

ⵜⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⵏ ⵓⵎⵓⵔ
ⵜⴰⴳⴷⴰⵢⵜ ⵏ ⵉⵔⵉⵎⵉⵏ
ⵏ ⵉⵔⵉⵎⵉⵏ ⵏ ⵓⵎⵓⵔ ⵏ ⵓⵎⵓⵔ



المملكة المغربية
وزارة التربية الوطنية
والتعليم الأولي والرياضة

المركز الجهوي لمهن التربية والتكوين لجهة الدار البيضاء مكناس

Centre Régional des Métiers de l'Education et de la Formation de la Région Casablanca-Settat

Le Métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques

Réalisé par:

Mme.Nouzha CHAHBOUNE

Année scolaire: 2025/2026

Intitulé du module	Cycle	Filière	Spécialité
Complément de formation-Phénomènes géologiques internes.	Qualification des cadres d'enseignement.	Qualification des enseignants du secondaire collégial. Qualification des enseignants du secondaire qualifiant.	Sciences de la Vie et de la Terre.

Le Métamorphisme et la granitisation.

- Définition du métamorphisme.
- Les facteurs du métamorphisme (pression, température, temps, composition chimique).
- Les différents types de métamorphisme (régional, contact, hydrothermal, impact).
- Les transformations minéralogiques.
- Les déformations métamorphiques à l'échelle de l'échantillon, du minéral.
- L'intensité du métamorphisme (isogrades, faciès métamorphiques, gradients métamorphiques, minéraux index).
- Les trajets Pression-température-temps.
- Classification et nomenclature des roches métamorphiques (en fonction du faciès pétrographiques, faciès métamorphiques, séquences métamorphiques).
- Rétrométamorphisme.
- Origine des magmas granitiques (origine crustale ou anatexie, mantellique, mixte mantellique et crustale).
- Gisements des granites (granites orogéniques et anorogéniques).
- Relation entre le métamorphisme et la tectonique des plaques.



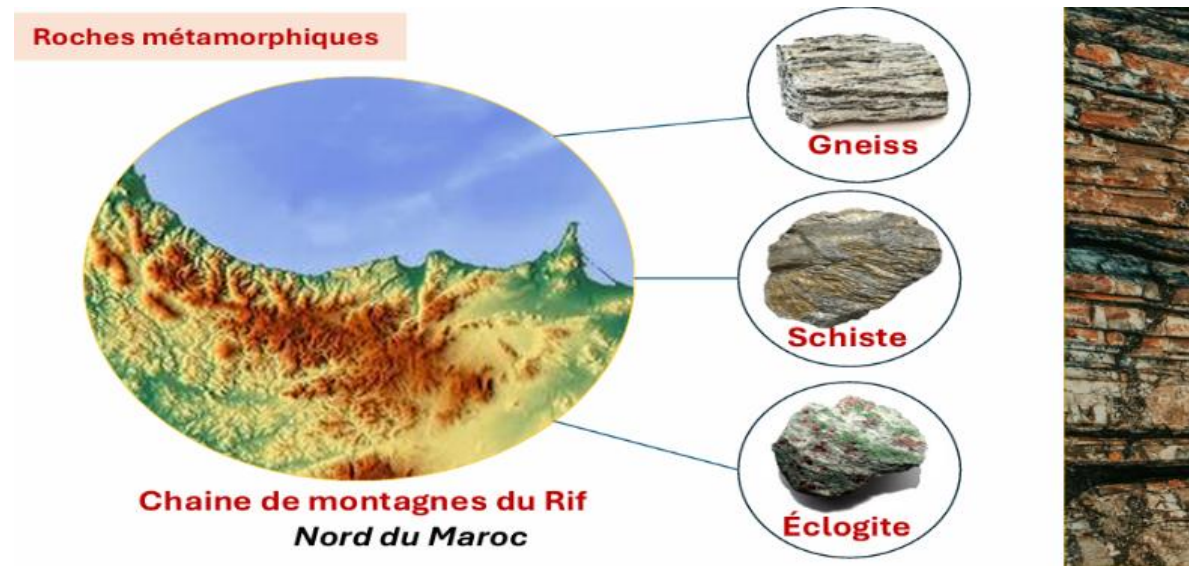
Le Métamorphisme

- Introduction
- Les roches métamorphiques des zones de subduction et de collision
- Les facteurs responsables du métamorphisme
 - Pression
 - Température
 - Temps
 - Composition chimique



Situation de départ

- Lors d'une sortie géologique dans une zone montagneuse dans le Rif marocain, des géologues découvrent des affleurements de roches très particulières : des gneiss, des schistes verts et même des éclogites. Intrigués, ils remarquent que ces roches ne ressemblent en rien aux roches sédimentaires ou magmatiques. Certaines de ces roches contiennent des minéraux témoins de très hautes pressions. D'autres montrent des structures en feuillets très marquées (foliation). Des températures et pressions incompatibles avec les conditions de surface sont supposées. Ces roches sont dites: roches métamorphiques et elles sont le résultats du phénomène du métamorphisme.

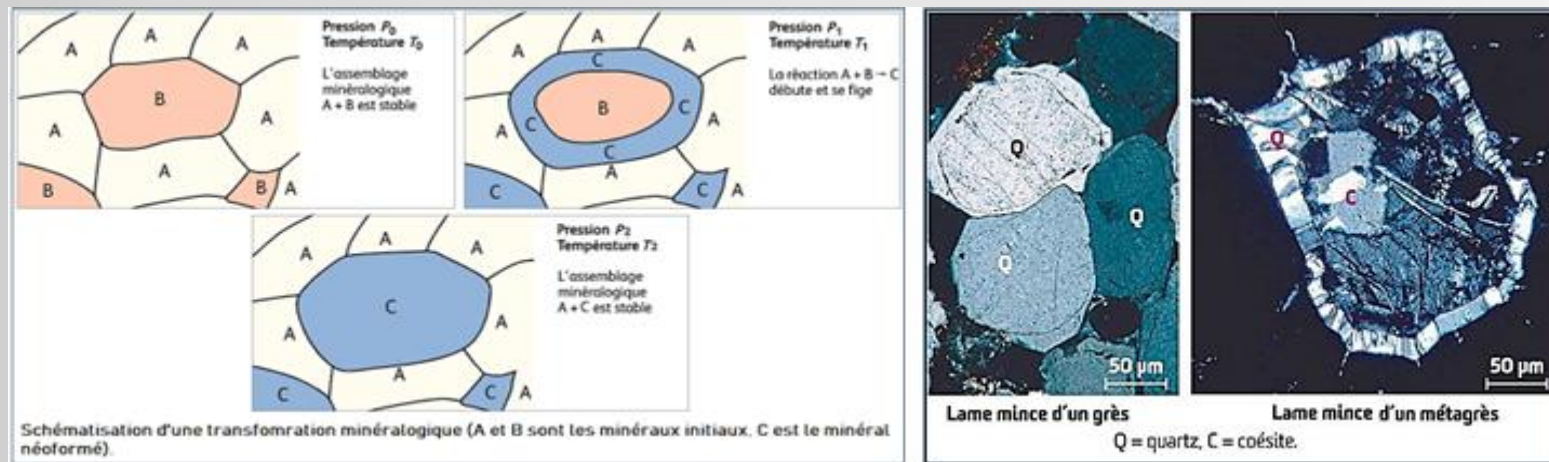


- Quelles sont les caractéristiques des roches métamorphiques marquant les zones de subduction et de collision?
- • Quelles sont les conditions du métamorphisme et sa relation avec la tectonique des plaques?
- • Quelle est la relation entre le métamorphisme et la granitisation?



Activité 1

Les roches métamorphiques des zones de subduction et de collision



Le métagrès est une roche métamorphique issue de la transformation d'un grès. La coésite et le quartz ont des compositions chimiques identiques (SiO_2), mais leurs structures minéralogiques (cristallines) sont différentes.

Les transformations minéralogiques liées au métamorphisme sont très lentes, parfois complètes ou incomplètes.



- Le métagrès se forme par transformation à l'état solide du grès (sans changement de l'état physique de la roche)
- • La roche issue du métamorphisme a la même composition chimique que la roche initiale, mais pas la même structure.
- • Le changement des conditions de pression et de température provoque la transformation minéralogique.

