foliée. Le type de roche foliée qui se forme dépend de l'intensité du métamorphisme – l'ardoise se forme à de faibles profondeurs, alors que le schiste et le gneiss se forment à des profondeurs plus importantes. Puisque le métamorphisme que nous venons de décrire n'implique pas uniquement la chaleur mais qu'il implique également le cisaillement et l'écrasement, on peut l'appeler **métamorphisme dynamo-thermique**. Typiquement, ce type de métamorphisme affecte une grande région, ce qui explique que les géologues l'appellent aussi **métamorphisme régional**. L'érosion finit par araser les montagnes, et par faire affleurer une ceinture de roches métamorphiques qui se trouvaient autrefois en profondeur. De telles ceintures peuvent atteindre des centaines de kilomètres de largeur et des milliers de kilomètres de longueur.

On peut noter les faits marquants suivants, propre au métamorphisme régional :

- l'étendue de la zone métamorphique ;
- l'architecture anisotrope des micaschistes ;
- le passage progressif aux phénomènes de fusion.

Différents minéraux apparaissent ou disparaissent successivement ; on peut cartographier les lignes d'iso-apparitions (ou disparitions) de ces espèces minérales (isogrades). Puisque les minéraux ne sont stables que dans un domaine particulier de température et de pression on peut – si les espèces minérales index sont bien choisies – définir ainsi des zones d'intensité de métamorphisme. Dans l'exemple du massif de l'Arize on trace ainsi l'isograde de la séricite + et de la chlorite + (+ signifiant apparition), celui de la biotite +, celui de l'andalousite +, celui de la muscovite–, de l'andalousite– (– signifie disparition), de la sillimanite + et du microcline +.

Un exemple de métamorphisme régional : le massif de l'Arize (Ariège)

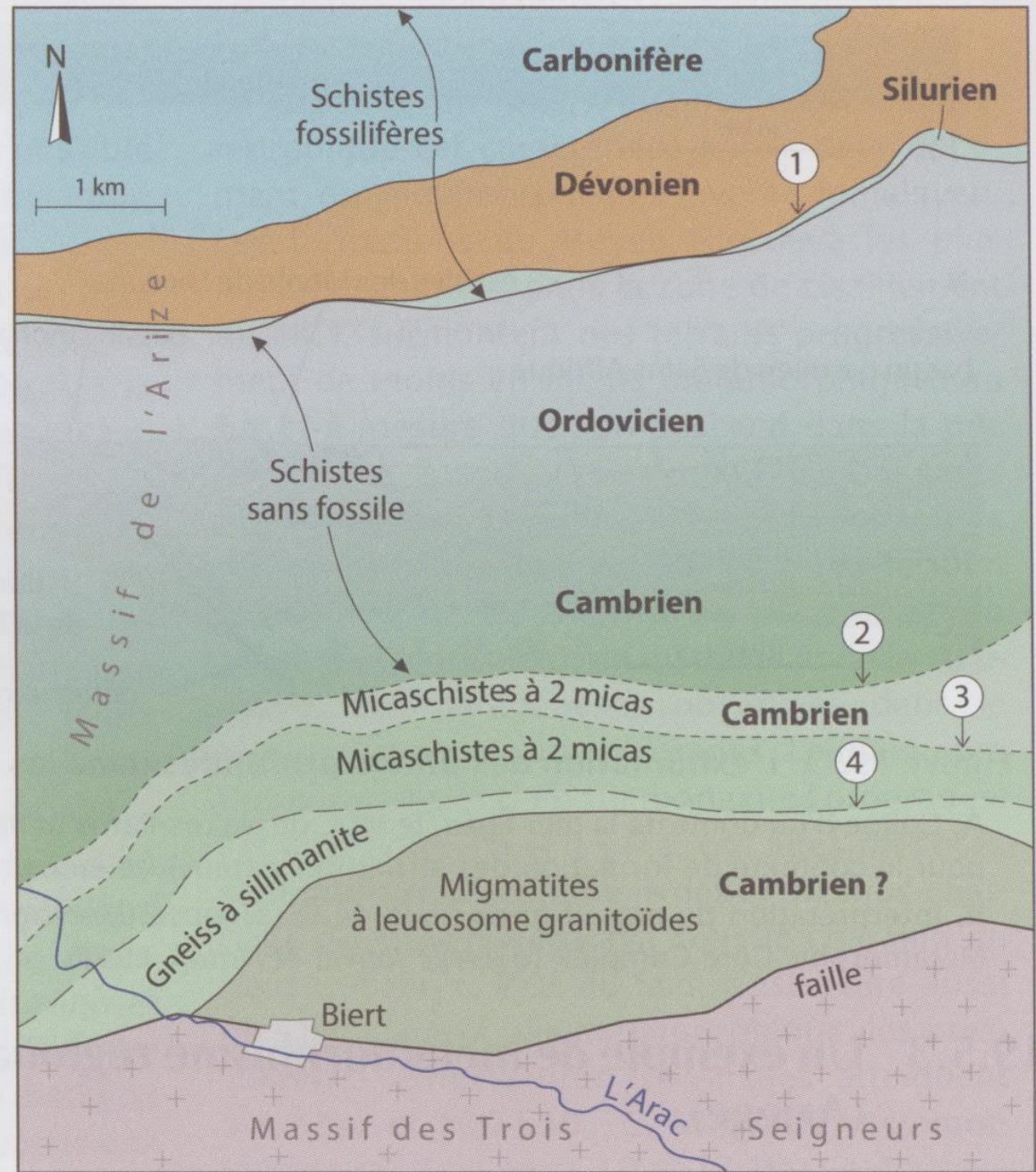
Ce massif, situé sur la carte de Saint-Girons (1/50 000), appartient à la zone structurale nord-pyrénéenne ; un contact tectonique le sépare au sud du massif des Trois-Seigneurs (*fig. 19.13*). Il est principalement constitué d'une série d'âge paléozoïque (allant du Cambrien au sud au Carbonifère au nord). Au nord, la série du Silurien au Carbonifère correspond à des roches sédimentaires peu ou pas transformées, il s'agit principalement de schistes riches en matière organique et de calcaires qui présentent fréquemment des fossiles (Graptolites, Tribolites, Brachiopodes, Polypiers). Cependant, dans les roches de l'assise la plus au sud (Silurien), on observe le développement de minéraux nouveaux : la séricite, la chlorite, qui donnent aux roches un aspect soyeux, et la muscovite. Nous sommes entrés dans le domaine du métamorphisme.

