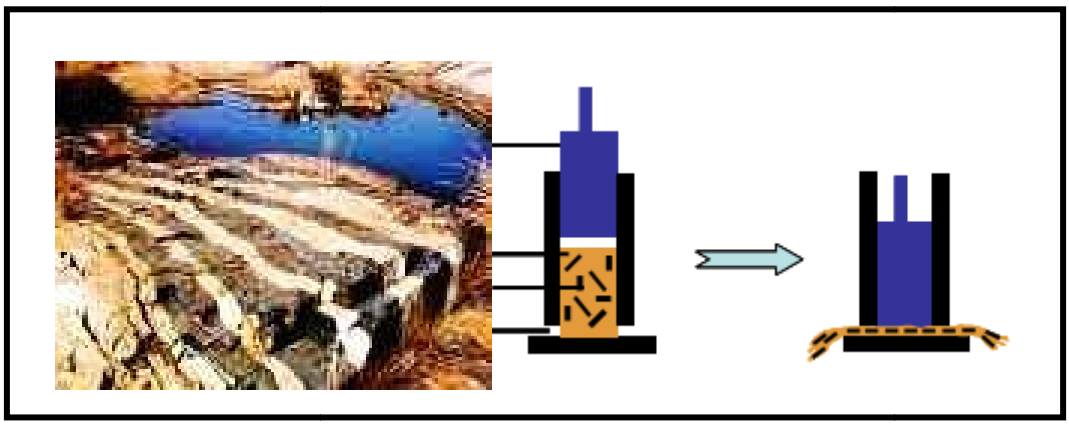
ثانوية الطبري التأهيلية

الكفيفات

علوم الحياة و الأرض

الوحدة الثالثة: الظواهر الجيولوجية المصاحبة لنشوء السلاسل الجبلية وعلاقتها بتكتونية الصفائح

الفصل 3 التحول وعلاقته بدينامية الصفائح



السنة الدراسية 2010 \ 2011

الأستاذ: عبد الرحمان البوخريصي

القسم: ثانية بكالوريا علوم فيزيائية – علوم الحياة و الأرض

الفصل 3 التحول و علاقته بدينامية الصفائح

بالإضافة إلى الصخور الرسوبية والصخور الصهارية، تتميز سلاسل جبال الطمر و الاصطدام بوجود صخور متحولة.
فما هي ظاهرة التحول؟ ما الخاصيات البنيوية و العيدانية للصخور المتحولة؟ ما ظروف التحول وما علاقتها بتكتونية الصفائح؟

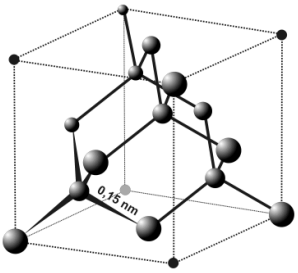
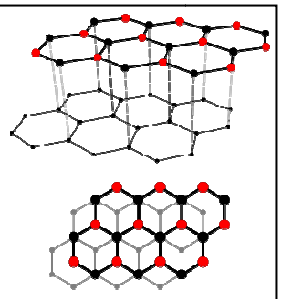
تذكير

1● الصخور: تنقسم الصخور إلى 3 مجموعات تختلف من حيث ظروف نشأتها و بالتالي تختلف من حيث بنيتها.
- الصخور الرسوبية: تتشكل نتيجة الظواهر الجيولوجية الخارجية: حث، نقل ، ترسب ثم تصخر.
- صخور صهارية: ناتجة عن تصلب الصهارة.(صخور بركانية في السطح، و بلوتونية في العمق).
- صخور متحولة: ناتجة عن تحول في الحالة الصلبة(دون انصهار) لصخور سابقة الوجود و ذلك نتيجة تغير درجة الحرارة و الضغط.

2● البلورات(المعادن): تتكون الصخور (رسوبية، صهارية و متحولة) من بلورات. و البلورات أجسام صلبة تتميز **بخصائصها الكيميائية** و بنيتها **الهندسية المنظمة** في الفضاء. تدعى العملية التي يتم فيها تشكيل البلورات **بالتبلور**.كل بلور يتميز بصيغة كيميائية خاصة به و شكل هندسي محدد.

• يمكن أن يكون لبعض البلورات نفس التركيب الكيميائي، لكن تختلف في البنية الهندسية: نتحدث عن معادن متعددة المظهر.

مثال1: للماس و الغرافيت نفس التركيب الكيميائي: يتكونان من عنصر الكاربون فقط (C). لكن الطريقة التي يتجمع بها الكربون تحدد البلور. فالكربون يتجمع في الماس على شكل مكعبات:cubique. و يتجمع في الغرافيت حسب نظام سداسي الأضلع hexagonal.

	
الماس	الغرافيت

إن درجة الحرارة و الضغط هما اللذان يحددان طريقة بناء البلور: فالماس يتكون في الأعماق الكبيرة(بين1100 °C و 1400° C) و في عمق ما بين (150 و 1000 Km). بينما يتشكل الغرافيت قرب السطح.

مثال2: لمعادن سيليكات الألومين(الأندلوسيت، السيليمانيت، و الديستين)نفس الصيغة الكيميائية Al_2SiO_5، لكن شكلها مختلف و ذلك لأنها تتكون في ظروف ضغط و حرارة مختلفة.

خلاصة: كل بلور يتميز بمجال من الضغط و الحرارة حيث يتكون و يبقى مستقرا فيه.

قصد تحديد خاصيات الصخرة المتحولة و الصخرة و الرسوبية، نعتبر المعطيات التالية:
يبين الجدول 1 التركيب الكيميائي و العيداني لصخرة رسوبية قبل و بعد تعرضها للتحول.

الجدول 1

الصخور	المعادن	العناصر الكيميائية
الصخرة الطينية	المرو- المعادن الطينية (الكلوريت، إيليت)	**Si, O, Mg, Fe, K, Al, nH_2O**
الصخرة المتحولة	المرو- فلدسبات بوتاسي- ميكا - أندلوسيت- سيليمانيت- كورديبريت.	**Si, O, Mg, Fe, K, Al**

1- قارن التركيب الكيميائي و العيداني للصخرتين بملأ الجدول أسفله بما يناسب.

المعادن			المكونات الكيميائية		
المحتفظ بها	**المختفية**	**الجديدة**	**المحتفظ بها**	**المختفية**	**الجديدة**

2- استنتج ماذا يحدث عند تحول صخرة رسوبية لصخرة متحولة.....

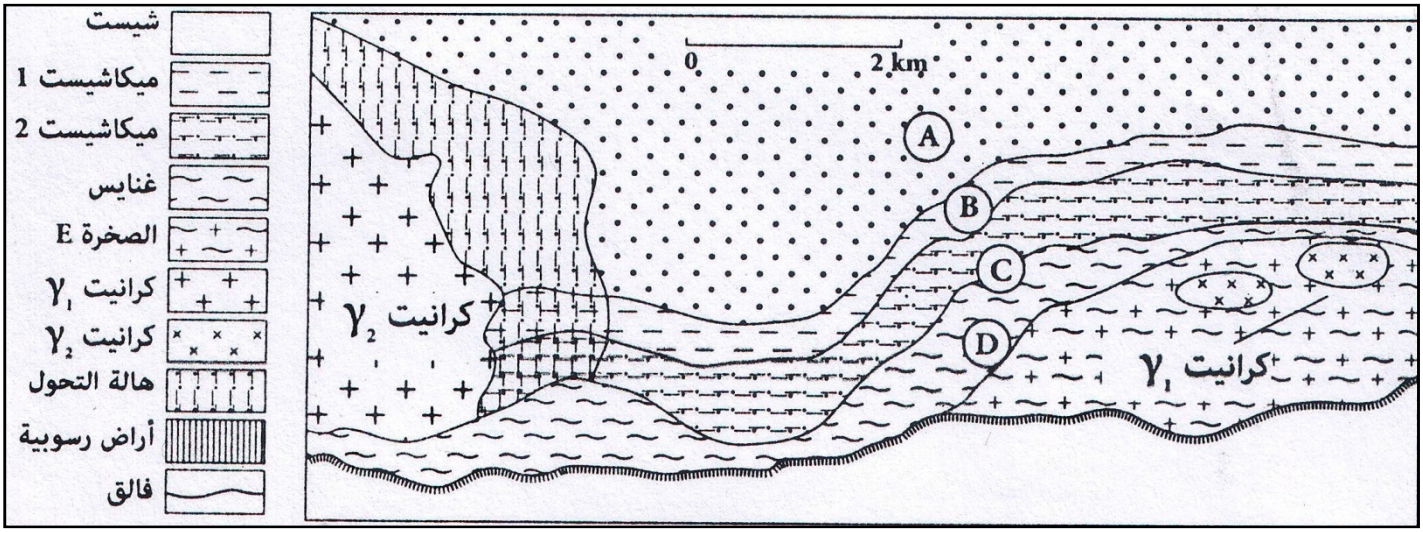
.....

.....

I- مميزات الصخور المتحولة بمناطق الإصطدام

1- المميزات البنيوية والعيدانية

تمثل الخريطة الجيولوجية أسفله جزءا من جبال البيريني بفرنسا تمكن من دراسة ظاهرة التحول التي صاحبت نشوء سلسلة الاصطدام هذه.



يعطي الجدول جانبه التركيب العيداني لأربع عينات صخرية أخذت من المستويات A و B و C و D المشار إليها في الخريطة. حدد التركيب العيداني لكل من الصخور A و B و C و D.