Le métamorphisme :

Ensemble des changements intervenant à l'état solide dans la composition minérale d'une roche soumise à des conditions différentes de celles où elle s'est formée. (la pression et la température)

Restriction : transformation dans les conditions de surface ou proche de celles régnant en surface (= diagenèse ou altération).

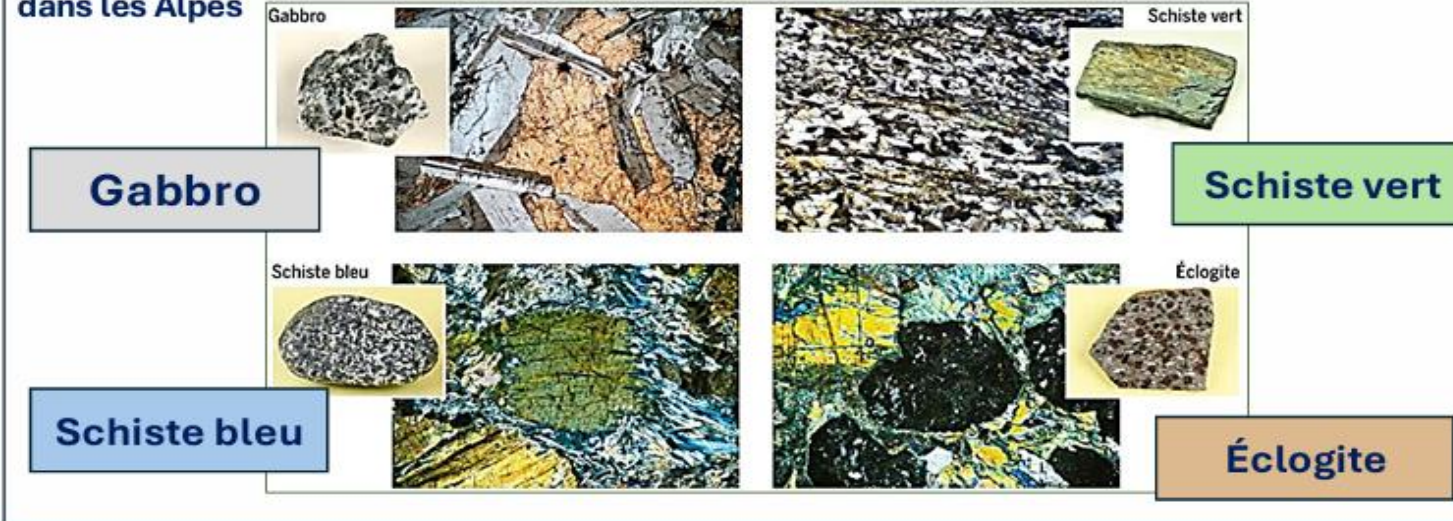


Les caractéristiques minéralogiques et structurales des roches métamorphiques

1 Dans les zones de subduction:

Dans les Alpes (chaîne de collision), il est possible d'observer différentes roches que l'on regroupe sous l'appellation de « métagabbros ».

Figure A : Les roches et les lames minces de gabbro et des différents métagabbros récoltés dans les Alpes



Composition minéralogique		Cpx : Pyroxène PL : Plagioclase		Cpx : Pyroxène Glc : Glaucophane		Cpx / Glc Gt : Grenat Ep : Epidote	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	
47.1%	14.2%	11%	12.7%	9.9%	2.2%	0.4%	



- On observe que les roches métamorphiques caractéristiques des zones de subduction (schiste bleu, éclogite) ont des structures et compositions minéralogiques différentes. Ce qui indique que ces roches ont subi des degrés différents de pression et température.
- Schiste bleu : Constitué de glaucophane et pyroxène, il présente une structure schisteuse Eclogite : Roche métamorphisée dans des conditions extrêmes, contient du grenat et jadéite, sans structure particulière.

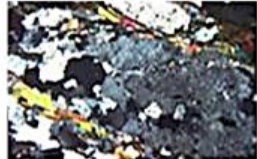
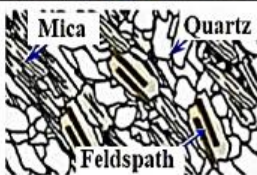
Ces roches ont une composition très proche de celle du gabbro et du basalte. Donc **les roches métamorphiques des zones de subduction dérivent de la transformation des roches magmatiques (gabbro et basalte) de la croûte océanique = complexe ophiolitique**. Elles ont subi une transformation dans leur composition minéralogique et leur structure, sans modification de leur composition chimique.



Les caractéristiques minéralogiques et structurales des roches métamorphiques

2 Dans les zones de collision:

- Dans les Pyrénées (chaîne de collision) affleure un ensemble de roches métamorphiques dont l'étude a montré qu'elles dérivent toutes de roches sédimentaires continentales préexistantes. Ces roches possèdent toutes une même composition chimique globale qui est la même que celle de roches sédimentaires argileuses appelées pélites.

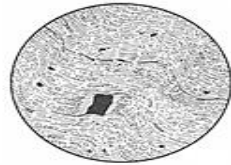
	Schiste vert	Micaschiste	Gneiss
Observation à l'œil nu			
Observation d'une lame mince			
Schéma de la lame mince			



1) Décrivez la structure de ces roches métamorphiques.



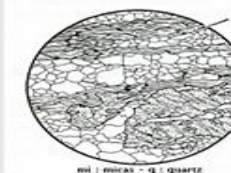
Schiste



Schiste: L'observation au microscope montre un alignement de petites paillettes de chlorite (minéraux voisins des micas) qui détermine une *schistosité*. La lame mince d'un schiste, montrant des *lits très minces* de chlorite; la *schistosité* marquée par l'orientation des minéraux.



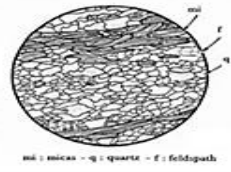
Micaschiste



Micaschistes: se présentent comme des roches brillantes, en raison de l'abondance de micas visibles à l'œil nu. Alternance entre lits riches en micas et lits quartzeux. Les micas sont des biotites et des muscovites. Cette texture en feuillets de minéralogie différente définit la *foliation*. Dans la lame mince d'un Micaschiste, la schistosité et la foliation sont très marquées.



Gneiss



Gneiss: sont des roches de texture *foliée*, la foliation de la roche est dû à une alternance de lits clairs et de lits sombres. Les lits clairs sont constitués de quartz et de feldspaths. Les lits sombres contiennent de la biotite et de la muscovite. Sur lame mince, ma texture foliée se traduit par une alternance de niveaux des micas et de niveaux quartz et feldspaths.