On trouve ensuite un complexe schisto-gréseux, à intercalations de bancs calcaires ; d'âge cambro-ordovicien, il est caractérisé par la paragenèse minérale précédente (séricite, chlorite, muscovite) et par la disparition des restes fossilifères. Plus au sud, la structure des roches change de façon importante ; elles sont formées de lits de nature minéralogique différente, alternativement clairs

On trouve ensuite un complexe schisto-gréseux, à intercalations de bancs calcaires ; d'âge cambro-ordovicien, il est caractérisé par la paragenèse minérale précédente (séricite, chlorite, muscovite) et par la disparition des restes fossilifères. Plus au sud, la structure des roches change de façon importante ; elles sont formées de lits de nature minéralogique différente, alternativement clairs (quartz) et sombres (ferro-magnésiens). Elles présentent alors une schistosité très développée ; ce sont des micaschistes à 2 micas caractérisés par l'apparition d'un minéral nouveau la biotite. Au-delà, les micaschistes s'enrichissent en un nouveau minéral, l'andalousite associée parfois à la cordiérite. Ensuite les feldspaths qui n'étaient que microscopiques dans les roches précédentes se développent et deviennent visibles à l'œil nu. De nombreux changements minéralogiques sont concomitants : disparition de la muscovite et de l'andalousite, apparition de la sillimanite et du feldspath potassique (microcline). Jusqu'aux micaschistes compris, les changements observés ne correspondent qu'à de simples réarrangements minéralogiques ; dans les micaschistes de haut grade, l'apparition du microcline correspond à un début d'anatexie (fusion partielle), cette zone à sillimanite comporte donc des migmatites constituées par un *paléosome* de roches à sillimanite (les restites) et par *un leucosome granitoïde*. L'anatexie se généralisant, on passe ensuite à des migmatites beaucoup plus homogènes, proches des granites d'anatexie, où le paléosome est réduit à des enclaves surmicacées.

Figure 19.13 Le métamorphisme régional du massif de l'Arize (Ariège). Schéma de la carte de Saint-Girons au 1/50 000.

1 : isograde séricite +, chlorite +, muscovite + ; 2 : isograde biotite + ; 3 : isograde andalousite + ; 4 : isograde muscovite -, andalousite -, sillimanite + et feldspath potassique (microcline) +. Le figuré du Massif des Trois Seigneurs ne préjuge pas de sa nature géologique qui est complexe (terrains métasédimentaires et granites paléozoïques).



III. 2 - métamorphisme de contact

Le métamorphisme de contact, se localise au contact des roches magmatiques, il affecte les terrains traversés par l'intrusion magmatique ainsi que des enclaves. Lié au gradient géothermique et à la durée de l'élévation de température, il est appelé **métamorphisme thermique**, ou **thermométamorphisme**.

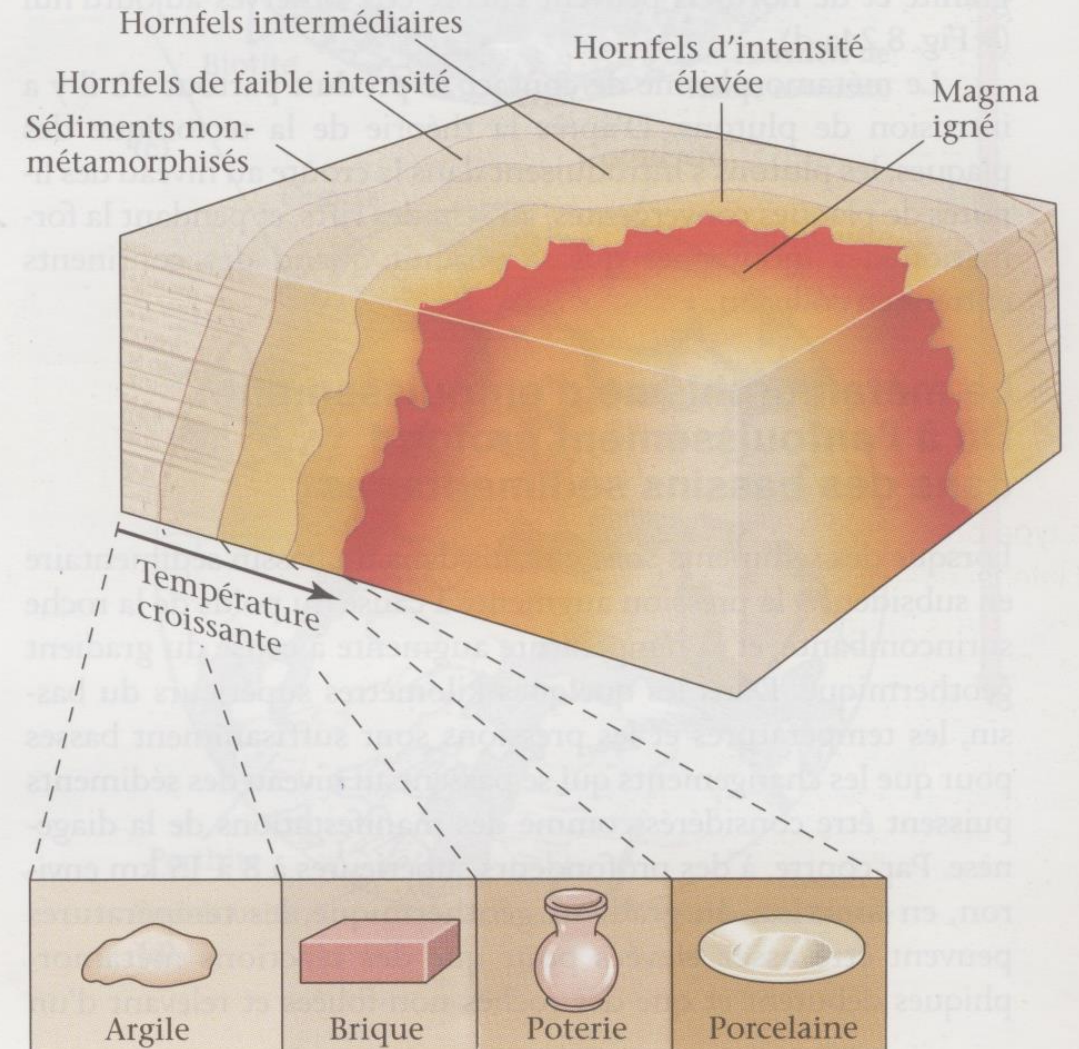
La zone métamorphisée dessine une **auréole de métamorphisme de contact** autour de l'intrusion (cornéennes, skarns, etc.)