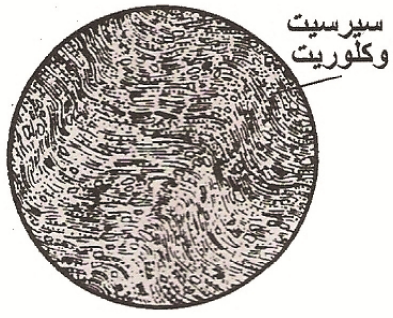
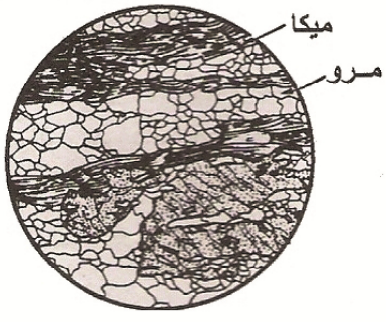
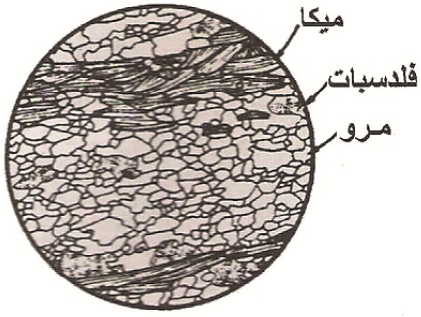
العينات الصخرية / المعادن	A شيست	B ميكاشيست I	C ميكاشيست II	A غنايس
مرو	—	—	—	—
سيريست	—			
كلوريت	—			
موسكوفيت		—	—	
بيوتيت		—		—
فلدسبات بوتاسي				—
أندلوسيت		—	—	
سيليمانيت				—

الصخرة A	
الصخرة B	
الصخرة C	
الصخرة D	

ماهي التغيرات التي طرأت على التركيب العيداني لهذه الصخور عند الإنتقال :

- من المستوى A إلى المستوى B: .....
.....
- من المستوى B إلى المستوى C:.....
- من المستوى C إلى المستوى D:.....
.....

يعطي الجدول التالي حالة بلورات العينات الصخرية: الشيست و الميكاشيست و الغنايس ملاحظة بالعين المجردة و بالمجهر المستقطب. حدد البنية المميزة لكل صخرة.

شيست	ميكاشيست	غنايس
		
تجمع البلورات على شكل وريقات ذات سمك ضعيف وذلك حسب سطوح التطبق	تجمع البلورات على شكل وريقات ذات سمك أكبر	تجمع البلورات على شكل أسرة داكنة(بيوتيت) و أسرة فاتحة (مرو + فلدسبات)

نلاحظ أنه كلما انتقلنا من الشيست نحو الميكاشيست إلى الغنايس، يزداد قد البلورات وتختلف بنية الصخور. البنية هي مختلف الطرق التي تنتظم بها المعادن داخل الصخور المتحولة ونميز:

- التنضد: تجمع البلورات على شكل وريقات.

- الشيستية: توريق أكثر دقة للمعادن، تكتسبه الصخور المتحولة تحت تأثير الضغوطات التكتونية. يمكن للصخرة أن تتجزأ حسب مستويات الشيستية.

- التوريق: بالإضافة إلى الشيستية يكتسب تورق المعادن تمايزا بتروغرافيا ينتج عنه تكون وريقات فاتحة وأخرى داكنة.

الشيست: التنضد أو شيستية الكسر. الميكاشيست: الشيستية أو شيستية التدفق.
الغنايس: التوريق.

2- المميزات العيدانية و التركيب الكيميائي

يمثل الجدول رقم 1 التركيب العيداني و الجدول رقم 2 التركيب الكيميائي لكل من الشيست و الميكاشيست و الغنايس.
ما هي الإستنتاجات الممكن استخلاصها من تحليل هذه المعطيات؟

الشيست	ميكاشيست	غنايس
- مرو - كلوريت - سيريسيت - موسكوفيت	- مرو - بيوتيت - موسكوفيت - كورديبريت	- مرو - بيوتيت - بيجادي - كورديبريت - فلدسبات - سيليمانيت

- نلاحظ كلما اتجهنا من الشيست إلى الغنايس اختفاء معادن وظهور أخرى.
- نلاحظ أن هذه الصخور لها نفس المكونات الكيميائية لكن بنسب مختلفة.
- نلاحظ أيضا أن نسبة الماء تقل من الشيست في اتجاه الغنايس.
- يغلب على مكونات هذه الصخور بنسبة كبيرة SiO_2 و Al_2O_3 تسمى المعادن التي تتكون من هذه العناصر بسيليكات الألومين.
- اشتراك هذه الصخور في نفس المكونات يوحي بأن لها نفس الأصل.

	الشيست	ميكاشيست	غنايس
SiO2	60,2%	60,9	68,7
Al2O3	20,9	19,1	16,2
Fe2O3	2,8	1,2	0,7
FeO	3,7	4,1	4,1
MgO	0,85	1,4	1,3
CaO	0,55	1,7	1,8
Na2O	2,45	2,1	3,8
K2O	4,1	3,7	3
H2O	4,05	3,65	1,39

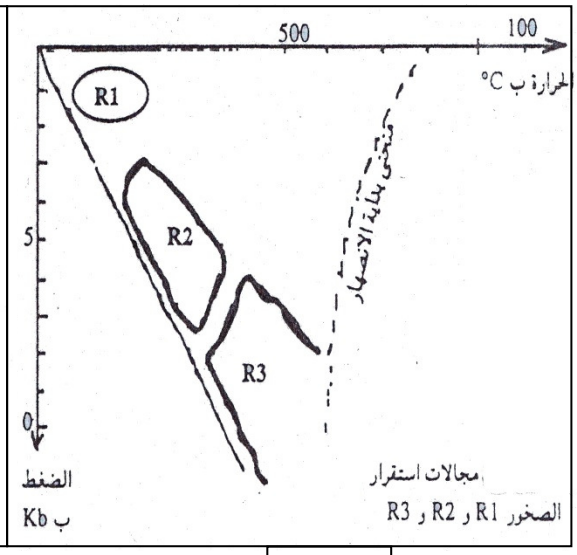
خلاصة

تتميز السلاسل الجبلية بمناطق الإصطدام، بالإضافة إلى التشوهات التكتونية، باستسطاح صخور ذات بنيات وتركيب عيداني مميز تسمى صخورا متحولة. يمكن أن نميز منها:
- الشيست: صخرة ذات بنية شيستية تتميز بمعدن الكلوريت الأخضر.
- الميكاشيست: صخرة لامعة تتجمع بها المعادن على شكل أسرة دقيقة مما يعطي للصخرة طابعا مورقا ويجعلها سهلة الإنفصام، تسمى هذه الخاصية بالشيستية.
- الغنايس: صخرة تتميز بتعاقب أسرة فاتحة وأسرة داكنة، يعطيها طابعا مورقا وغير قابل للإنفصام. تسمى هذه الخاصية بالتوريق.
تمثل هذه الصخور مجموعة صخرية لها نفس التركيب الكيميائي العام رغم اختلاف بنيتها وتركيبها العيداني. مما يدل على أن لها نفس الأصل لكنها خضعت لظروف تشكل مختلفة

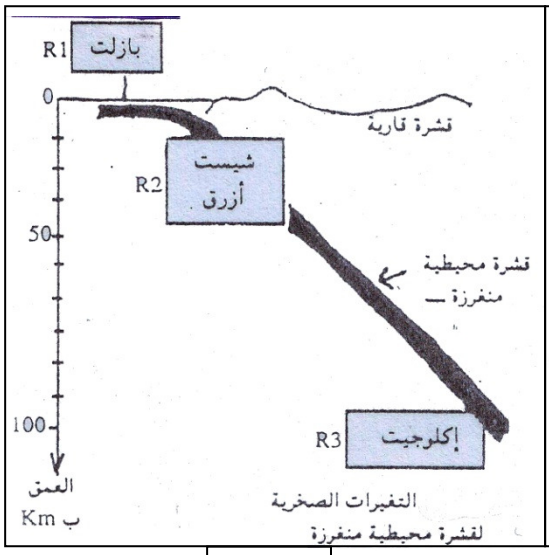
II- المميزات العيدانية و الكيميائية للصخور المتحولة بمناطق الطمر

تتميز مناطق الطمر الحالية بظروف ملائمة لتكون الصخور المتحولة، إلا أنه يصعب ملاحظتها ودراستها نظرا لوجودها في الأعماق. لذلك يلجأ إلى دراسة الصخور المتحولة المستسطحة بمناطق الطمر القديمة.
تتضمن جبال الألب صخورا متحولة شاهدة على حدوث طمر سابق للإصطدام الذي أدي إلى تشكل هذه الجبال.
تبين الوثيقة 2 ص 260 خريطة مجالات توزيع الصخور المتحولة بجبال الألب و هي:
- مجال الشيست الأخضر، - مجال الشيست الأزرق، - مجال الإكلوجيت المتداخل مع أوفيوليت متحول.

للكشف عن بعض مظاهر التحول بالمنطقة نقترح دراسة الوثائق 1 و 2 و 3 .



وثيقة 1



وثيقة 2

الصخور	معادنها المميزة
R1 البازلت	أوليفين بلاجيوكلاز
R2 شيست أزرق	كلوكوفان
R3 **إيكلوجيت**	بجادي أمفيبول

وثيقة 3

استخرج من الوثيقتين 1 و 2 ما يبين أن البازلت تعرض لتحول أثناء انغرازه.

نلاحظ تحول البازلت إلى شيست أزرق ثم إيكلوجيت أثناء انغرازه.

3- حدد ظروف P و T التي خضع لها البازلت المنغرز حولته إلى ايكلوجيت

يتميز مكان انغراز القشرة المحيطية (البازلت و الكابرو) بمناطق الطمر بتدفق حراري ضعيف= تبريد محلي مقارنة مع الدرجة السعيرية العادية (الوثيقة1). عند انغراز البازلت يرتفع الضغط تدريجيا و بشكل كبير مع العمق.
إذن ظروف تحول البازلت إلى إيكلوجيت هي: Tمنخفضة و P مرتفعة. نتحدث عن تحول الطمر أو التحول الدينامي.