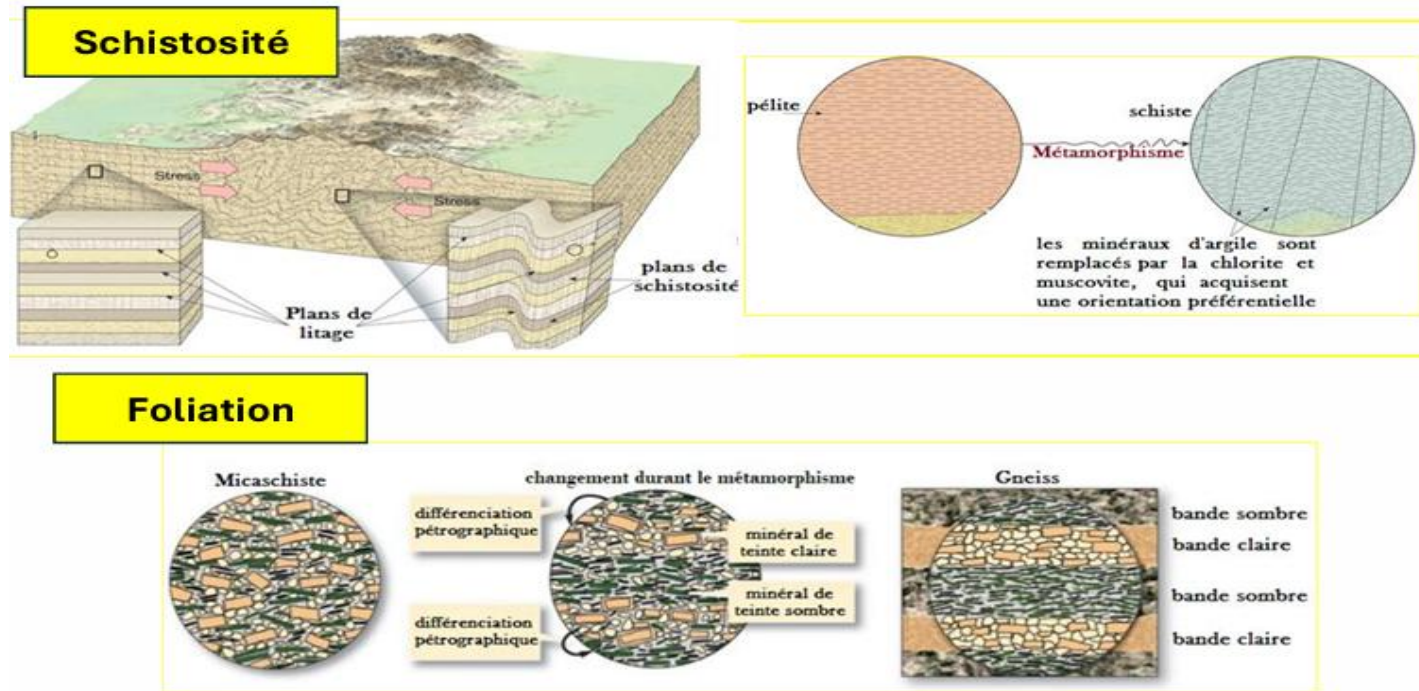


	Silice (SiO ₂)	Alumine (Al ₂ O ₃)	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	H ₂ O
Argile	58,2%	20,9%	2,8%	0,85%	0,55%	2,45%	4,1%	7%
Schiste	60,2%	20,9%	2,8%	0,85%	0,55%	2,45%	4,1%	4,5%
Micaschiste	60,9%	19,1%	1,2%	1,4%	1,7%	2,1%	3,7%	3,05%
Gneiss	68,7%	16,2%	0,7%	1,3%	1,8%	3,8%	3%	1,4%

Déduction : Puisque les roches métamorphiques des zones de collision (schiste, micaschiste et gneiss) ont la même composition chimique que celle des roches sédimentaires argileuses, on peut conclure que ces roches métamorphiques dérivent l'une de l'autre et tous de la même roche mère : l'argile. La différence structurale et minéralogique entre elles revient au degrés de transformation (métamorphisme) qu'à subit chacune d'elles.



Structure des roches métamorphiques



Schistosité : orientation préférentielle des minéraux, acquis sous l'influence des contraintes tectoniques. Cette structure rend la roche susceptible de se débiter (se cliver) en feuillets.

Foliation : une différenciation pétrographique des minéraux induisant leur alternance de bandes claires et sombres.



- Bilan de l'activité

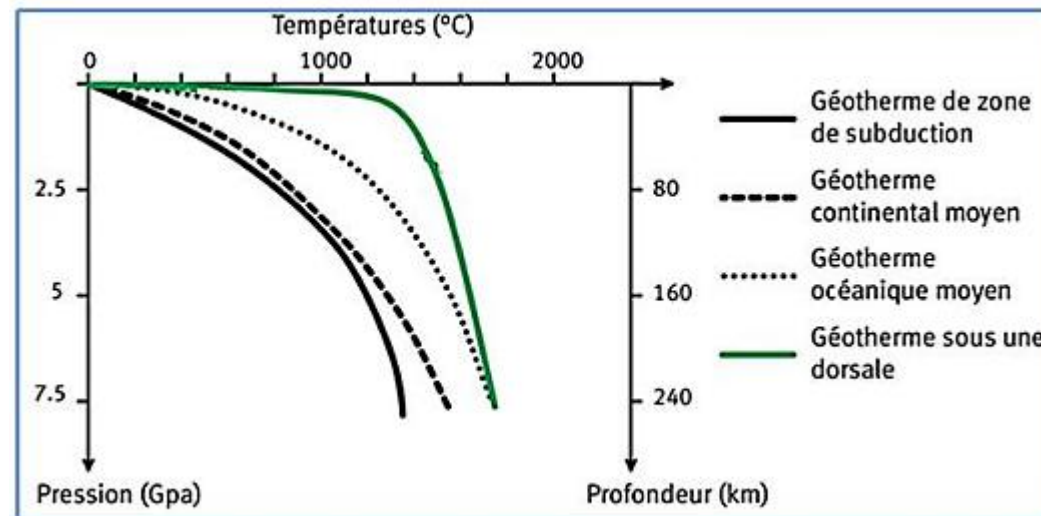
- • Les roches métamorphiques des zones de subduction dérivent de la transformation des roches magmatiques (gabbro et basalte) de la croûte océanique.
- • Les roches métamorphiques des zones de collision dérivent de la transformation des roches sédimentaires (l'argile) de la croûte continentale.
- • Le métamorphisme réside dans une transformation minéralogique et structurale sans transformation de la composition chimique.



Activité 2

Les facteurs responsables du métamorphisme

- Pendant l'enfouissement et l'empilement, les roches sont soumises à :
- •L'augmentation progressive de la pression P avec la profondeur.
- •L'augmentation de la température T selon le gradient géothermique.
- Comment la pression et la température influent-elles les roches
- métamorphiques ?

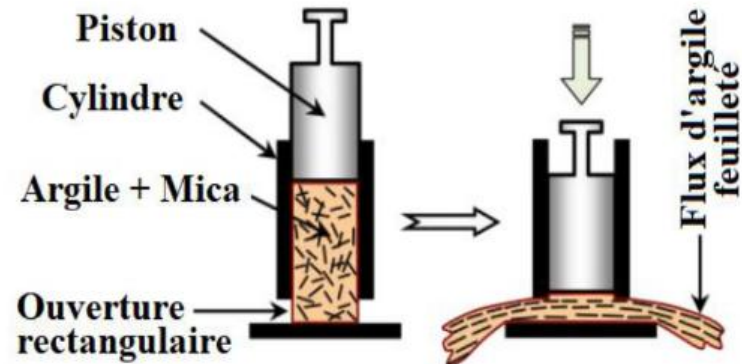


1) L'effet de la pression: expérience de daubrée

Document 6 : Mise en évidence de l'action de pression

Dans un cylindre à piston et avec des ouvertures rectangulaires à sa base, un mélange d'argile et de cristaux laminaires de mica est soumis à une haute pression appliquée avec le piston. Le schéma ci-contre résume les étapes de cette expérience et ses résultats.

Décrivez les résultats de cette expérience et établissez la relation entre ces résultats et les structures (schistosité, foliation) caractérisant les roches métamorphiques ?



Sous l'action de la pression élevée, les paillettes de mica s'orientent dans la même direction, perpendiculairement à la direction de la pression, une schistosité apparaît, ainsi l'argile se transforme en schiste. **Alors, la schistosité caractéristique des roches métamorphiques est due à une pression élevée qui a affecté ces roches.**



2) L'effet de la température :

La chaleur est un agent important du métamorphisme, elle augmente le taux des réactions chimiques susceptibles de produire des minéraux différents de ceux de la roche initiale. La chaleur peut provenir de la lave, du magma ou de son augmentation naturelle avec la profondeur.

La fabrication des briques et des produits de poterie exige une température supérieure à 200°C, afin de transformer la pâte argileuse. L'argile cuite, ainsi transformée, ne reprend jamais sa plasticité si on ajoute de l'eau.



Argile

- Chlorite
- Séricite
- Muscovite

500°C

Pression constante

- Plagioclases
- Biotite
- Andalousite

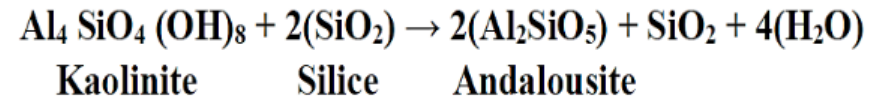


Expérience de Winkler et ses collaborateurs

Document 7 : Effet de la température sur les roches

Winkler et ses collaborateurs ont fait subir à une roche argileuse une pression constante (2Kbar) avec une augmentation progressive de la température et ont noté les changements suivants :

→ A la température de 570°C, il y'a apparition de nouveaux minéraux, tels que l'Andalousite selon la réaction suivante :



→ A la température de 700°C, la fusion partielle commence, le milieu est constitué de 2 états : un solide contenant la Biotite et la Sillimanite et l'autre liquide issu de la fusion. Il y'a disparition de l'Andalousite au profit de la Sillimanite.