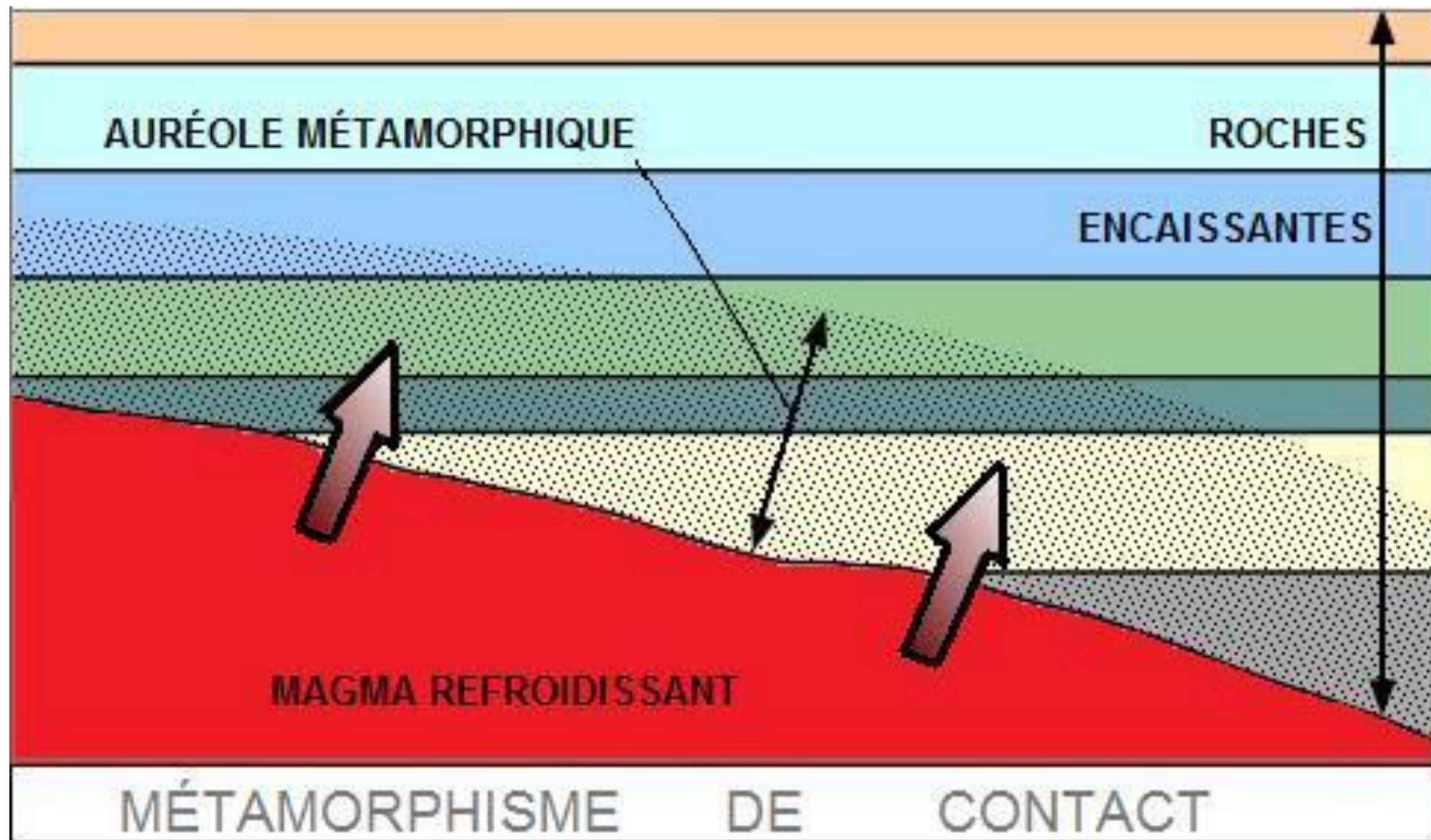
EXPLICATION

Métamorphisme thermique ou métamorphisme de contact : Échauffement dû à une intrusion magmatique

Imaginez du magma chaud qui remonte depuis les profondeurs de la Terre jusqu'à la surface terrestre et qui s'introduit dans la roche plus froide de l'encaissant à faible profondeur. La chaleur est transférée du magma vers la roche encaissante, étant donné que la chaleur est toujours transférée des matériaux plus chauds vers les matériaux plus froids. De ce fait, le magma refroidit et solidifie alors que la roche encaissante s'échauffe. De plus, des fluides hydrothermaux circulent à travers l'intrusion et la roche encaissante. À cause de la chaleur et des fluides hydrothermaux, la roche encaissante subit le métamorphisme. Les roches qui présentent le métamorphisme d'intensité la plus élevée se forment immédiatement à proximité du pluton, là où les températures sont les plus élevées. Quant aux roches qui présentent un métamorphisme d'intensité de plus en plus faible, on les trouve en s'éloignant progressivement du pluton. La ceinture distincte de roche métamorphique qui se forme autour d'une intrusion magmatique est appelée **auréole métamorphique** ou auréole de contact (► Fig. 8.23). La largeur de cette auréole dépend de la taille et de la forme de l'intrusion, mais aussi de l'ampleur de la circulation hydrothermique : de plus grandes intrusions créent de plus larges auréoles.

FIGURE 8.23 Au sein d'une auréole métamorphique bordant une intrusion magmatique, des roches qui ont subi un métamorphisme thermique de la plus haute intensité bordent directement l'intrusion. L'intensité décroît lorsque l'on s'éloigne du pluton. Cette gradation est similaire à celle qui existe depuis l'argile jusqu'à la porcelaine en passant par la poterie, qui est obtenue en cuisant l'argile dans un four.





Un exemple de métamorphisme de contact : l'auréole du granite de Flamanville (Manche, France)

Sur la côte ouest du Cotentin (*fig. 19.14*), le granite de Flamanville (granite à amphibole) est intrusif dans une série sédimentaire plissée constituée de schistes et de calcaires (Silurien et Dévonien). Au contact du granite, sur environ 150 à 200 m, les roches sédimentaires sont affectées de modifications texturales et minéralogiques (auréole de métamorphisme). La nature et l'importance de ces transformations dépendent de deux facteurs : la distance par rapport au granite et la nature de la roche sédimentaire originelle.

Ainsi à partir d'une couche schisteuse, en se rapprochant du granite, on observe la transition suivante :

- schistes à texture finement orientée (roche sédimentaire non transformée) ;
- schistes tachetés (les taches correspondant à des petits nodules d'un minéral nouveau : la cordiérite) ;
- schistes noduleux et micacés : la roche perd alors sa texture orientée régulière et il y a développement de micas et d'andalousite ;
- enfin, à proximité du contact, on passe à des roches dures, massives, à grains fins, isotropes (les minéraux de cordiérite et d'andalousite sont dispersés dans toute la masse, il n'y a pas d'orientation préférentielle). On les nomme *cornéennes* car leur aspect rappelle celui de la corne.