يمثل الجدول رقم 1 التركيب العيداني و الجدول رقم 2 التركيب الكيميائي للصخور المتحولة بمناطق الطمر، كما يمثل الجدول 3 التركيب الكيميائي لصخرتي الغابرو والبازالت ما هي الإستنتاجات الممكن استخلاصها من تحليل هذه المعطيات؟

المعادن	غابرو	شيست أزرق	إكلوجيت
بلاجيوكلاز Plagioclase	+	نادر	-
أوجيت Augite	+	-	-
إبيدوتي Epidote	-	+	-
كلوكوفان Glaucophane	-	+	-
جاديت Jadite	-	+	+
بيجادي Grenat	-	+	+

العناصر الكيميائية	SIO_2	Al_2O_3	TiO_2	FeO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
النسب المئوية	47,1	14,2	2,3	11	12,7	9,9	2,2	0,4

العناصر الكيميائية	SIO_2	Al_2O_3	FeMgO	CaO	Na_2O	K_2O
البازلت	50%	14,8%	18,4%	11,5%	2,7%	0,1%
الغابرو	49,9%	17,8 %	16,2%	11,9%	2,8%	0,2

تختلف هذه الصخور من ناحية التركيب العيداني.

للصخور المتحولة المميزة لمناطق الطمر نفس التركيب الكيميائي، والذي يقترب من التركيب الكيميائي للغابرو و

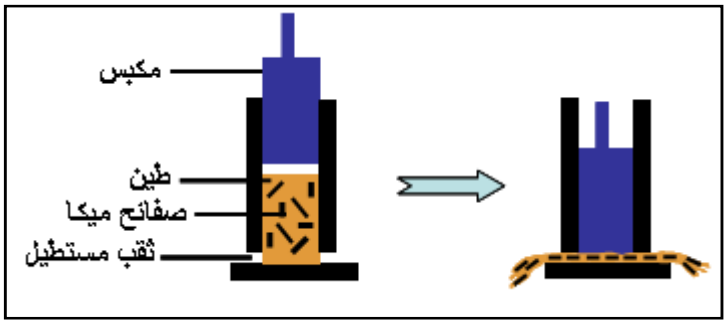
يوحي التركيب الكيميائي المتشابه للصخور المتحولة مع الغابرو والبازالت، بكونها نشأت نتيجة تحول أصاب الغابرو والبازالت (صخور أصلية).

خلاصة

تبرز دراسة الصخور المستسطحة بمناطق الطمر القديمة تمنطقا في توزيع الصخور المتحولة حيث ننتقل تدريجيا من مجال الشيست الأخضر نحو مجال الشيست الأزرق ثم إلى مجال الإكلوجيت المتداخل مع الأوفيوليت. لمختلف هذه الصخور التركيب الكيميائي نفسه، رغم اختلاف بنيتها وتركيبها العيداني، مما يدل على أن لها نفس الأصل لكنها خضعت لظروف تشكل مختلفة.

III- عوامل التحول

أثناء التحول تتغير بنية الصخور و يتم إعادة تنظيم الشبكة البلورية للبلورات و بالتالي اختفاء معادن و ظهور أخرى، فكيف يتدخل كل من P و T في تحول الصخور؟



1- تجربة Daubrée: دور الضغط

قام Daubrée بإخضاع خليط من الطين وصفائح من الميكا لضغط مرتفع داخل أسطوانة بواسطة مكبس. وتمثل الوثيقة جانبه النتائج المحصل عليها.
حلل هذه المعطيات، ماذا تستنتج؟

نلاحظ ظهور شيستية على مستوى الطين المتدفق من الثقب المستطيل. تكون هذه الشيستية متعامدة مع اتجاه قوى الضغط كما أن صفائح الميكا تتصفف في اتجاه الشيستية.
استنتاج: الضغط هو المسؤول عن تغيير بنية الصخور المتحولة.

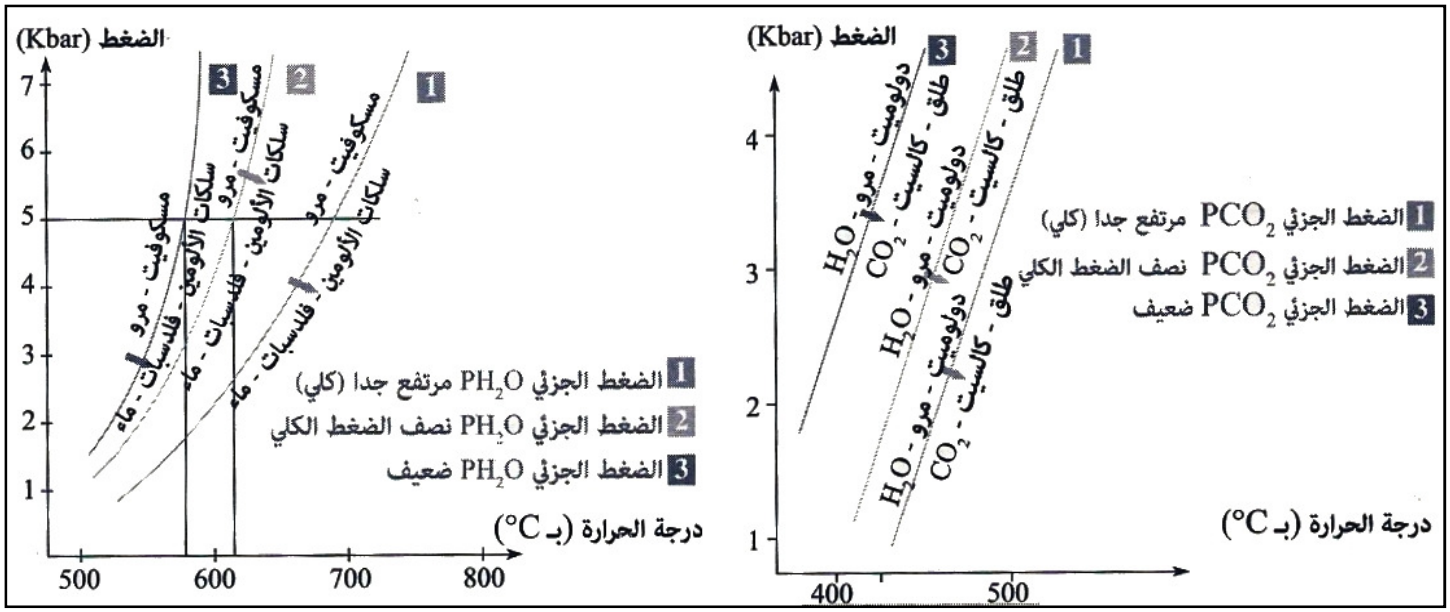
2- تجربة Winkler: دور الحرارة

❖ قام Winkler خلال هذه التجربة بإخضاع صخور طينية لضغط ثابت 2 Kbar مع ارتفاع تدريجي لدرجة الحرارة. وتمثل الوثيقة جانبه النتائج المحصل عليها.
حلل هذه المعطيات. ماذا تستنتج؟

نلاحظ اختلاف التركيب العيداني بين الصخور في بداية التجربة ونهاية التجربة. مما يدل على أن الحرارة المرتفعة أحدثت تغيرا نهائيا في التركيب العيداني لهذه الصخور، دون حدوث انصهار: إعادة التبلور.

3- دور الموائع البيفرجية

للكشف عن تأثير الموائع البيفرجية (بخار الماء و ثنائي أكسيد الكربون)، الموجودة بين البلورات، تم تتبع ظروف الضغط و الحرارة اللازمة لحدوث بعض التفاعلات العيدانية تحت تأثير ضغوط مختلفة لهذه الموائع.



• إستنتج تأثير الموائع البيفرجية في تحول الصخور.

نلاحظ أنه كلما ارتفعت نسبة الموائع البيفرجية إلا و تطلبت التفاعلات المسؤولة عن اختفاء و ظهور المعادن درجات مرتفعة. و بالتالي فالموائع تقاوم ظاهرة التحول.

اعتمادا على المعطيات التجريبية السابقة، صغ تعريفا لظاهرة التحول.

من خلال كل المعطيات السابقة يمكن استخلاص أن التحول يمثل مجموع التغيرات البنيوية و العيدانية لصخرة في الحالة الصلبة (دون حدوث انصهار) خضعت لظروف ضغط و حرارة تختلف عن ظروف تشكلها الأصلي، و ينتج عن هذه الظاهرة تشكل صخور تسمى صخور متحولة roches métamorphiques. قد يصيب التحول صخور رسوبية أو صهارية أو صخور متحولة سابقة الوجود.

خلاصة

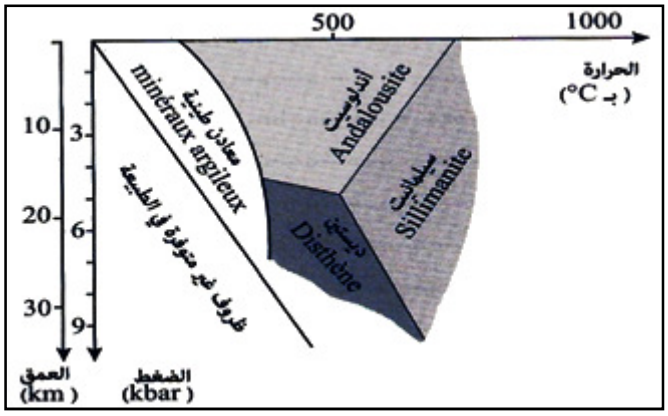
أثناء التحول: يؤثر الضغط الموجه في بنية الصخور(الشيستية و التوريق)، كما تؤثر درجة الحرارة في إعادة تبلور البلورات، و تقوم الموائع بمقاومة التحول.