En exploitant les données de ce document, expliquez l'effet de la température sur les roches.

Sous l'action de la température élevée, les minéraux se déshydratent (perdent l'eau contenu dans leur composition chimique) ainsi ils se transforment, à l'état solide (sans fusion), en d'autres minéraux nouvellement formés. **La température est donc un facteur qui modifie la composition minéralogique des roches d'origine.**



3) Action simultanée de la pression et la température: expérience de richardson

Document 8 : Notion de domaine de stabilité et minéral index (indicateur)

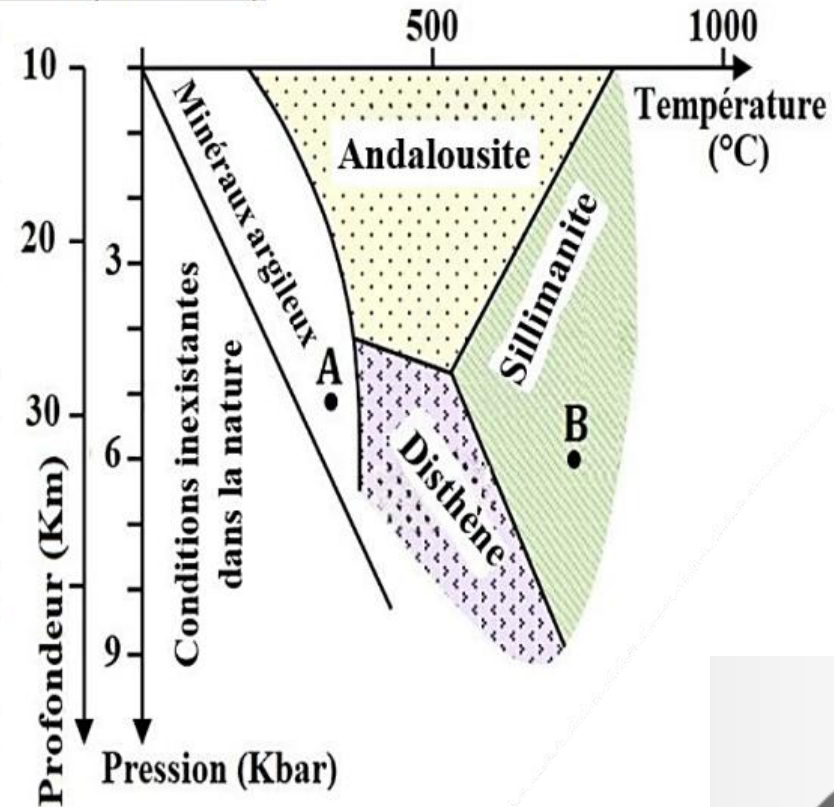
Richardson et des collaborateurs ont exposé un mélange de silicates d'aluminium à des températures et des pressions élevées et variables. Ils ont ainsi pu déterminer les domaines de stabilité de 3 minéraux : la Sillimanite, l'Andalousite et le Disthène.

Les lignes droites sur le diagramme représentent les limites du champ de stabilité de chaque minéral.

1)- Déterminez les transformations minéralogiques qui se produisent lorsqu'une roche passe des conditions A aux conditions B ?

2)- En exploitant le diagramme pression-température, identifiez les domaines de stabilité de chaque minéral des silicates d'alumine et déduisez pour chacun les conditions qu'il indique ?

3)- Définissez le domaine de stabilité d'un minéral, minéral indicateur (index) et déterminez l'importance des minéraux indicateurs ?



1)- Il ressort de ces données expérimentales que **chaque minéral possède des conditions spécifiques de température et de pression dans lesquelles il reste stable**. Lorsque ces conditions changent, le minéral se transforme en un autre.

Lorsqu’une roche contenant des minéraux argileux passe des conditions A aux conditions B, le minéral Disthène apparaît d’abord, et avec l’augmentation de la température, le Disthène disparaît et la Sillimanite se forme.

2)- Domaine de stabilité de chaque minéral et les conditions qu’il indique :

Minéraux (silicates d'alumine)	Champ (domaine) de stabilité		Conclusion
	Température (°C)	Pression (Kbar)	
Andalousite	$200^{\circ}\text{C} \leq T \leq 750^{\circ}\text{C}$	$P \leq 5 \text{ Kbar}$	Minéral indicateur d’une basse pression
Disthène	$350^{\circ}\text{C} \leq T \leq 700^{\circ}\text{C}$	$P \geq 4,5 \text{ Kbar}$	Minéral indicateur d’une haute pression
Sillimanite	$T \geq 500^{\circ}\text{C}$	Indéterminée	Minéral indicateur d’une haute température

Le domaine de stabilité d’un minéral : l’ensemble des conditions de pression et de température dans lesquelles apparait un minéral et reste stable (se maintient).

- Un minéral indicateur (index) : est un minéral qui a un domaine de stabilité bien déterminé, il apparait dans des conditions précises de pression et de température, constituant **une mémoire des conditions de métamorphisme**.

La présence d’un minéral index dans une roche métamorphique permet donc de reconstituer les conditions de pression et de température subies par la roche qui le renferme.



Variation des conditions de métamorphisme dans la nature

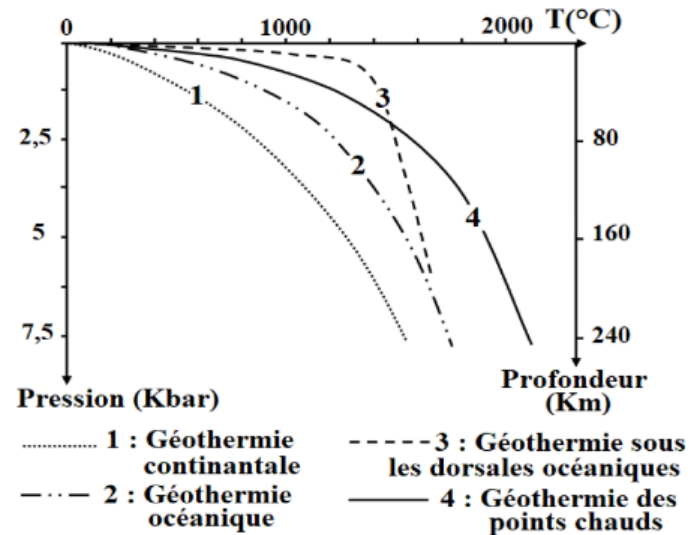
- La pression et la température sont les facteurs essentiels qui contrôlent le type et le degré de métamorphisme dans la nature, ces deux facteurs varient simultanément dans la nature selon :
- **La profondeur** : la température et la pression augmentent en fonction de la profondeur ; les roches vont subir donc des degrés croissants de métamorphisme en s'enfonçant en profondeur ;
- **Le cadre géodynamique de la lithosphère** : une roche située dans une zone de subduction va subir des conditions de métamorphisme propres différentes des conditions d'une autre roche soumise à une collision.

Document 9 : Variation de pression et de température dans la nature

Les roches de la lithosphère sont en réalité soumises en profondeur à une pression qui est la somme de trois types de pression :

- Pression des couches sus-jacentes ;
- Pression tectonique qui résulte de la dynamique des plaques ;
- Pression des fluides interstitiels (H_2O , CO_2).