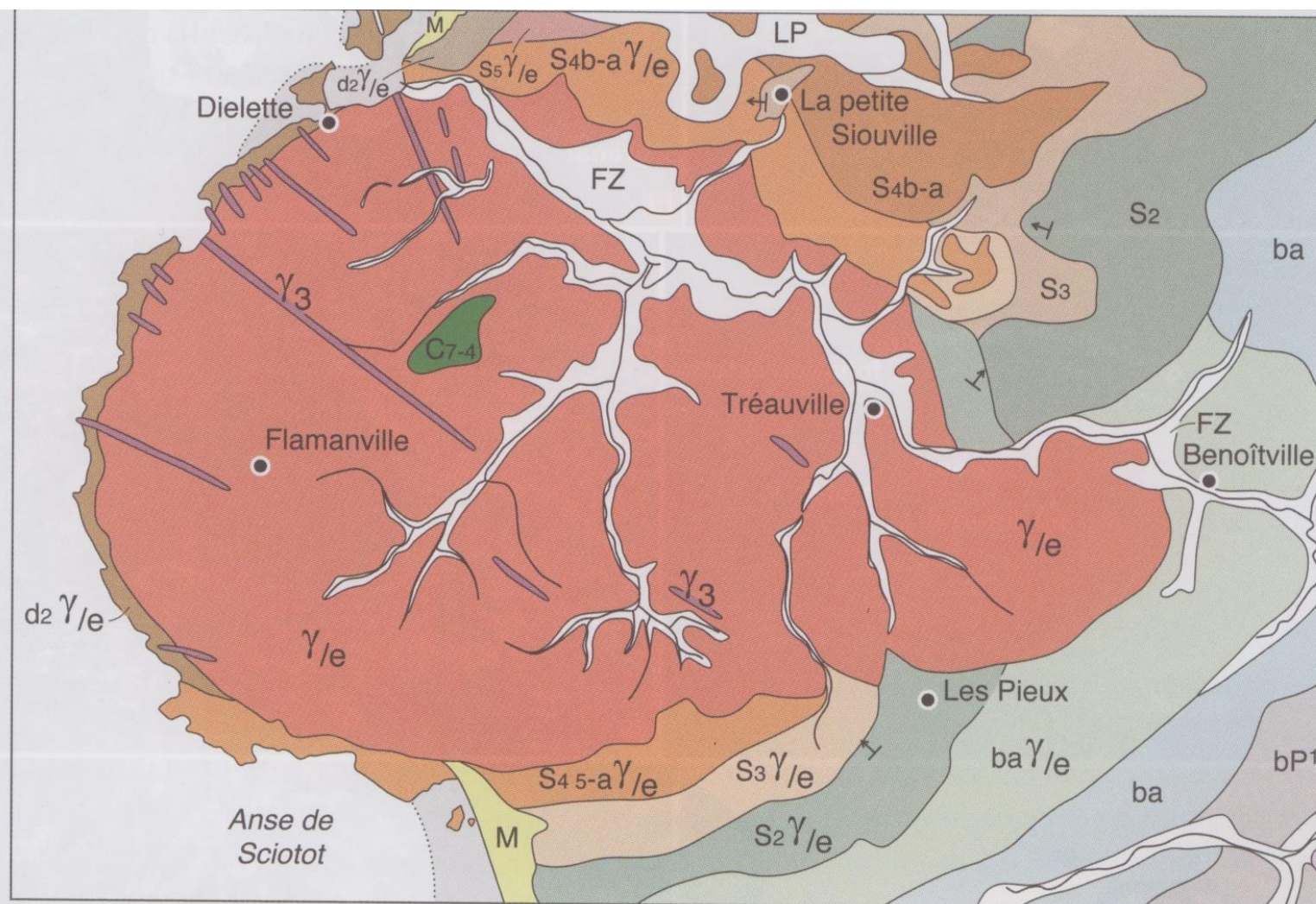
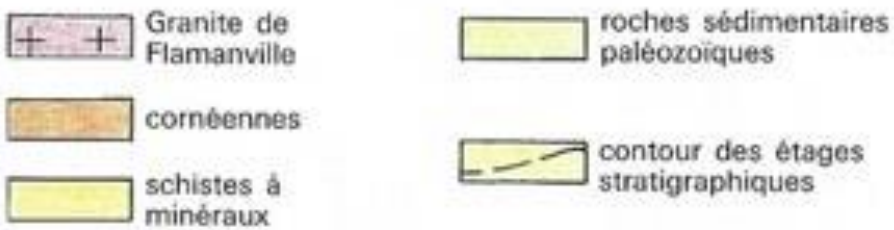
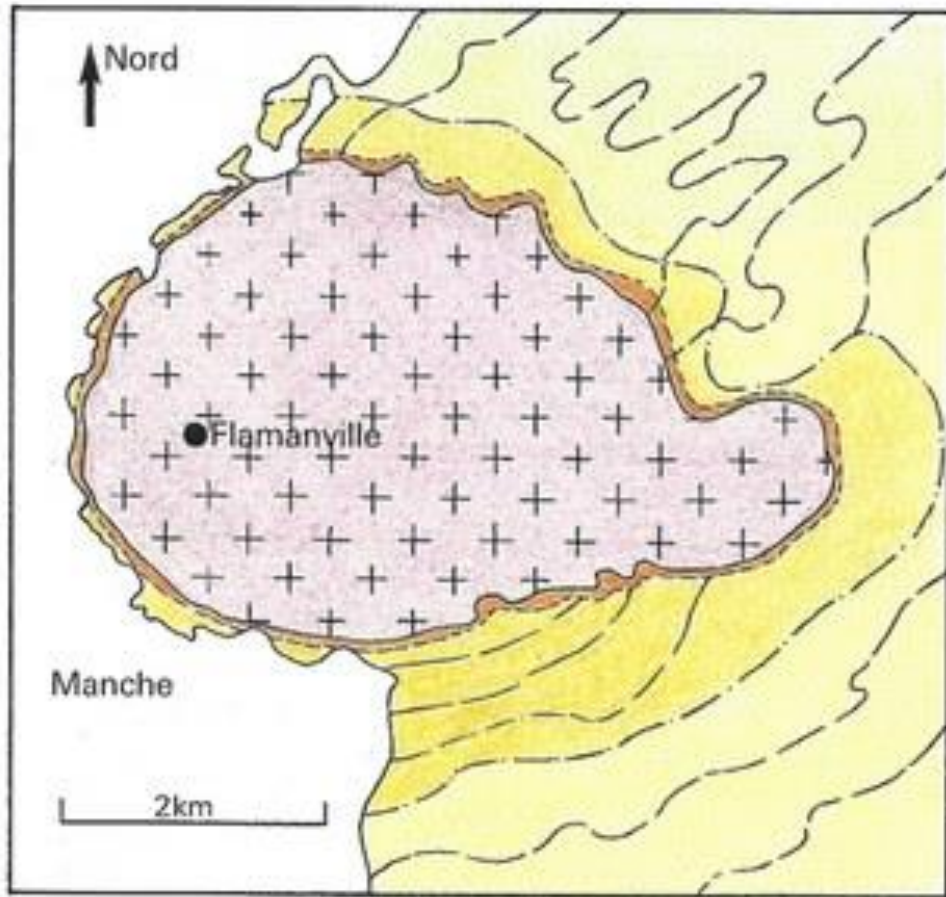


Figure 19.14 Le granite de Flamanville. Schéma de la carte de Cherbourg 1/50 000).