IV- التغيرات البتروغرافية المصاحبة للتحول: السلسلة التحولية

1- المعدن المؤشر

تمت دراسة معادن **سيليكات الألومين** (أندلوسيت ـ سيليمانيت ـ ديستين وهي معادن مميزة للصخور المتحولة) حسب درجة حرارة و ضغط ظهورها فتم الحصول على النتائج الممثلة في الوثيقة جانبه.

حلل هذه المعطيات، ماذا تستنتج؟



يتبين أن لكل معدن ظروف حرارة و ضغط يكون خلالها في حالة استقرار.
ظروف استقرار كل معدن تشكل ما يسمى مجال استقرار المعدن. تغير هذه الظروف يؤدي إلى تحول المعدن إلى معدن آخر دون حدوث انصهار.

• إذا علمت أن درجة الحرارة السعيرية في منطقة X هي درجة واحدة لكل 35 متر: (1°C/35m). أحسب درجة الحرارة في عمق 5 Km، 15 Km، 20Km ثم استنتج المعادن التي ستظهر في صخرة أم طينية مغمورة في عمق:

5 Km: 142,8° C. معادن طينية (P و T غير كافيين لتحول الصخرة).

15 Km: 428,5° C .الأندلوسيت.

20 Km: 570,4°C . السيليمانيت.

• حدد مجال استقرار كل معدن من المعادن الثلاثة.

المعدن	الأندلوسيت	السيليمانيت	الديستين
ظروف التشكل	P منخفض T منخفض إلى متوسط	T متوسط إلى مرتفع	ضغط متوسط إلى مرتفع

• فيما يفيد اختلاف مجالات استقرار المعادن بالنسبة لتحديد ظروف التحول؟

لكل معدن مجال معين من الضغط والحرارة يكون مستقرا فيه. تغير الضغط والحرارة يؤديان إلى عدم استقرار المعدن، وبالتالي اختفائه وظهور معدن جديد مستقر في الظروف الجديدة. وهكذا فإن وجود هذا المعدن في صخرة متحولة يدل على ظروف الضغط والحرارة التي تشكلت فيها الصخرة، لذلك نتحدث عن المعدن المؤشر. يمكن تحديد مناطق التحول بناء على ظهور أو اختفاء المعدن أو المعادن المميزة لكل مجال دينامي حراري.

2- مفهوم المتتالية التحولية

الجدول 1

الصخور	التفاعلات	المعادن المؤشرة	
ميكاشيست ذو موسكوفيت	كلوريت+موسكوفيت	كلوريت و موسكوفيت	تحول متزايد ---
ميكاشيست ذو نوعين من الميكا	بجادي+بيوتيت	موسكوفيت متبقي	
غنايس ذو نوعين من الميكا	مرو+موسكوفيت	بيوتيت (اختفاء الكلوريت)	
غنايس ذو بيوتيت	سليمانيت+أرتوز سليمانيت+مرو+بيوتيت	بيوتيت و سليمانيت	
غنايس أبيض	كورديريت+مرو	اختفاء البيوتيت	

حسب ظروف الضغط ودرجة الحرارة تتم إعادة تنظيم الشبكة البلورية للمعادن فتظهر معادن معينة وتختفي أخرى. يمثل الجدول رقم 1 تعاقب ظهور واختفاء المعادن المؤشرة في متتالية تحولية طينية.كما يمثل الجدول رقم 2 مميزات مجموعة من المتتاليات التحولية.

الجدول 2

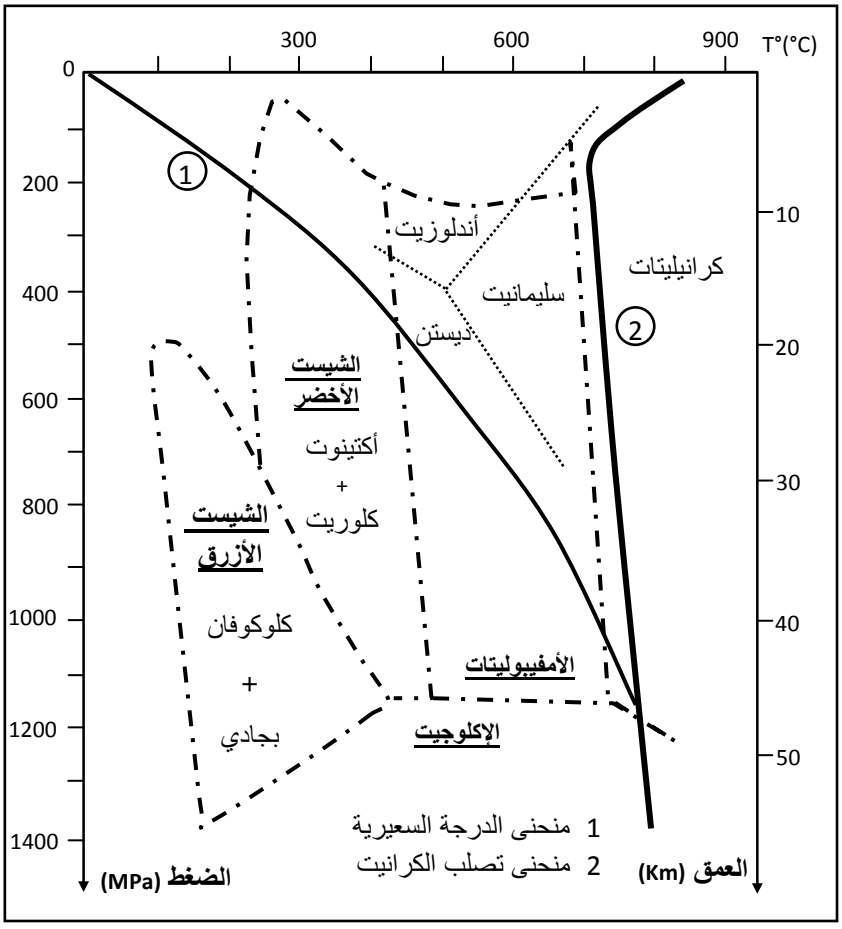
متتاليات تحولية	الصخرة الأصل	طبيعتها الكيميائية	الصخور المتحولة المنحدرة منها
متتالية الطينية	طين	سيليسية ألومينية	شيست - ميكاشيست - غنايس
متتالية رملية	حجر رملي	سيليسية	مرويت
متتالية كربوناتية	كلس	كلسية	رخام (كالكاشيست)
متتالية كربونية	فحم حجري	كربونية	غرافيت (ذرات الكربون تشكل وريقات) ماس (ذرات الكربون على شكل رباعيات الأوجه)

• انطلاقا من تحليلك لمعطيات الجدولين، إعط تعريفا للسلسلة التحولية.

المتتالية التحولية هي مجموعة من الصخور المتحولة المنحدرة من نفس الصخرة الأصلية والتي خضعت لدرجات تحول متصاعدة.
مثال 1 المتتالية التحولية الطينية: طين- شيست- ميكاشيست- غنايس.
مثال 2 المتتالية التحولية الكربونية: الفحم الحجري- كرافيت – الماس.

3- سحنة التحول

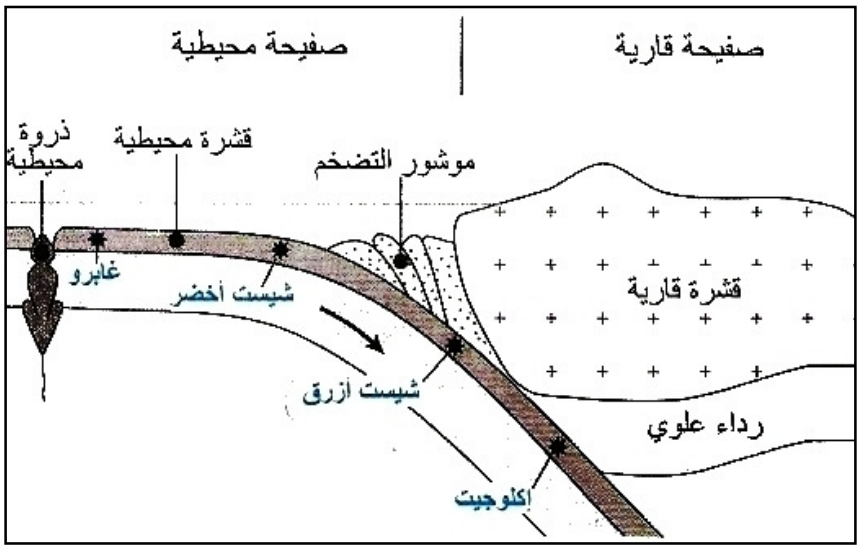
يصعب تصنيف الصخور المتحولة وتقييم درجة تحولها نظرا لتنوع مصادرها واختلاف ظروف تكونها. من بين محاولات التصنيف تلك التي تعتمد على سحنات التحول، حيث قام Escola بإخضاع صخرة بازلتية لظروف ضغط وحرارة متغيرين فحصل على النتائج المبينة في الوثيقة جانبه.
اعتمادا على تحليل الوثيقة و المعطيات السابق، استخرج تعريف سحنة التحول و السلسلة التحولية.



تحليل: يقسم المبيان إلى عدة مجالات،حيث يضم كل مجال مجموعة من المعادن المؤشرة التي تستقر داخل حقل من P و T.
تعريف: سحنة التحول هي مجموعة من المعادن (الصخور) التي تستقر وتميز مجالا معينا من الضغط والحرارة.

يمكن مفهوم سحنة التحول من تجميع صخور تعرضت لظروف ضغط و حرارة معينة، بغض النظر عن تركيبها الكيميائي.