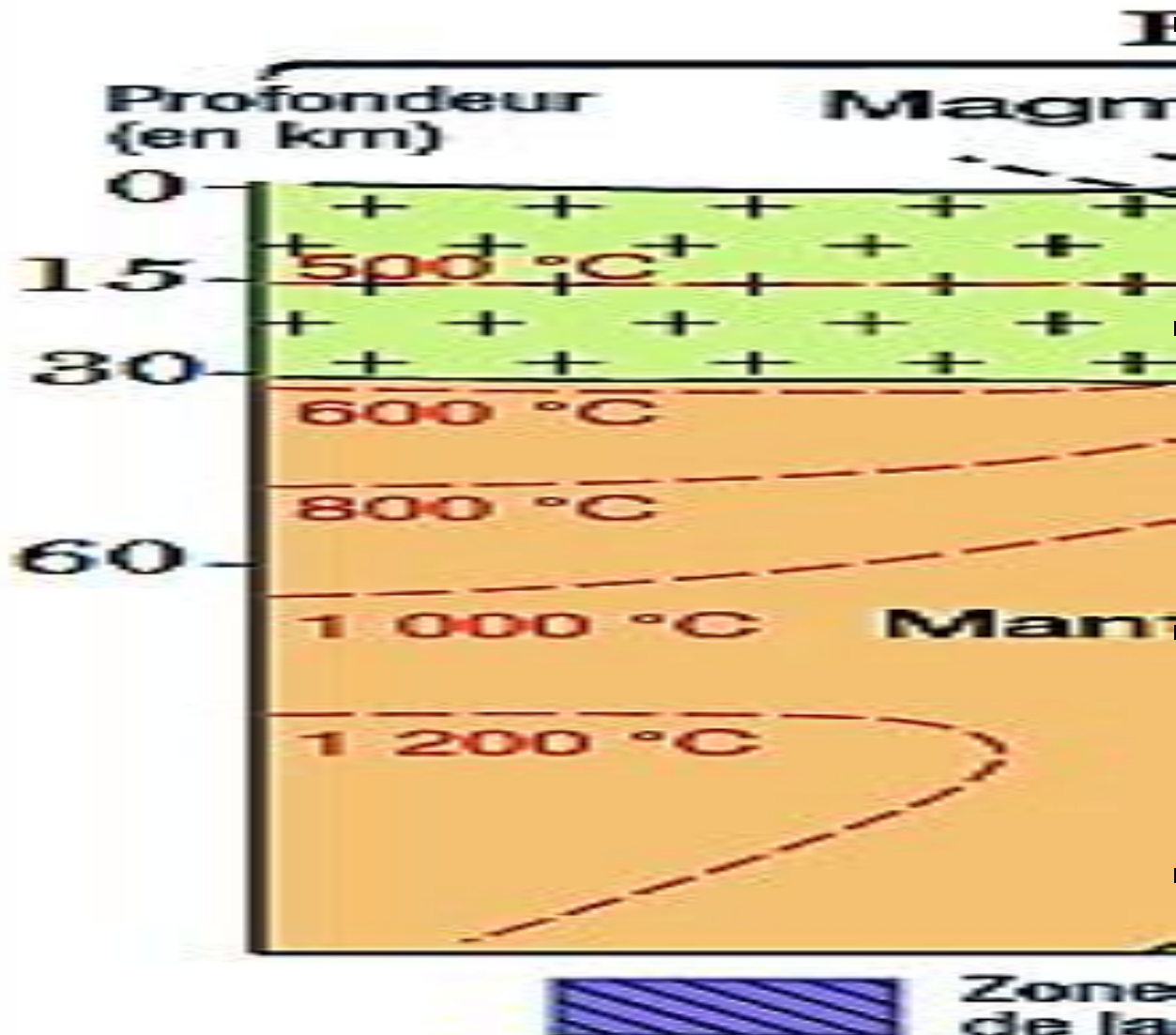
La température augmente avec la profondeur à l'intérieur de la Terre, cette augmentation est appelée le gradient géothermique. Celui-ci varie en fonction de la composition interne et de la nature géologique de la région : il est faible dans les zones géologiquement stables et élevé dans les zones géologiquement actives.





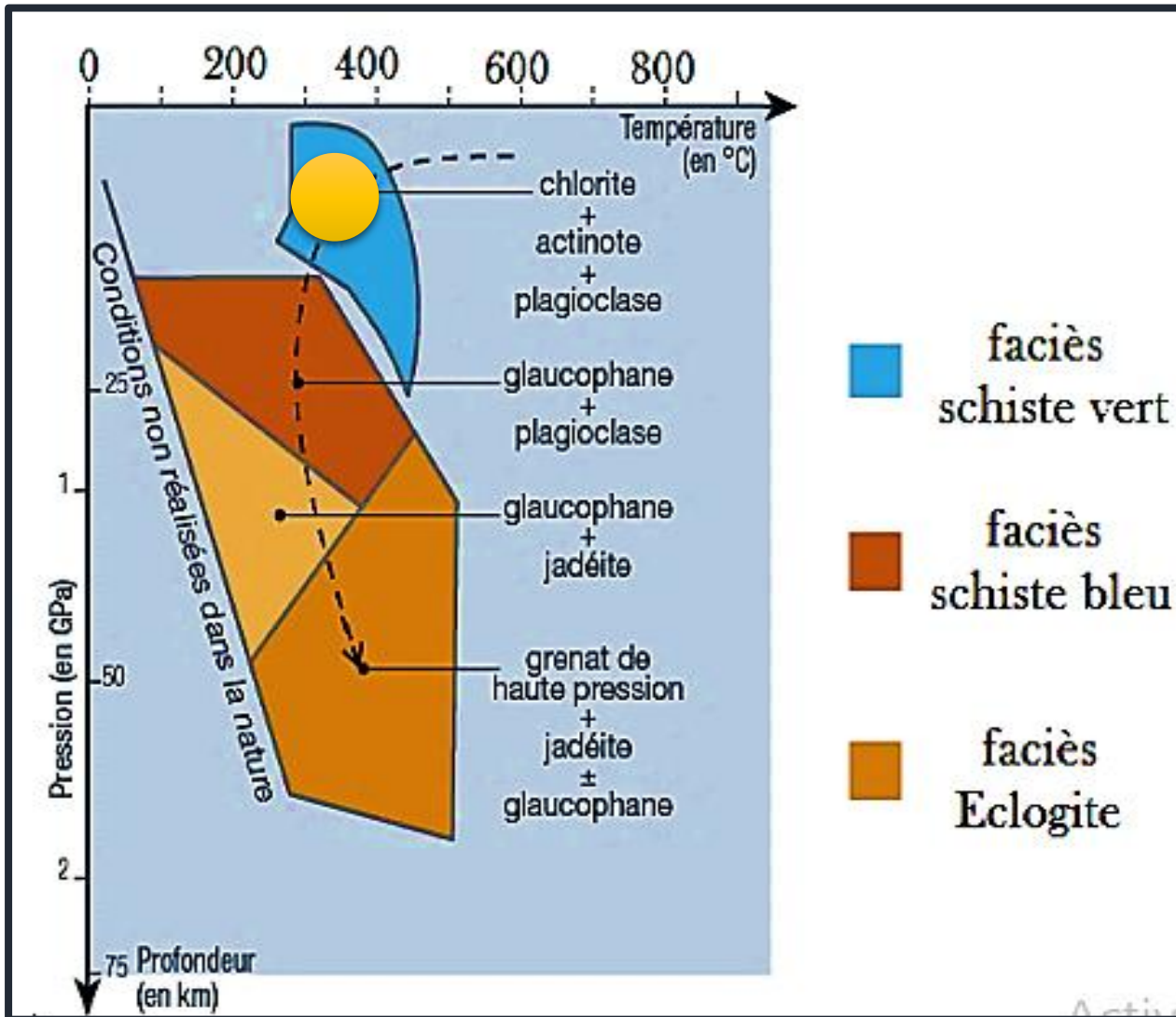
Types de métamorphisme

Métamorphisme dynamique (Zones de subduction)



- **Zone de subduction** : la lithosphère océanique s'enfonce progressivement en profondeur ; **enfouissement du gabbro** lors de la subduction provoquant la **formation des métagabbros**
- Augmentation de la pression et de la température avec une pression dominante : **les roches (basalte, gabbro)** subissent un **métamorphisme de haute pression**
- Transformation progressive des roches : **schistes verts** → **schistes bleus** → **éclogites** en grande profondeur
- **Transformations minéralogiques** à l'état solide avec libération d'eau : remontée de H_2O , fusion partielle du manteau, formation de magma et volcanisme en surface

Les conditions de pression et de température dans lesquelles ont été formées les Métagabbros.