γ/e : granite de Flamanville ; ba : schistes et grès (Cambrien) ; S2 : grès armoricain (Ordovicien inférieur) ; S3 : schistes (Ordovicien moyen) ; S4 b-a : schistes et grès (Ordovicien supérieur) ; S5 : schistes et grès du Silurien ; d2 : calcaires et schistes du Dévonien. L'auréole de métamorphisme de contact est représentée par un figuré de tiretés horizontaux en surcharge et par l'association du sigle γ/e à celui du terrain (S2 γ/e = S2 métamorphisé). On notera, notamment au nord du massif, que l'étendue de l'auréole est beaucoup plus réduite dans les grès (S2) que dans les formations schisteuses.



Bordas -1994

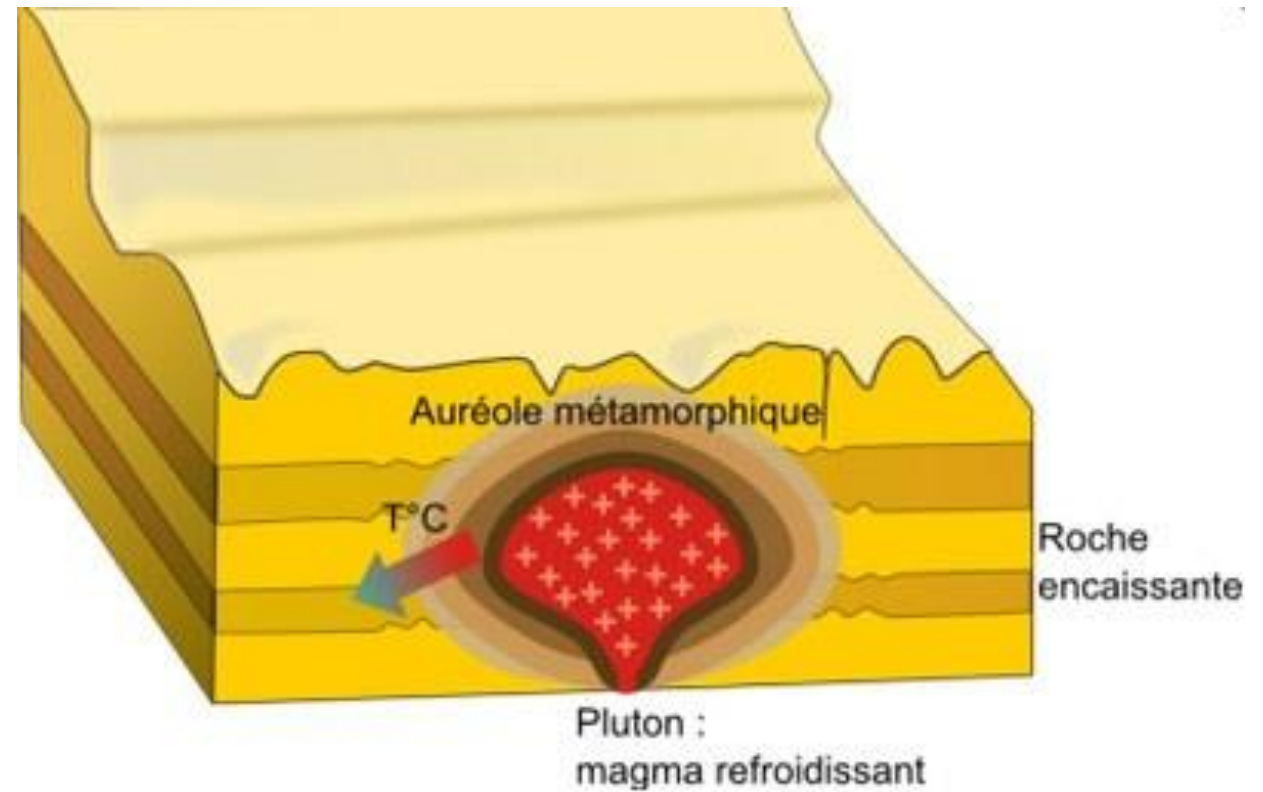
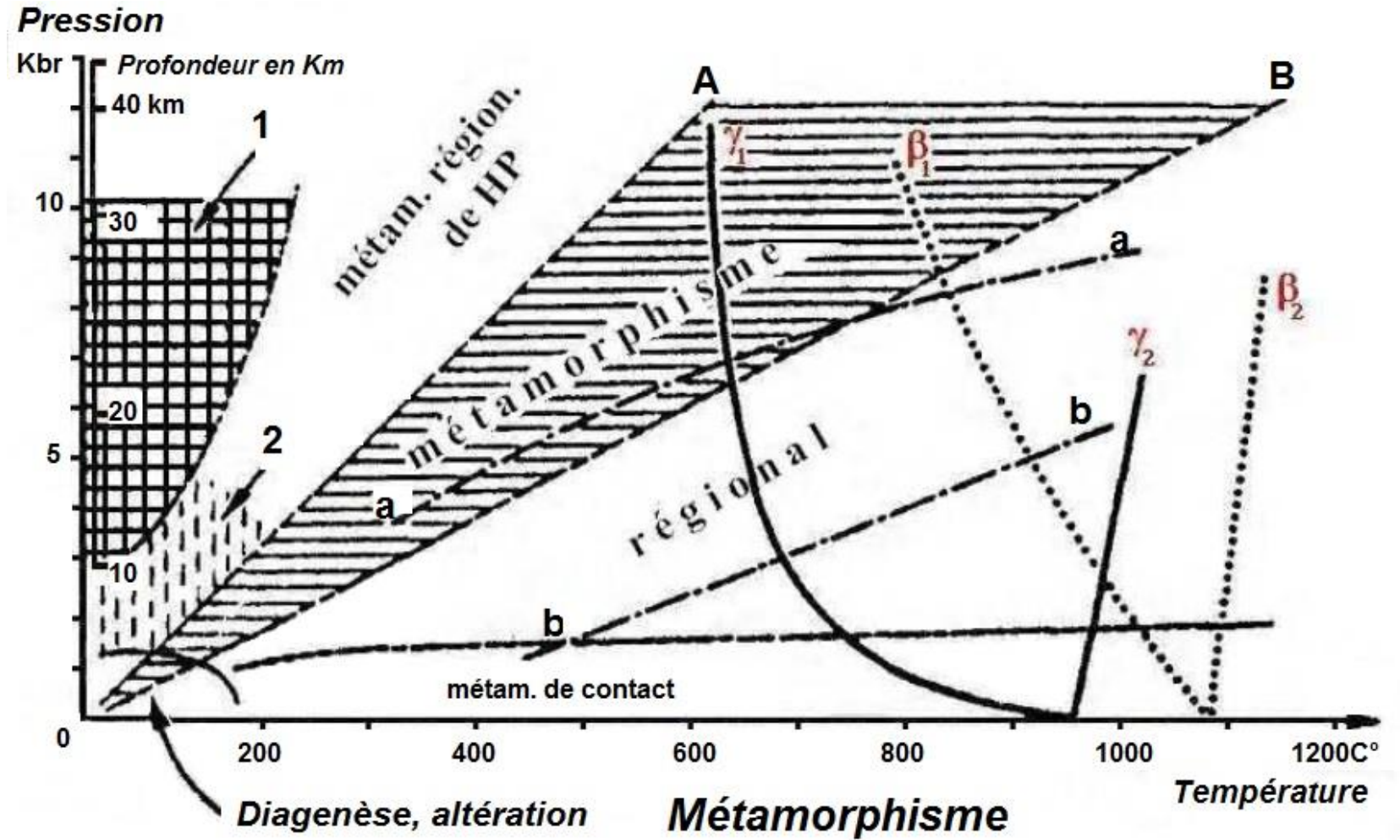


Fig.3 -métamorphisme de contact

Conclusion:
Types de métamorphismes



TYPES DE METAMORPHISMES - 1: conditions non réalisées dans la nature; 2 : métamorphisme dynamique. Dans le métamorphisme régional, la zone hachurée entre A et B correspond à un gradient géothermique normal; les courbes aa et bb limitent approximativement de haut en bas les zones de métamorphisme dites de haute pression (HP), de pression intermédiaire et de basse pression (BP).