- **أمثلة لسحنات تحول: سحنة الشيست الأخضر، سحنة الشيست الأزرق، سحنة الإكلوجيت...**
- **تضم سحنة الشيست الأخضر الصخور المتحولة التالية: (شيست من أصل طيني، شيست أخضر ذو أصل بازلتي، رخام من أصل كلسي).**



أ- سحنات التحول في مناطق الطمر

- استخرج من الوثيقة السابقة مختلف سحنات التحول لصخرة الكابرو (و البازلت) في منطقة الطمر محددا معادنها المؤشرة

البازلت (أو الكابرو)	شيست أخضر	شيست أزرق	إيكلوجيت
أولفين،بيروكسين، بلاجيوكلاز	أكتينوت ، كلوريت	كلوكوفان، بيجادي	جاديت ، بيجادي

- إعط ظروف P وT التي تميز تحول الكابرو إلى إيكلوجيت مستعينا بالوثيقتين السابقتين.

أثناء انغراز الغلاف الصخري المحيطي تحت القاري يرتفع الضغط تدريجيا بشكل كبير بينما يكون التدفق الحراري ضعيفا في منطقة الطمر نظرا للتبريد المحلي. و يؤكد هذا السحنات التي تمر منها صخور القشرة المحيطية: شيست أخضر---> شيست أزرق---> إيكلوجيت التي تميز ضغطا مرتفعا و درجة حرارة منخفضة.

ب- سحنات التحول في مناطق الأصطدام

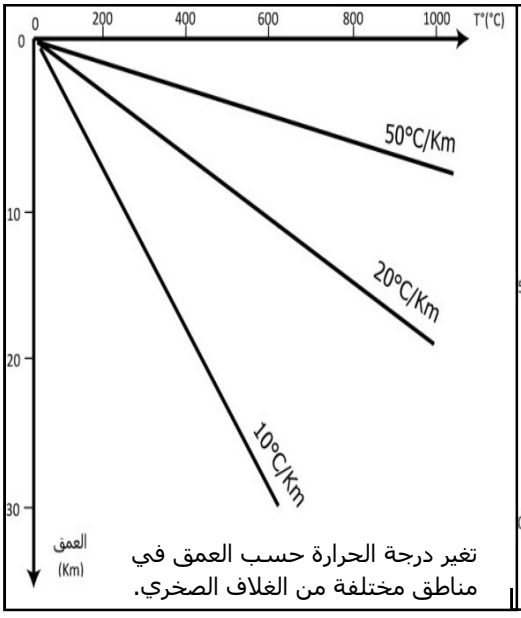
إن الدرجة السعيرية (التدفق الحراري) ليست مستقرة في القشرة الأرضية فهي تتغير في الأعماق حسب توصيلية الصخور و حسب الطبيعة الجيولوجية للمنطقة.

- حدد من بين الدرجتين السعيريتين التاليتين:

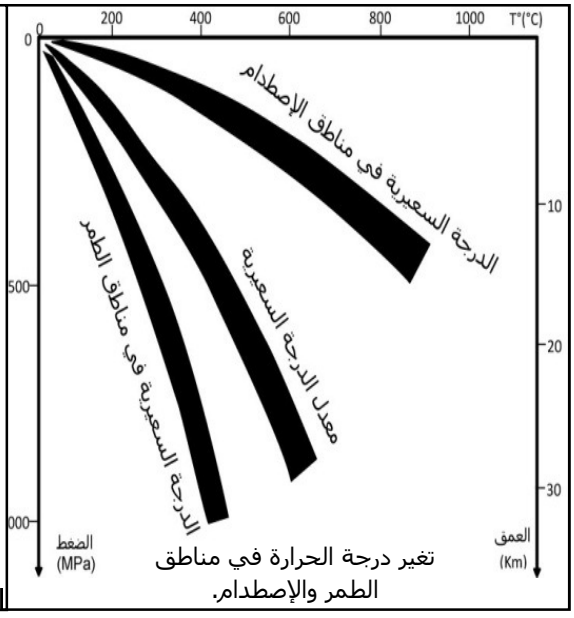
50°C /Km

10°C /Km

درجة مناطق الإصطدام و درجة مناطق الطمر. علل إجابتك.



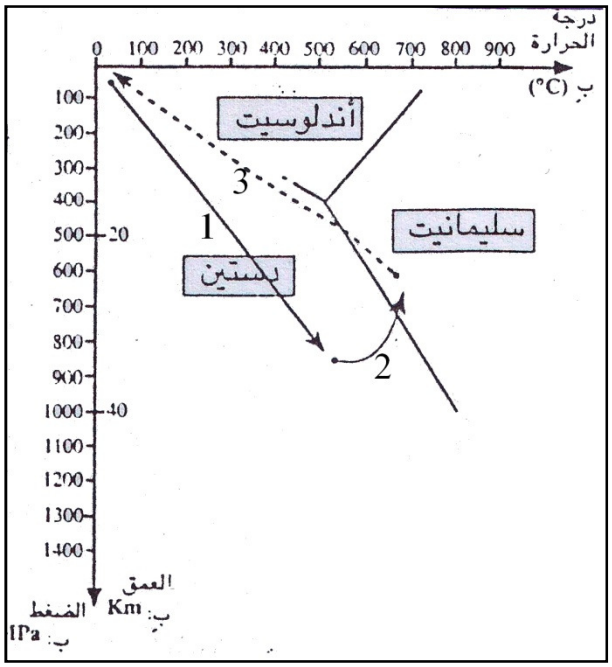
تغير درجة الحرارة حسب العمق في مناطق مختلفة من الغلاف الصخري.



تغير درجة الحرارة في مناطق الطمر والإصطدام.

- الدرجة السعيرية لمناطق الطمر: 10°C /Km نظرا لانغراز الصفيحة المحيطية الباردة في الأستينوسفير الساخن.

- الدرجة السعيرية لمناطق الاصطدام هي : 50°C /Km نظرا لتجابه صفيحتين قاريتين (احتكاكات جد مهمة أي T و P كبيرتين).



تتميز مناطق الاصطدام بسحنة الأمفيبوليت (ديستين و سيليمانيت). تبين الوثيقة جانبه مصير الكابرو المتحول قبل و بعد اصطدام صفيحتين قاريتين.

• اربط مسار تحول هذه الصخرة بالظروف السائدة في المنطقة.

- يبين المسار 1 تحول الكابرو في ضغط مرتفع و حرارة منخفضة: إنه التحول الدينامي. و هو مميز لمناطق الطمر.

- يبين المسار 2 ارتفاعا في درجة الحرارة الذي يمكن تفسيره ببداية اصطدام الصفيحتين القاريتين و التحول إلى سلسلة الاصطدام و بالتالي التحول إلى سحنة الأمفيبوليت. إنه التحول الدينامي الحراري.

- تؤدي الإنضغاطات القوية إلى رفع الكتل الصخرية العميقة إلى السطح (المسار 3) و بالتالي إعادة تبلور المعادن و المرور إلى سحنة الشيست الأخضر.

4- **مفهوم السلسلة التحولية:**

تعريف:_تشكل سحنات التحول المتتالية بالنسبة لصخرة معينة بعد تغيير ظروف الضغط والحرارة ما يعرف بالسلسلة التحولية.

المتتالية التحولية	الطين ------> الشيست-----> الميكاشيست-----> الغنايس
السلسلة التحولية	شيست أخضر----- > أمفيبوليت----->

المتتالية التحولية	البازلت(الكابرو)-----> الميتابازلت (الميتاكابرو)
السلسلة التحولية	منطقة الطمر: شيست أخضر-----)شيست أزرق-----) إيكلوجيت

خلاصة:

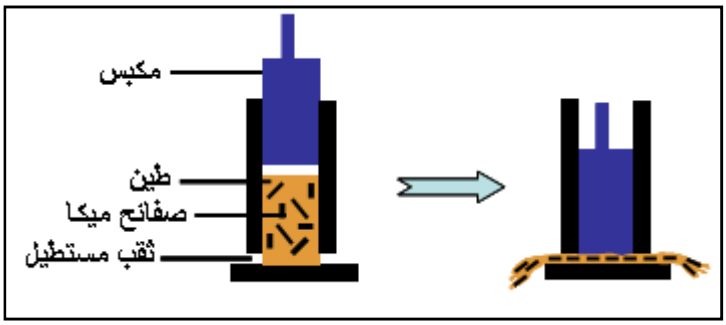
- المعدن المؤشر: هو كل معدن يمكن وجوده في صخرة متحولة من معرفة ظروف الضغط والحرارة التي تشكلت فيها هذه الصخرة. تعتبر سيليكات الألومين (أندلوسيت، سيليمانيت، ديستان) من أهم المعادن المؤشرة المعتمدة في تحديد مجالات الضغط والحرارة السائدة خلال تكون الصخور المتحولة.

- المتتالية التحولية: مجموعة من الصخور المتحولة المنحدرة من نفس الصخرة الأصلية والتي خضعت لدرجات تحول متصاعدة (ما يهم في مفهوم المتتالية التحولية هو أن لكل الصخور نفس التركيب الكيميائي لأنها تنحدر جميعها من نفس الصخرة الأصلية).

- سحنة التحول: مجموعة من المعادن التي تستقر وتميز مجالا معينا من الضغط والحرارة (ما يهم في مفهوم سحنة التحول ليس التركيب الكيميائي للصخور وإنما ظروف الضغط والحرارة المتماثلة التي تشكلت فيها هذه الصخور، فكل سحنة تقابل مجالا معينا من الضغط والحرارة).

- السلسلة التحولية: هي مجموع السحنات التحولية بالنسبة لصخرة معينة تعرضت لتغير في ظروف الضغط والحرارة.