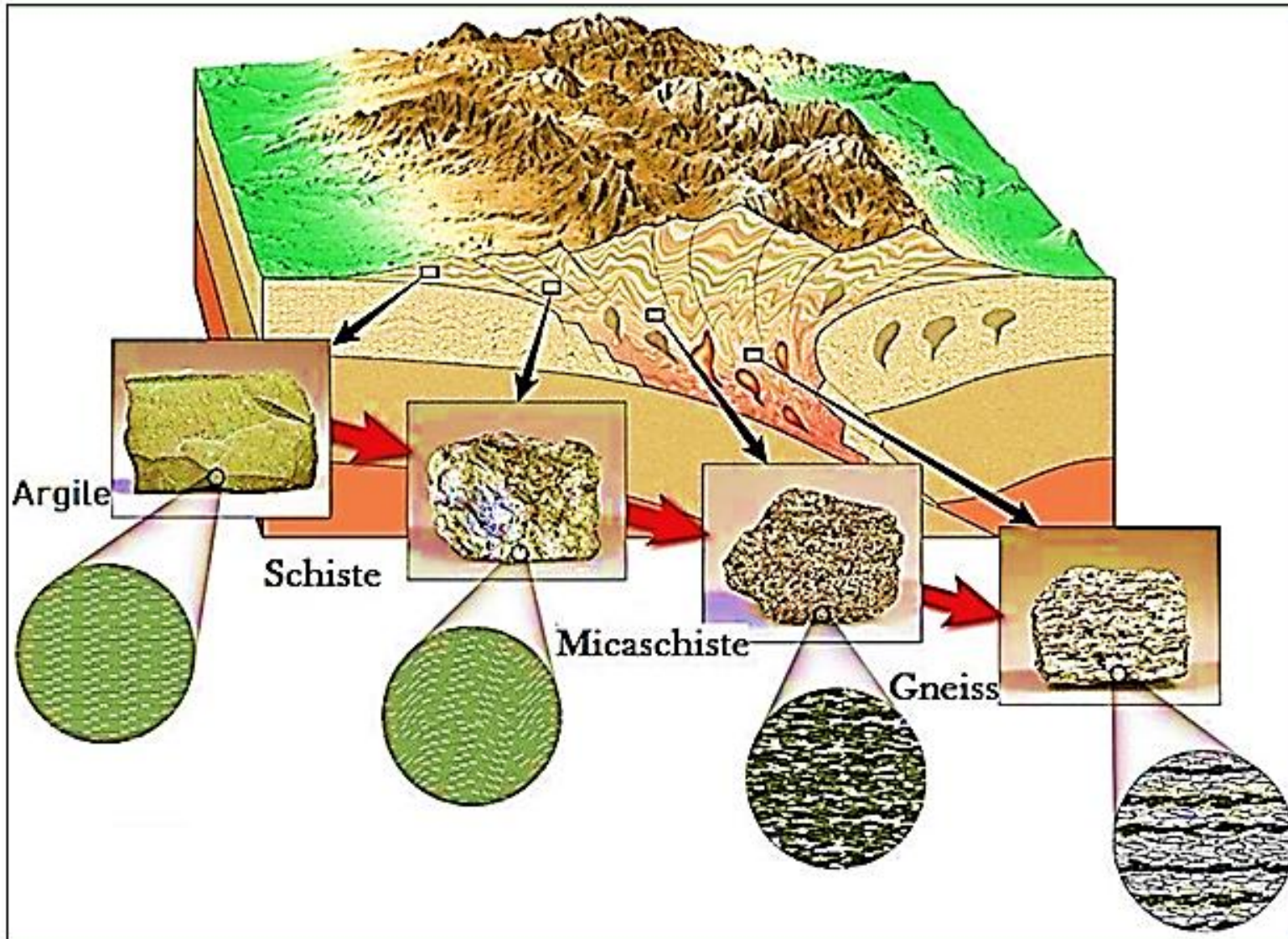


Les roches	Schiste vert (SV)	Schiste bleu (SB)	Éclogite (E)
Pression (GPa)	0.1 à 0.8	0.45 à 1.1	0.8 à 1.9
Température (°C)	280 à 450	80 à 450	200 à 520

Lorsqu'on se passe du faciès **schiste vert** vers le faciès **éclogite**, les roches subissent **une augmentation importante de la pression** en comparaison avec une faible augmentation de la température.

→ Donc c'est le métamorphisme dynamique

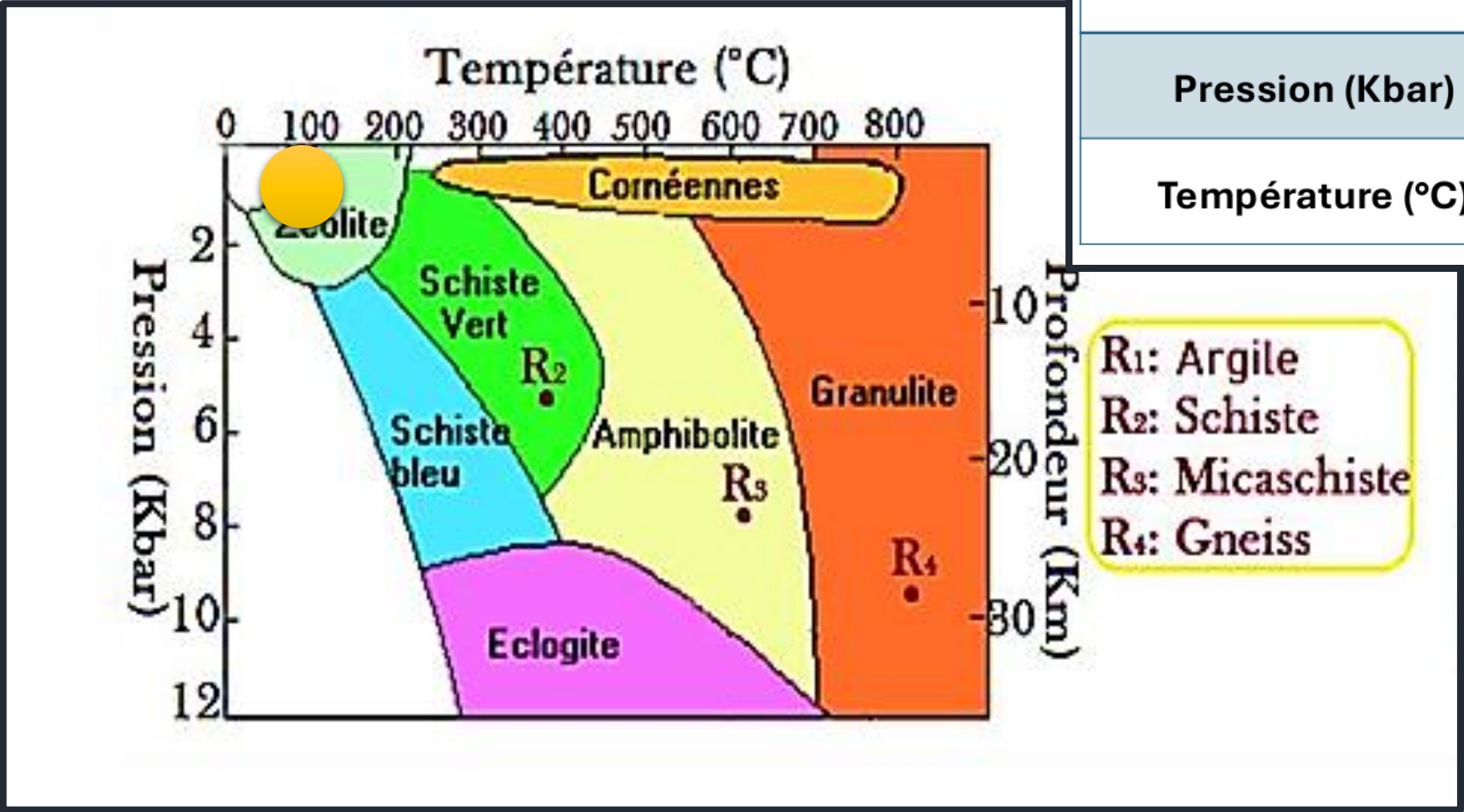
Métamorphisme Régional : Thermodynamique (Zones de collision)



- Le phénomène géologique responsable de la formation de **schiste, micaschiste, et le gneiss à partir de l'argile** → C'est **l'empilement des couches** de roches les unes sur les autres lors de **la collision continentale**

- Ce métamorphisme se produit dans une vaste zone et est associé à la formation des montagnes importants.

Les conditions de pression et de température dans lesquelles ont été formées les Schistes, Micaschiste et Gneiss.