γ_1 : début de la fusion (solidus), en allant vers la droite du diagramme, du granite en présence de vapeur d'eau saturante.

γ_2 : début de la fusion du granite en l'absence de vapeur d'eau. β_1 et β_2 Courbes équivalentes pour le basalte

La classification et la nomenclature des roches métamorphiques sont complexes car interviennent les caractéristiques des roches originelles et celles du métamorphisme.

Ce dernier présente différents **degrés**, définis par les conditions de T et P, et caractérisés par des **faciès minéraux**, avec apparition et disparition de certains minéraux.

Les principales distinctions ainsi faites sont les suivantes :

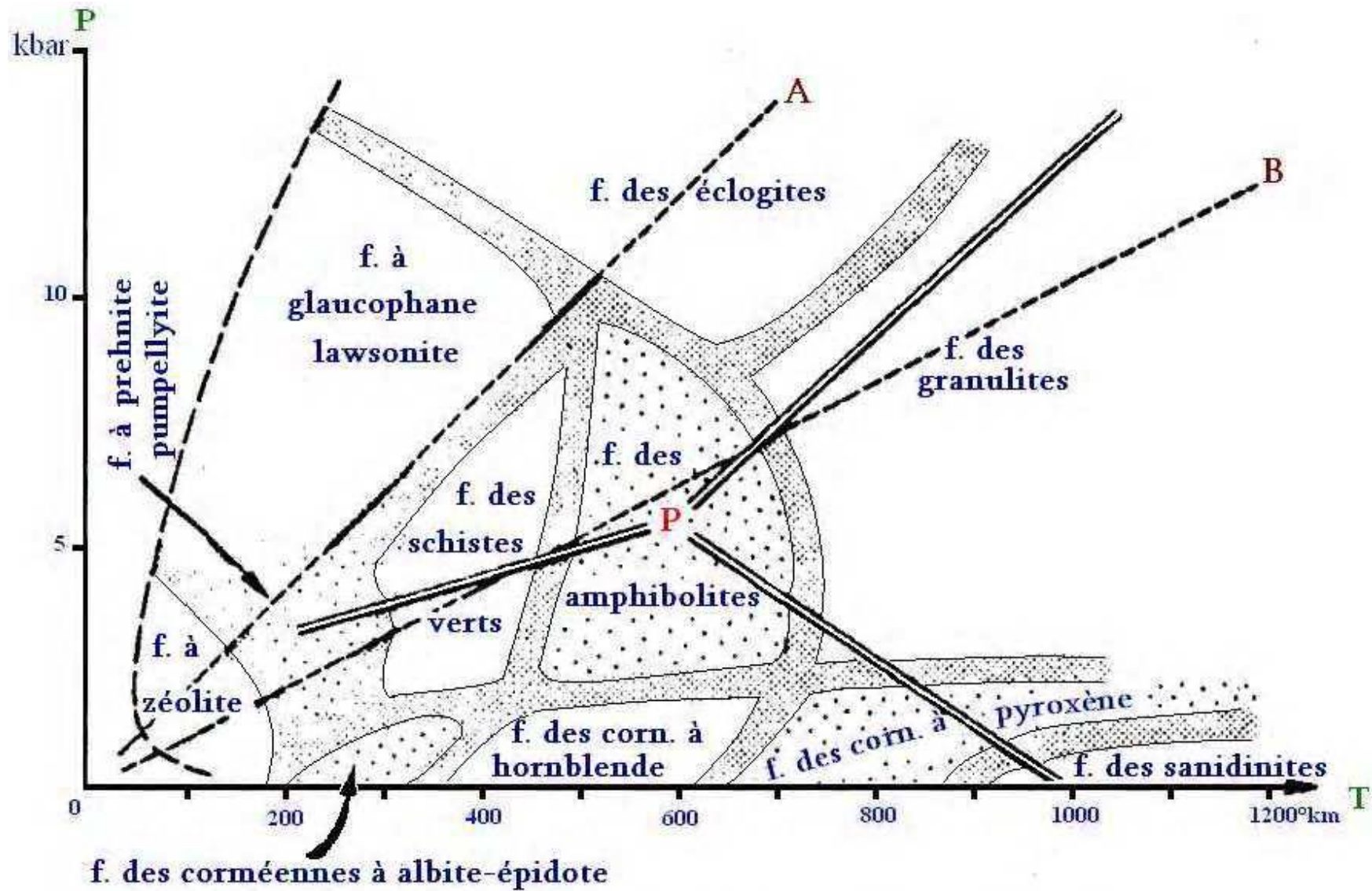
- 1. **Selon les faciès minéraux**
- 2. **Selon les zones et les isogrades du métamorphisme**
- 3. **Selon les séquences métamorphiques**

-1. Selon les faciès minéraux : un faciès minéral est défini par l'association de certains minéraux (la paragenèse) caractérisant le chimisme d'une roche et le degré de métamorphisme qu'elle a subi.

L'étude expérimentale a permis de délimiter plus ou moins bien les champs de T et P où un minéral est stable, et de déterminer, lorsque T et/ou P varient, les réactions chimiques, avec apparition de nouveaux minéraux.