III- عوامل التحول
1- الظروف التجريبية

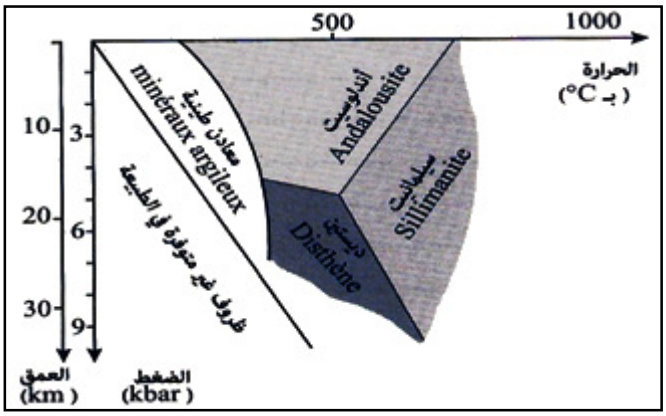


❖ قام Daubrée بإخضاع خليط من الطين وصفائح من الميكا لضغط مرتفع داخل أسطوانة بواسطة مكبس.
وتمثل الوثيقة جانبه النتائج المحصل عليها.
حلل هذه المعطيات.

فلاحظ ظهور شيستية على مستوى الطين المتدفق من الثقب المستطيل. تكون هذه الشيستية متعامدة مع اتجاه قوى الضغط كما أن صفائح الميكا تتصفف في اتجاه الشيستية.

❖ قام Winkler خلال هذه التجربة بإخضاع صخور طينية لضغط ثابت 2 Kbar مع ارتفاع تدريجي لدرجة الحرارة.
وتمثل الوثيقة جانبه النتائج المحصل عليها.
حلل هذه المعطيات.

نلاحظ اختلاف التركيب العيداني بين الصخور في بداية التجربة ونهاية التجربة. مما يدل على أن الحرارة المرتفعة أحدثت تغيرا نهائيا في التركيب العيداني لهذه الصخور، دون حدوث انصهار



❖ تمت دراسة معادن **سيليكات الألومين** (أندلوسيت ـ سيليمانيت ـ ديستين وهي معادن مميزة للصخور المتحولة) حسب درجة حرارة و ضغط ظهورها فتم الحصول على النتائج الممثلة في الوثيقة جانبه.
حلل هذه المعطيات.

يتبين أن لكل معدن ظروف حرارة و ضغط يكون خلالها في حالة استقرار.
ظروف استقرار كل معدن تشكل ما يسمى مجال استقرار المعدن. تغير هذه الظروف يؤدي إلى تحول المعدن إلى معدن آخر دون حدوث انصهار.

حدد مجال استقرار كل معدن من المعادن الثلاثة.

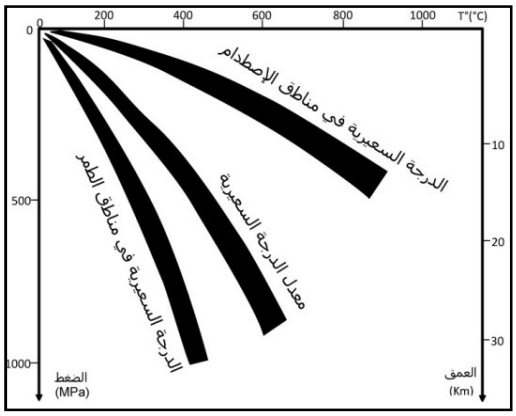
- يتشكل الأندلوسيت في درجات حرارة منخفضة و ضغط منخفض.
- يتشكل الدستين في درجات حرارة منخفضة و ضغط مرتفع.
- يتشكل السيليمانيت في درجات حرارة مرتفعة.

اعتمادا على المعطيات التجريبية السابقة، صغ تعريفا لظاهرة التحول.

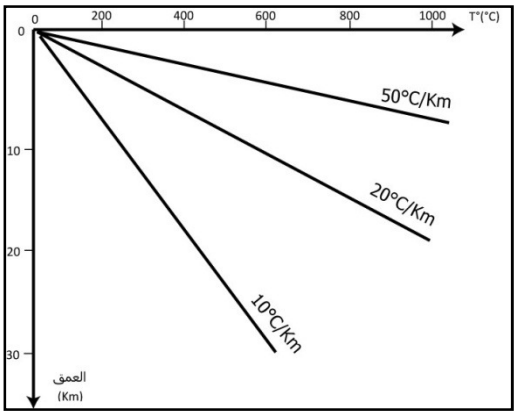
2- تغير الحرارة و الضغط في الطبيعة

تمثل الوثائق جانبه تغيرات الحرارة و الضغط كما تمثل الوثيقتين 5 و 6 صفحة 189 من ك.م تأثير الضغط الجزئي للماء وثاني أوكسيد الكربون في تفاعلات التحول.

بعد تحليلك لهذه المعطيات، صف تغير عاملي الضغط و الحرار في الطبيعة و تأثيرهما على الصخور.



تغير درجة الحرارة في مناطق الطمر والإصطدام.



تغير درجة الحرارة حسب العمق في مناطق مختلفة من الغلاف الصخري.

- تزداد درجة الحرارة مع العمق في باطن الأرض و تكون هذه الزيادة ما يسمى الدرجة السعيرية.
- تتغير الحرارة في العمق حسب التركيب الداخلي للأرض، وتوصيلية الصخور للحرارة.
- تتغير درجة الحرارة أيضا حسب الإطار الدينامي للمنطقة، إذ تكون منخفضة عن المعدل في مناطق الطمر، ومرتفعة عن المعدل في مناطق الإصطدام. بصفة عامة تكون الحرارة منخفضة في المناطق المستقرة جيولوجيا وعالية في المناطق الناشطة جيولوجيا.
- يزداد الضغط مع زيادة العمق حيث أن الطبقات الصخرية في باطن الأرض تخضع لضغط مستمر، يتناسب مع كثافة الصخور التي تعلوها و يسمى هذا الضغط بضغط الغلاف الصخري و يؤدي إلى تحويل الصخور دون تشويهها.
بالإضافة إلى ضغط الغلاف الصخري، هناك الضغط التكتوني الذي تفرضه القوى التكتونية في مناطق تقارب الصفائح (مناطق الطمر والإصطدام) والذي يؤدي إلى تحول الصخور وتشوهها (طيات وفوالق).
يتغير الضغط أيضا حسب ضغط الموائع البيفرجية، وهي الموائع المتواجدة بين بلورات الصخور كالماء وثاني أوكسيد الكربون.

خلاصة:

يتحكم الضغط و الحرارة في التفاعلات المصاحبة للتحول: ظهور واختفاء معادن. تتحكم هذه العوامل أيضا في بنية الصخور (الشيستية والتوريق). يساهم ضغط الموائع البيفرجية (H_2O و CO_2) بدوره في التحول، حيث يرتفع التحول كلما انخفض ضغط هذه الموائع في الصخرة.

IV- التغيرات البتروغرافية المصاحبة للتحول: السلسلة التحولية

1- المعدن المؤشر

الصخور	التفاعلات	المعادن المؤشرة	
ميكاشيست ذو موسكوفيت	كلوريت+موسكوفيت	كلوريت و موسكوفيت	تحول متزايد -->
ميكاشيست ذو نوعين من الميكا	بجادي+بيوتيت	موسكوفيت متبقي	
غنايس ذو نوعين من الميكا	مرو+موسكوفيت	بيوتيت (اختفاء الكلوريت)	
غنايس ذو بيوتيت	سليمانيت+أرتوز سليمانيت+مرو+بيوتيت	بيوتيت و سليمانيت	
غنايس أبيض	كورديريت+مرو	اختفاء البيوتيت	

متتاليات تحولية	الصخرة الأصل	طبيعتها الكيميائية	الصخور المتحولة المنحدرة منها

متتالية الطينية	طين	سيليسية ألومينية	شيست - ميكاشيست - غنايس
متتالية رملية	حجر رملي	سيليسية	مرويت
متتالية كربوناتية	كلس	كلسية	رخام (كالكاشيست)
متتالية كربونية	فحم حجري	كربونية	غرافيت (ذرات الكربون تشكل وريقات) ماس (ذرات الكربون على شكل رباعيات الأوجه)

حسب ظروف الضغط ودرجة الحرارة تتم إعادة تنظيم الشبكة البلورية للمعادن فتظهر معادن معينة وتختفي أخرى. يمثل الجدول رقم 1 تعاقب ظهور واختفاء المعادن المؤشرة في متتالية تحولية طينية.كما يمثل الجدول رقم 2 مميزات مجموعة من المتتاليات التحولية.