Les roches	Schiste R2	Micaschiste R3	Gneiss R4
Pression (Kbar)	5.6	7.8	9
Température (°C)	380	610	810

R₁: Argile
R₂: Schiste
R₃: Micaschiste
R₄: Gneiss

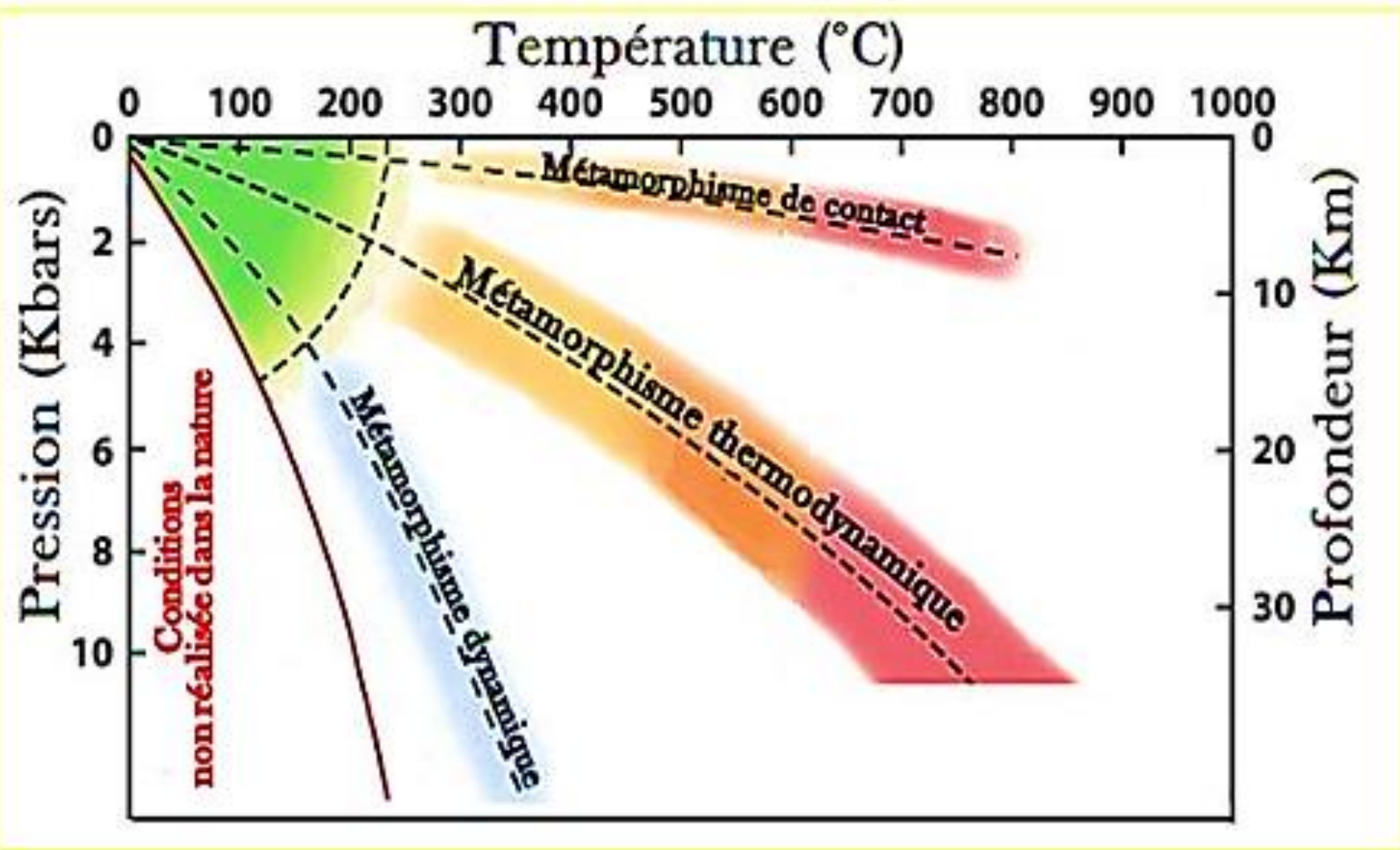
Lorsqu'on se passe du **schiste vers gneiss**, les roches subissent **une augmentation importante de la pression et une forte augmentation de la température**. Donc c'est le métamorphisme thermodynamique.

Métamorphisme de contact : Thermique

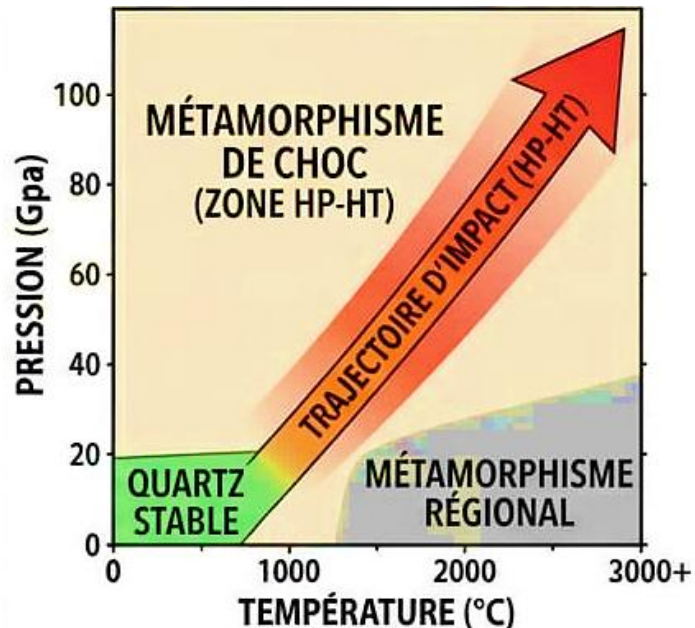


Formation de l'auréole de métamorphisme de contact

- ☐ On le trouve près des **zones de magmatisme : subduction, dorsales et points chauds.**
- ☐ Le métamorphisme de contact est causé par la **chaleur d'une intrusion magmatique.**
- ☐ Il se produit à **haute température et basse pression (HT-BP).**
- ☐ Il forme une **auréole métamorphique autour du magma** → Il transforme les roches voisines (souvent sédimentaires) en roches métamorphiques **non foliées (cornéennes, marbres, quartzites).**



Métamorphisme d'impact



Le métamorphisme de choc (ou d'impact) est causé par la **collision d'une météorite avec la surface terrestre**. Il se produit dans des **conditions extrêmes de très haute pression et température (HP-HT)**, mais pendant **un temps très court**.

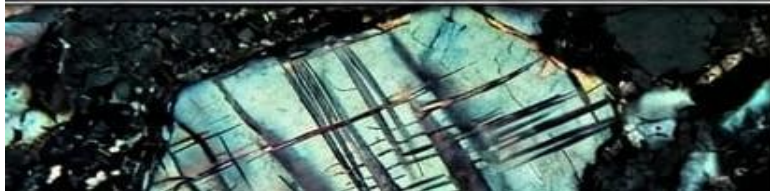
→ La durée très brève empêche les réactions métamorphiques complètes, ce qui limite les transformations à des changements polymorphiques.

Exemple : **le quartz** se transforme en **coésite et stishovite** (formes de haute pression). Ce type de métamorphisme laisse aussi des marqueurs caractéristiques : apparition de clivages et de structures planaires dans le quartz, formation de shatter cones (structures en cônes imbriqués), présence de pseudotachylites issues de la fusion locale des roches.