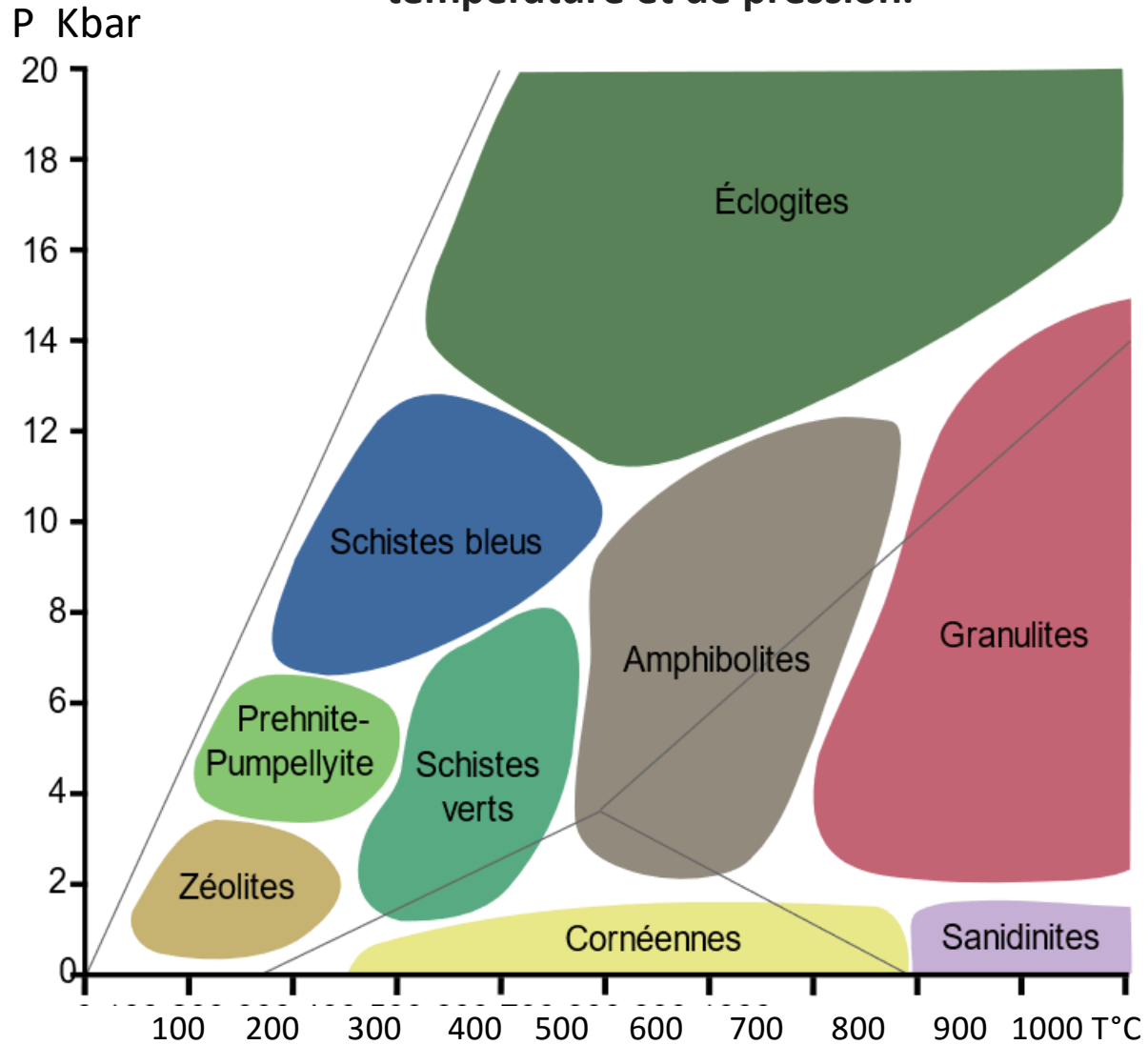
À la suite des travaux du finlandais P. Eskola, les principaux faciès minéraux, souvent divisés en sous-faciès, sur lesquels on s'accorde sont les suivants :

- 1.1. faciès à zéolites** : avec un sous-faciès à heulandite ou à analcime + quartz et un autre, de degré plus élevé, à laumontite + quartz ;
- 1.2. faciès à prehnite et à pumpellyite** : avec ces minéraux, du quartz et apparition possible de l'épidote;
- 1.3. faciès des schistes verts** à chlorite, muscovite, amphibole (trémolite, actinote), plagioclases acides ($An < 20$: albite, oligoclase) et à la limite supérieure apparition de biotite;
- 1.4. faciès des schistes à glaucophane – lawsonite** (schistes bleus) avec des sous-faciès à pumpellyite vers la limite inférieure, à jadéite et quartz à P plus élevée;
- 1.5. faciès des amphibolites** à hornblende verte, avec épidote et albite dans le sous-faciès inférieur, ou avec plagioclase plus basique ($An > 20$) dans le sous-faciès supérieur ; les micas sont stables et c'est la zone de P-T où se situe le point triple des silicates d'alumine (andalousite, sillimanite, disthène);
- 1.6. faciès des granulites** avec orthopyroxène, plagioclase basique et grenat (almandin - pyrope), et suivant les cas disthène ou sillimanite;
- 1.7. faciès des éclogites** avec omphacite et grenat (almandin - pyrope);
- 1.8. faciès des cornéennes** qui suivant la température contiennent albite et épidote, ou hornblende verte, ou pyroxène et grenat (grossulaire);
- 1.9. faciès des sanidinites** avec feldspaths sanidine et albite.



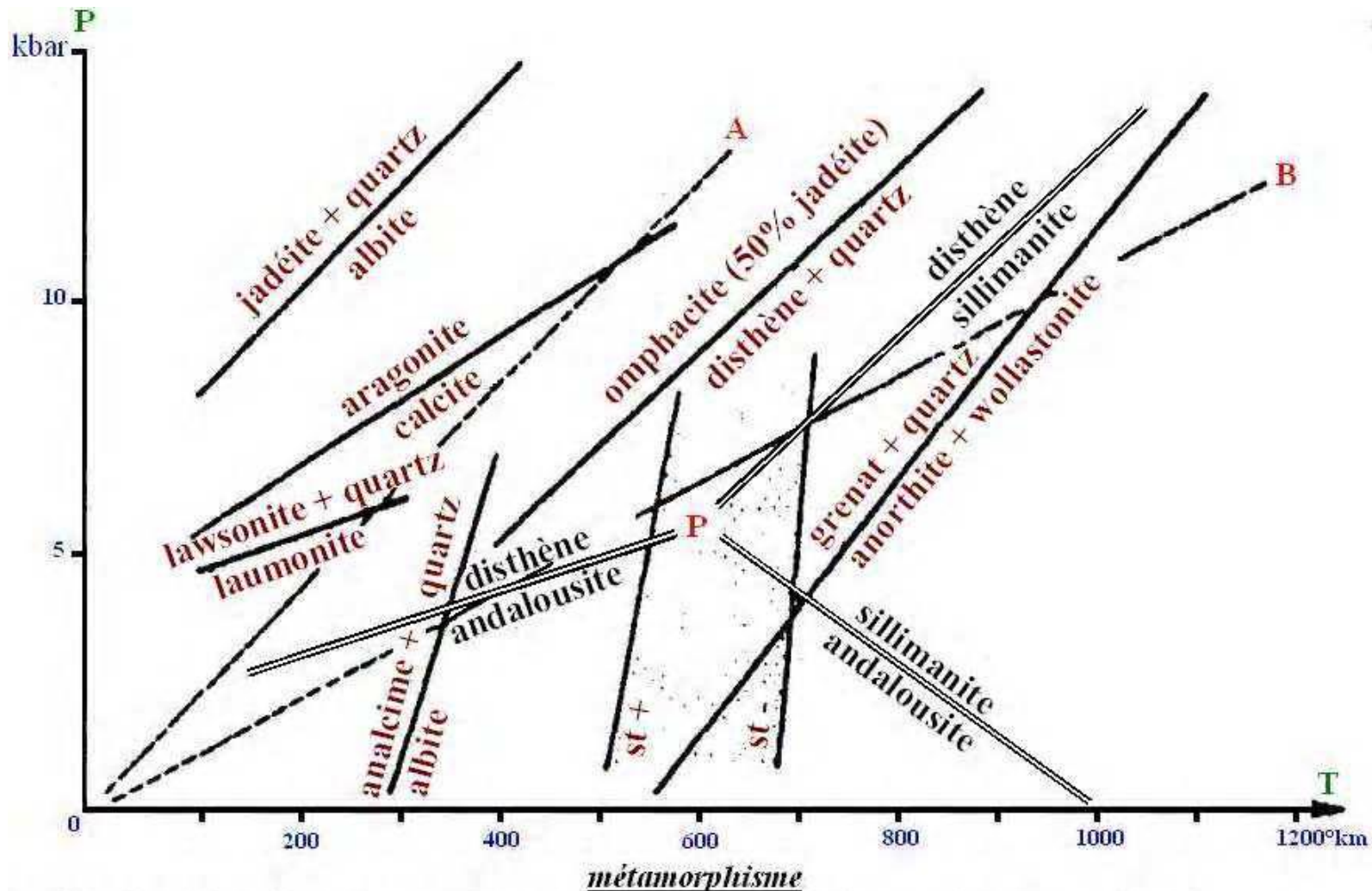
Champs des principaux faciès minéraux du métamorphisme