الجدول 2 ←

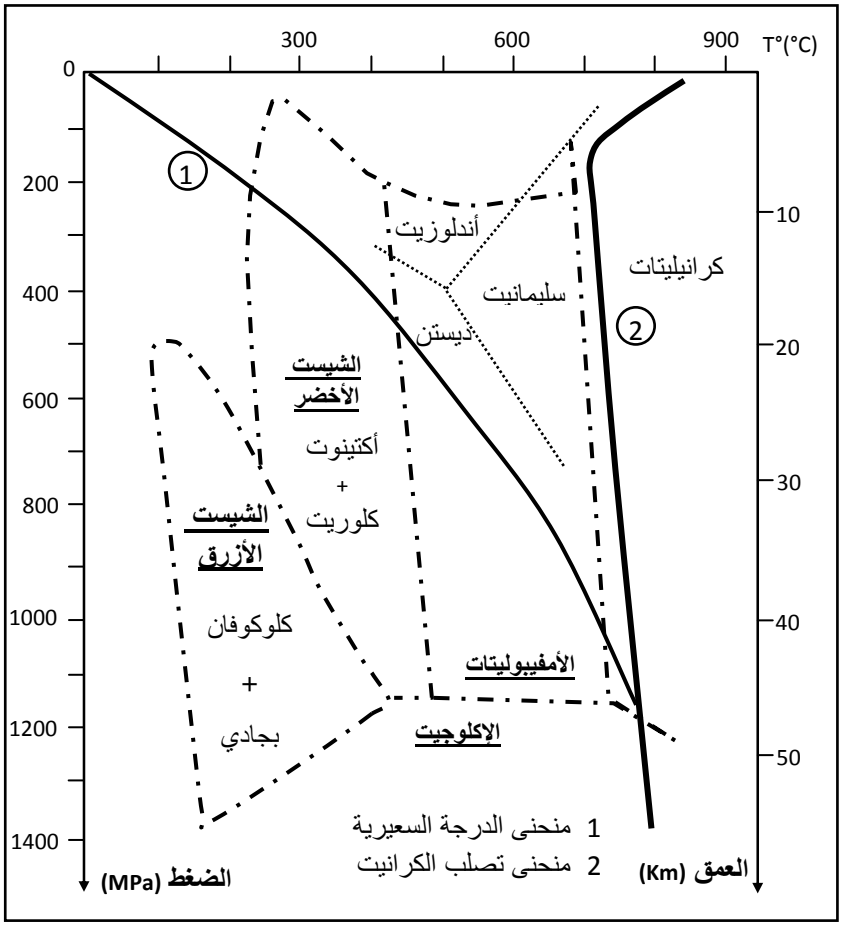
1- أعط تقييما لدرجة التحول واستخرج مفهوم المتتالية التحولية الطينية؟

المتتالية التحولية هي مجموعة من الصخور المتحولة المنحدرة من نفس الصخرة الأصلية والتي خضعت لدرجات تحول متصاعدة.
مثال 1 المتتالية التحولية الطينية: طين- شيست- ميكاشيست- غنايس.
إذن شيست، ميكاشيست، غنايس صخور متحولة منحدرة من نفس الصخرة الأصلية: الطين.
مثال 2 المتتالية التحولية الكربونية: الفحم الحجري- كرافيت – الماس.

2- لماذا تختفي معادن وتظهر معادن جديدة عند الإنتقال من صخرة لأخرى؟

2- سحنة التحول

يصعب تصنيف الصخور المتحولة وتقييم درجة تحولها نظرا لتنوع مصادرها واختلاف ظروف تكونها. من بين محاولات التصنيف تلك التي تعتمد على سحنات التحول و هي ممثلة في الوثيقة جانبه.
اعتمادا على تحليل الوثيقة و المعطيات السابق، استخرج تعريف سحنة التحول و السلسلة التحولية.



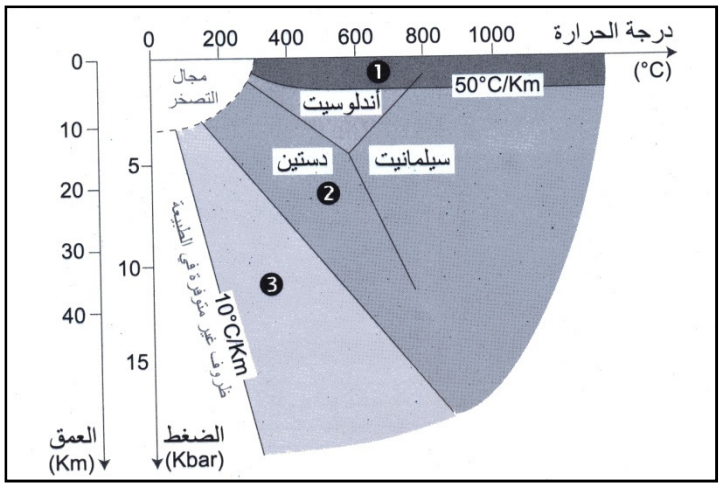
- تعرف **سحنة التحول بمجموعة من المعادن التي تستقر وتميز مجالا معينا من الضغط والحرارة**.
يمكن مفهوم سحنة التحول من تجميع صخور تعرضت لظروف ضغط و حرارة معينة، بغض النظر عن تركيبها الكيميائي.
أمثلة لسحنات تحول: سحنة الشيست الأخضر، سحنة الشيست الأزرق، سحنة الإكلوجيت.
- تشكل سحنات التحول المتتالية بالنسبة لصخرة معينة بعد تغيير ظروف

مثال السلسلة التحولية لصخرة الطين:
طين- شيست أخضر- أمفيبوليت- ميكماتيت- كرانيت أناتيكتي

خلاصة:

- المعدن المؤشر: هو كل معدن يمكن وجوده في صخرة متحولة من معرفة ظروف الضغط والحرارة التي تشكلت فيها هذه الصخرة. تعتبر سيليكات الألومين (أندلوسيت، سيليمانيت، ديستان) من أهم المعادن المؤشرة المعتمدة في تحديد مجالات الضغط والحرارة السائدة خلال تكون الصخور المتحولة.
- المتتالية التحولية: مجموعة من الصخور المتحولة المنحدرة من نفس الصخرة الأصلية والتي خضعت لدرجات تحول متصاعدة (ما يهم في مفهوم المتتالية التحولية هو أن لكل الصخور نفس التركيب الكيميائي لأنها تنحدر جميعها من نفس الصخرة الأصلية).
- سحنة التحول: مجموعة من المعادن التي تستقر وتميز مجالا معينا من الضغط والحرارة (ما يهم في مفهوم سحنة التحول ليس التركيب الكيميائي للصخور وإنما ظروف الضغط والحرارة المتماثلة التي تشكلت فيها هذه الصخور، فكل سحنة تقابل مجالا معينا من الضغط والحرارة).
- السلسلة التحولية: هي مجموع السحنات التحولية بالنسبة لصخرة معينة تعرضت لتغير في ظروف الضغط والحرارة.

٧- أنواع التحول (الديناميّ و الحراري)



تمثل الوثيقة جانبه أنماط التحول حسب أهمية كل من الضغط ودرجة الحرارة.
استخرج مختلف أنواع التحول محددا العامل أو العوامل الرئيسة المسؤولة عن كل نوع.
تحول دينامي ناتج عن تأثير ضغط جد مرتفع.
تحول حراري ناتج عن تأثير درجة حرارة مرتفعة جدا.
تحول دينامي حراري ناتج عن ارتفاع في درجة الضغط والحرارة.

اعتمادا على ما سبق و مستعينا بمعطيات الوثيقتين 5 و 6 صفحة 193 من ك.م استخرج نوع التحول الذي يحدث في منطقتي الطمر و الاصطدام.

× مناطق الطمر:

تتميز مناطق الطمر بضغط جد مرتفع ودرجة حرارة سعيرية منخفضة، فينتج عن هذه الظروف تحول دينامي، يعرف أيضا باسم تحول الطمر.
تتحول صخور الغلاف الصخري المحيطي البازالت والغابرو حسب ارتفاع درجة التحول إلى شيست أخضر، شيست أزرق، إكلوجيت.
أثناء صعود الصهارة تتعرض الصخور المحيطة لإرتفاع مفاجئ في درجات الحرارة فيحدث تحول حراري يسمى أيضا بتحول التماس

× مناطق الاصطدام:

يعود التحول في مناطق الإصطدام إلى ارتفاع متزامن لدرجة الحرارة والضغط (ضغط القوى التكتونية وضغط الكتلة الصخرية): تحول دينامي حراري يسمى أيضا التحول الإقليمي أو التحول العام.

خلاصة

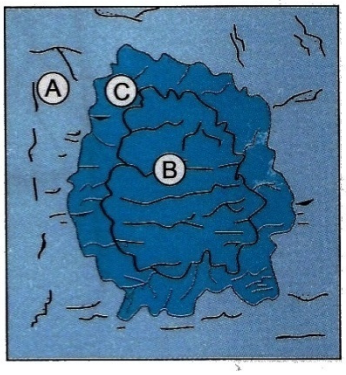
- حسب مجالات أهمية كل من عاملي الضغط ودرجة الحرارة، تختلف المميزات العيدانية والبنيوية للصخور المتحولة، حيث تتم إعادة تنظيم العناصر الكيميائية للصخرة لفسح المجال لظهور أنواع معدنية جديدة، في الحالة الصلبة، تبعا لدرجات التحول المتصاعدة.
- تمكن دراسة الصخور المتحولة من تعرف الظروف التي خضعت لها أثناء التحول، والتي يمكن تحديدها بواسطة المعادن المؤشرة وسحنات التحول.
- ترتبط أنماط التحول بدينامية الصفائح، إذ تختلف الظروف الجيوتكتونية السائدة من مكان لأخر، وبالتالي يختلف نمط التحول. يمكن تمييز ثلاث أنماط: التحول الدينامي (مناطق الطمر)، التحول الدينامي الحراري (مناطق الإصطدام)، تحول التماس (مناطق صعود الصهارة).

عمل منزلي

يمكن استغلال الملاحظات الميدانية و الملاحظات المجهرية (الصفيحة الدقيقة) للصخور المتحولة من معرفة ظروف الحرارة و الضغط الذي خدعت لها هذه الصخور و احتفظت بها على شكل "ذاكرة" نخزنة فب المجموعلت العيدانية الؤشرة (السحنات التحولية).