PREUVES GÉOLOGIQUES D'UN CRATÈRE D'IMPACT DE MÉTÉORITE



1. Microstructures de quartz choqué (PDF)



2. Structures en cônes de choc (Shatter cones)



3. Structures de pseudotachylite



Quartz choqué (PDF) :

Signature microscopique. Ce sont des rayures internes au cristal causées par une pression colossale

Shatter cones:

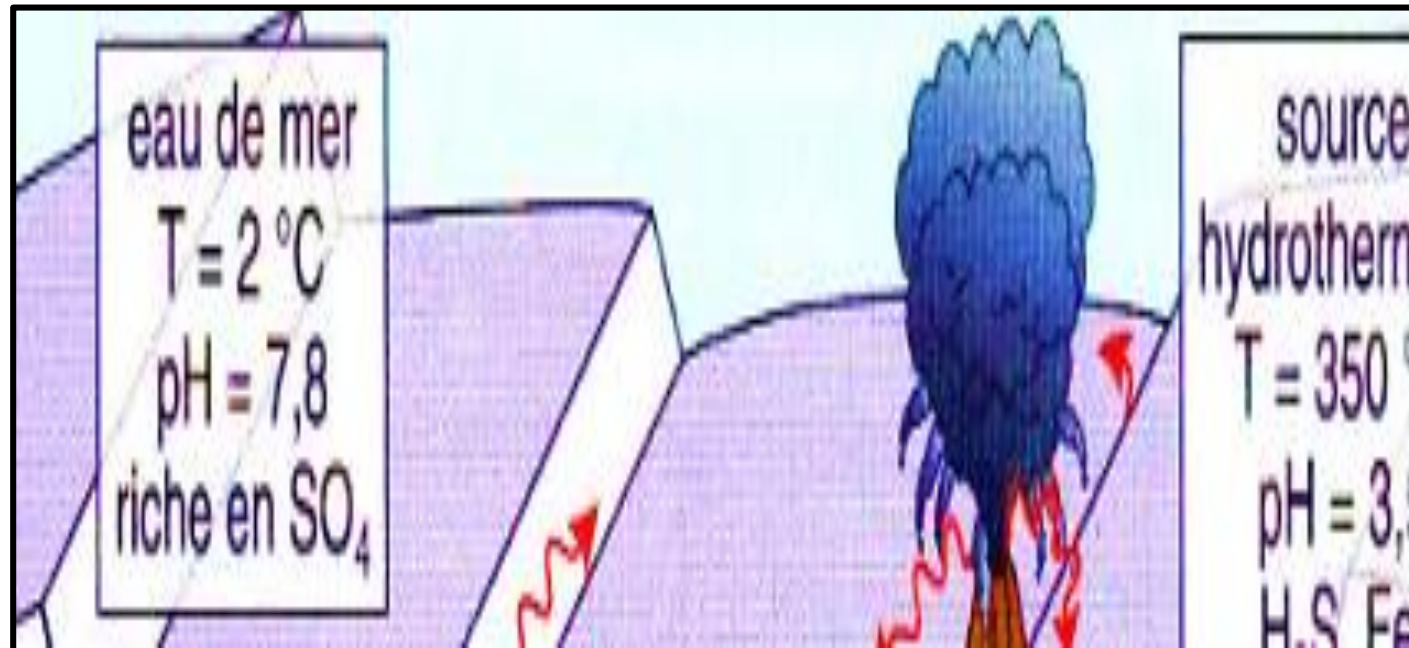
Signature macroscopique (visible à l'œil nu). La roche se casse en forme de cônes striés à cause de la violence de l'onde de choc.

Pseudotachylites:

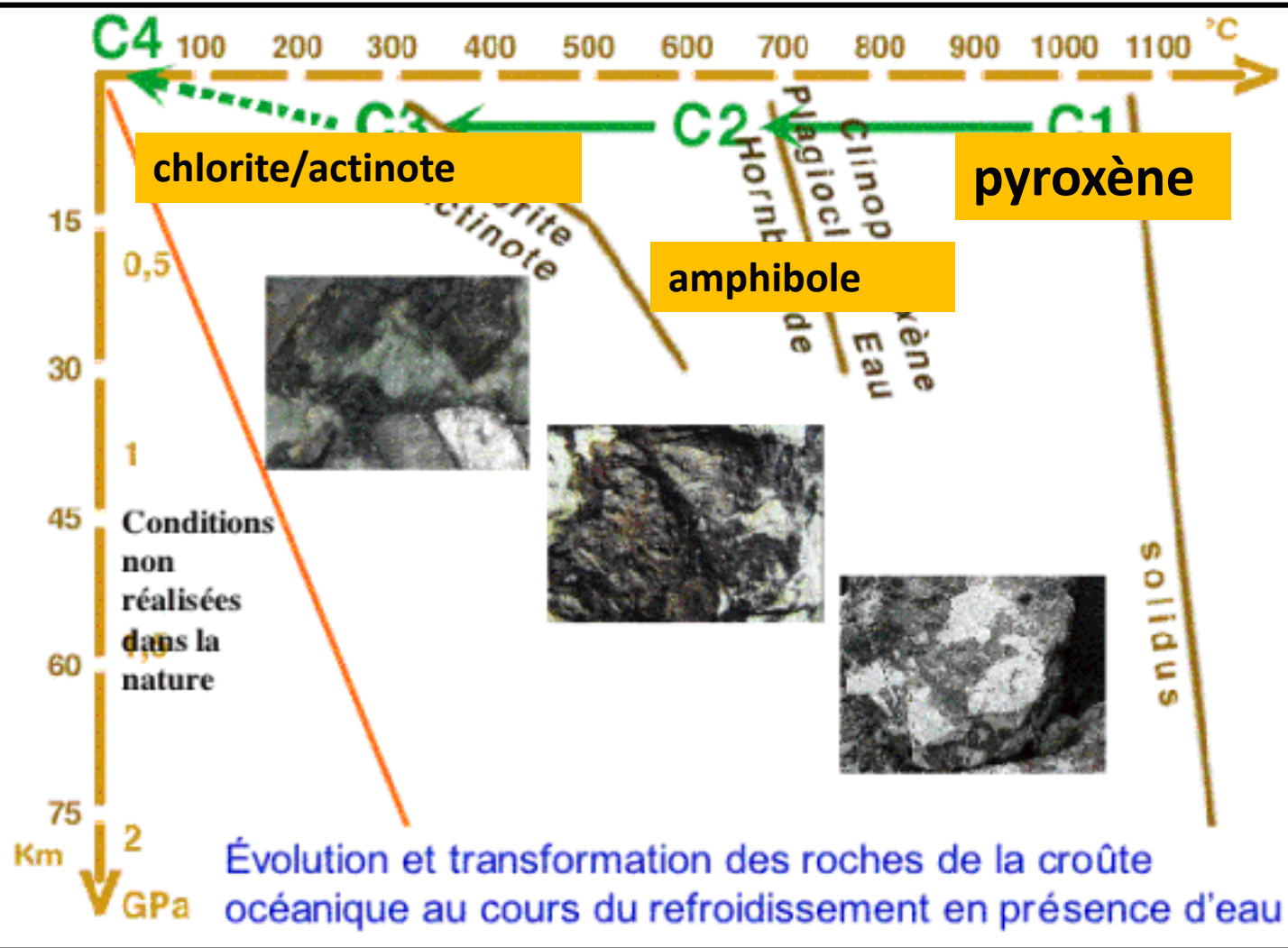
Signature de fusion. De la roche qui a fondu instantanément à cause de la friction extrême lors de l'impact, formant du verre noir.

Métamorphisme hydrothermal

- Transformation chimique des roches par des fluides chauds, surtout **près du magma et aux dorsales**.
- Le rifting crée des **failles normales et fractures**
- **L'eau de mer froide s'infiltré** et descend
- Elle **se réchauffe** près du magma
- Elle **réagit avec les roches et s'enrichit en éléments chimiques** (H_2S , Fe, Mn, Zn, Cu)
- Devenue **chaude et acide**, elle **remonte**
- Elle sort en **sources hydrothermales** (fumeurs noirs)
- En profondeur : métamorphisme hydrothermal (transformation des roches)
- En surface : précipitation des minéraux (dépôts)



Métamorphisme hydrothermal



Conditions du métamorphisme hydrothermal

- ✓ Eau (diminution de Température)
- ✓ Chaleur
- ✓ Circulation (fractures)

Où ça se produit ?

- ✓ Dorsales océaniques (cas classique)
- ✓ Zones volcaniques
- ✓ Régions avec circulation d'eaux chaudes en profondeur
- ✓ Parfois dans la croûte continentale fracturée

Métamorphisme hydrothermal



Skarns :

- Contact granite-calcaire → formation de :
 - wollastonite, quartz, calcite.



Greisens :

- Granites + fluides riches en F, B, Cl → :
 - quartz, topaze, fluorine (gisements Sn, W)



Dorsales océaniques :

- Circulation d'eau → :
 - serpentinisation, argilisation, minéraux hydratés.