Diagramme des champs des différents faciès métamorphiques en fonction des conditions de température et de pression.



Notons que ces faciès minéraux ont été définis dans des séries métamorphiques (séquences) de roches magmatiques basiques (basaltes, gabbros,...) mais s'appliquent aux roches d'autres séquences.

Les termes utilisés définissent alors seulement un champ de P et T : ainsi une roche appartiendra au « faciès des amphibolites » si ses minéraux indiquent les P et T de ce faciès, alors même que, pour des raisons de chimisme, elle ne contient pas d'amphibole.



métamorphisme

Droites d'équilibre de réactions expérimentales entre quelques minéraux de métamorphisme.
 P. ex. : la transformation albite → jadéite + quartz se produit vers 200 °C lorsque P passe de 9 à 10 kbar.
 - Le point P est le point triple, situé très approximativement, des silicates d'alumine (andalousite, disthène, sillimanite) -st : staurotide, avec son champ de stabilité (en pointillés) imité par les courbes d'apparition st+ et de disparition st- lorsque T augmente.

-2. Selon les zones et les isogrades du métamorphisme : en liaison avec les faciès minéraux précédents, une zone correspond à un volume de terrain présentant un certain degré de métamorphisme ; sur une carte, les limites de ces zones sont des isogrades (courbes de même degré) que l'on nomme, en général, d'après un minéral. P. ex. l'isograde «chlorite» correspond à la disparition de la chlorite au passage dans une zone de plus fort degré, l'isograde, «biotite +» correspond à l'apparition de la biotite.

La reconnaissance et la représentation de ces zones est la **zonéographie**.

Classiquement dans le métamorphisme général, et en se référant à la séquence pélitique, on distingue :

-2.1. L'anchizone, formant la transition entre la diagenèse et le métamorphisme net, pour $T = 100^{\circ}$ à 200°C , et $P = 1$ kbar. Difficile à déceler (études aux RX), et marquée par l'évolution des minéraux des argiles : disparition de la kaolinite et des interstratifiés au profit de l'illite et/ou de la chlorite, puis recristallisation de l'illite qui passe à la muscovite; la plupart des ardoises sont anchimétamorphiques.

-2.2. L'épizone (métamorphisme faible) avec des roches riches en minéraux hydroxylés (mica blanc, talc, chlorite, épidote, actinote); c'est la zone des schistes sériciteux et chloriteux (cf. faciès des schistes verts); limite supérieure vers $T = 500^{\circ}\text{C}$ définie par l'isograde « biotite ».

-2.3. La mésozone (métamorphisme moyen) avec des roches à biotite et muscovite, épidote, amphibole, staurotide, certains grenats, disthène possible ; c'est la zone des micaschistes et des gneiss à deux micas (cf. faciès des amphibolites); limite supérieure vers 650°C, définie par l'isograde « sillimanite + feldspath potassique ».

-2.4. La catazone (métamorphisme fort) avec des roches à feldspath potassique, plagioclase basique, sillimanite, pyroxène, grenat, biotite encore stable ; c'est la zone des gneiss à sillimanite et biotite (cf. faciès des granulites et des éclogites) ; limite supérieure au-delà de 700°C avec le début de la fusion (anatexie).

-2.5. L'ultrazone (terme peu usité) avec leptynites à cordiérite et/ou grenat, la biotite ayant disparu.

Ces limites sont plus ou moins nettes, et les corrélations avec les faciès minéraux plus ou moins aisées, si bien que la zonéographie est complexe et que des flous importants subsistent.

Intensité du métamorphisme

faible

moyen

intense

zéolites

talc

trémolite-actinote

chlorite

serpentine

épidote

andalousite

disthène

staurotide

sillimanite

wollastonite

spessartine

almandin

pyrope

muscovite

biotite

corindon

-3. Selon les séquences métamorphiques :

une séquence est l'ensemble des roches métamorphiques, de degré variable, issu d'un même type de roche originelle caractérisé par une composition chimique moyenne.

3.1- La séquence pélitique :

issue du métamorphisme d'argiles et/ou de pélites, il est à l'origine d'une séquence dite pelitique.

Au cours d'un métamorphisme croissant, cette séquence peut donner :

schistes ---> **micaschistes** ---> **gneiss** ---> **leptynites**.

Elle est aussi à l'origine de nombreuses autres roches comme les **pyroxénites** ou encore les **amphibolites** ...

3. 2- La séquence carbonatée :

la transformation métamorphique de certains **calcaires** va pouvoir donner, entre autres, du **marbre** et du **cipolin**.

3.3- La séquence basique : transformation des **basaltes** et **gabbros** en **amphibolites** et **pyroxénites**.

3.4- La séquence granitique : le métamorphisme du **granite** donne entre autres des **orthogneiss** et de la **protogine**.

Il existe de nombreuses autres séquences et sous-séquences métamorphiques.

- **Le métamorphisme hydrothermique (al)** : il est lié à des circulations de fluides (eau surtout) à température élevée, en relation avec des volcans ou des massifs plutoniques, et qui, d'une part réchauffent les roches traversées, et d'autre part leur apportent des éléments chimiques particuliers.

- **Le métamorphisme d'impact** : il est exceptionnel et dû à la chute de grosses météorites (impactites).