أ

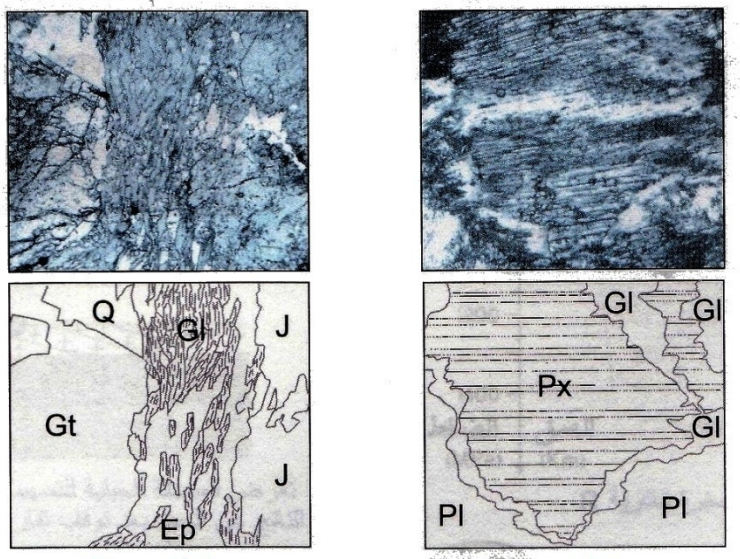
تمكن الملاحظة المجهرية للصفائح الدقيقة من تحديد تسلسل ظهور واختفاء المعادن المكونة للصخور المتحولة.



في هذا المثال يؤدي التفاعل الكيميائي بين المعدنين Ⓐ و Ⓑ ، تحت تأثير P وT، إلى ظهور معدن جديد Ⓒ .

أخذت الصورتان (1) و (2) لعينتان من صخرة غابرو متحول (ميتاغابرو) تنتمي لغلاف صخري محيطي قديم، وتتميز كل منهما بتركيب عيداني خاص.

Q : مرو
Pl : فلدسبات بلاجيوكلاز
Px : بيروكسين
J : جاديت
Ep : إبيدوت
Gl : كلوكوفان
Gt : بجادي

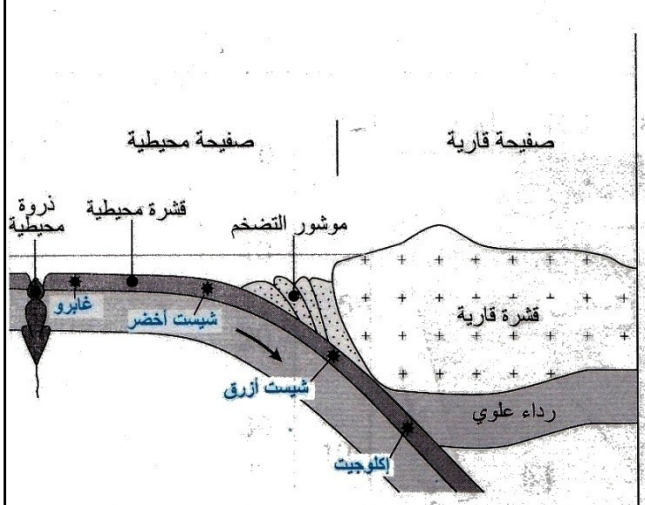


ميتاغابرو (1)

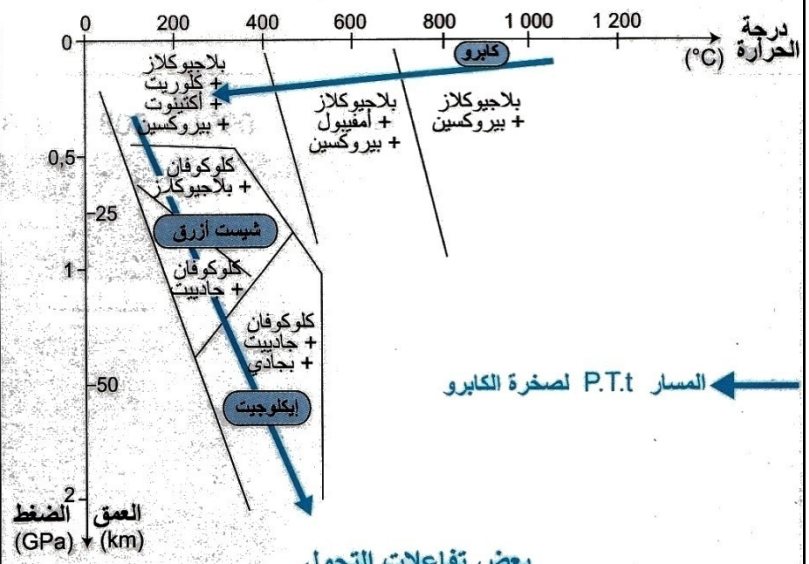
ميتاغابرو (2)

ب

تمكن الجيولوجيون من تحديد المسار P.T.t لصخرة الغابرو المدروسة واقترحوا النموذج جانبه لتفسير هذه النتائج.



نموذج تفسيري لظاهرة التحول المرافقة لسلاسل الطمر



بعض تفاعلات التحول

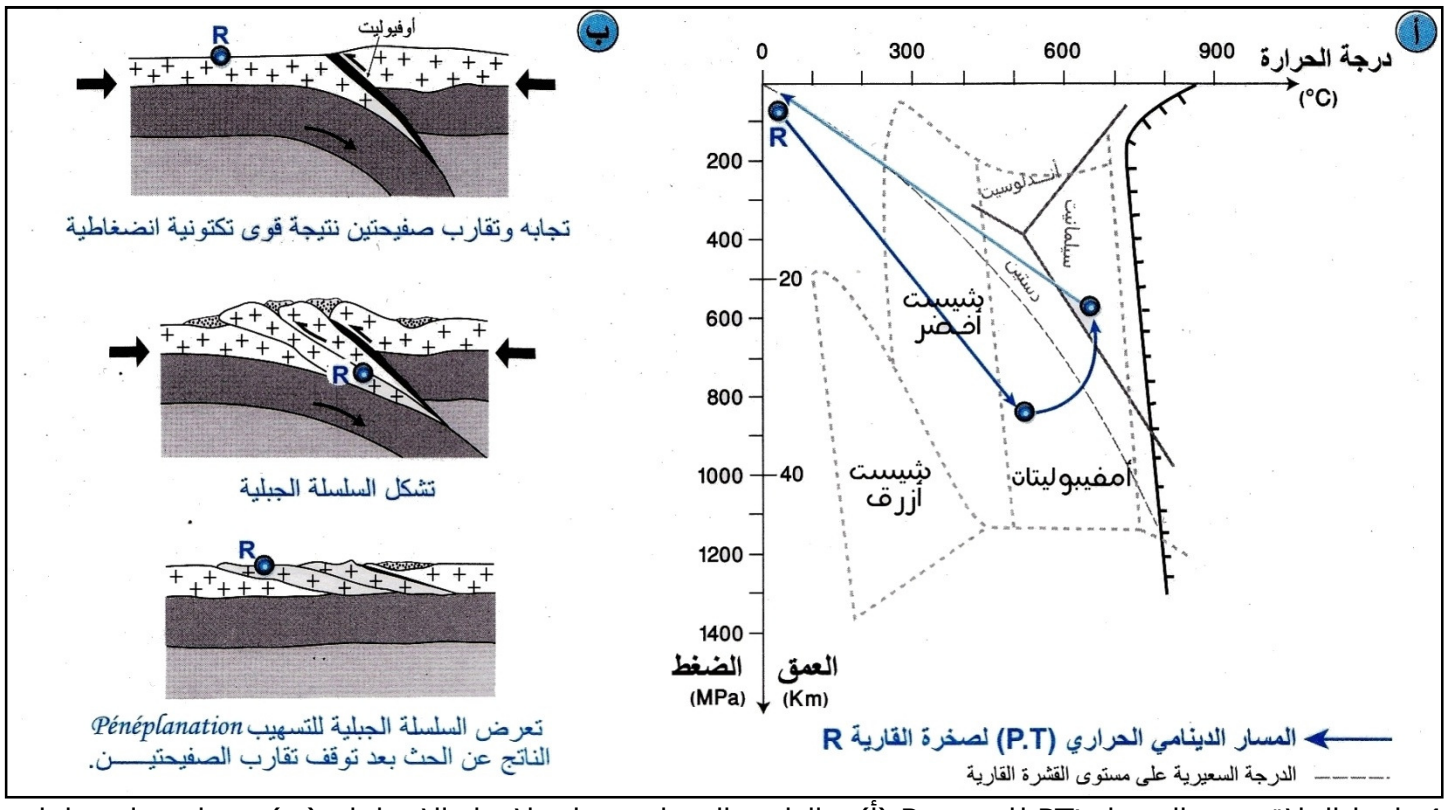
بلاجيوكلاز + بيروكسين + ماء ← أمفيبول
بلاجيوكلاز + أمفيبول + ماء ← كلوريت + أكتينوت
بلاجيوكلاز + أكتينوت + كلوريت ← كلوكوفان + ماء
بلاجيوكلاز + كلوكوفان ← بجادي + جاديت + ماء

1- حدد التحولات العيدانية بالنسبة لكل عينة من صخرتي الميتاغابرو (1) و (2) في الشكل -أ- مبرزا الظروف الدينامية الحرارية المسؤولة عن هذه التحولات و ذلك بالإعتماد على معطيات مبيان الشكل -ب-.

2- باستغلالك للنموذج التفسيري المقترح (الشكل -ب-) اعط تعليقا تبين من خلاله مراحل تطور صخرة الغابرو منذ نشأتها على مستوى الذروة المحيطية حتى طمرها تحت الغلاف الصخري القاري.

3- استخلص نمط التحول المرتبط بسلاسل الطمر.

لاسترداد التاريخ الجيولوجي لسلسلة اصطدام تم تتبع مصير صخرة R تنتمي لصفيحة قارية خلال تجابهها مع صفيحة قارية أخرى.



4- اربط العلاقة بين المسار PTt للصخرة R (أ) و التاريخ الجيولوجي لسلاسل الاصطدام (ب) مبرزا تغيرات عاملي الضغط و الحرارة.

5- استخلص نمط التحول المرتبط بسلاسل الاصطدام.

.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....
.....