

الفصل الثاني

التحول وعلاقته بدينامية الصخائمه

مقدمة:

تحت

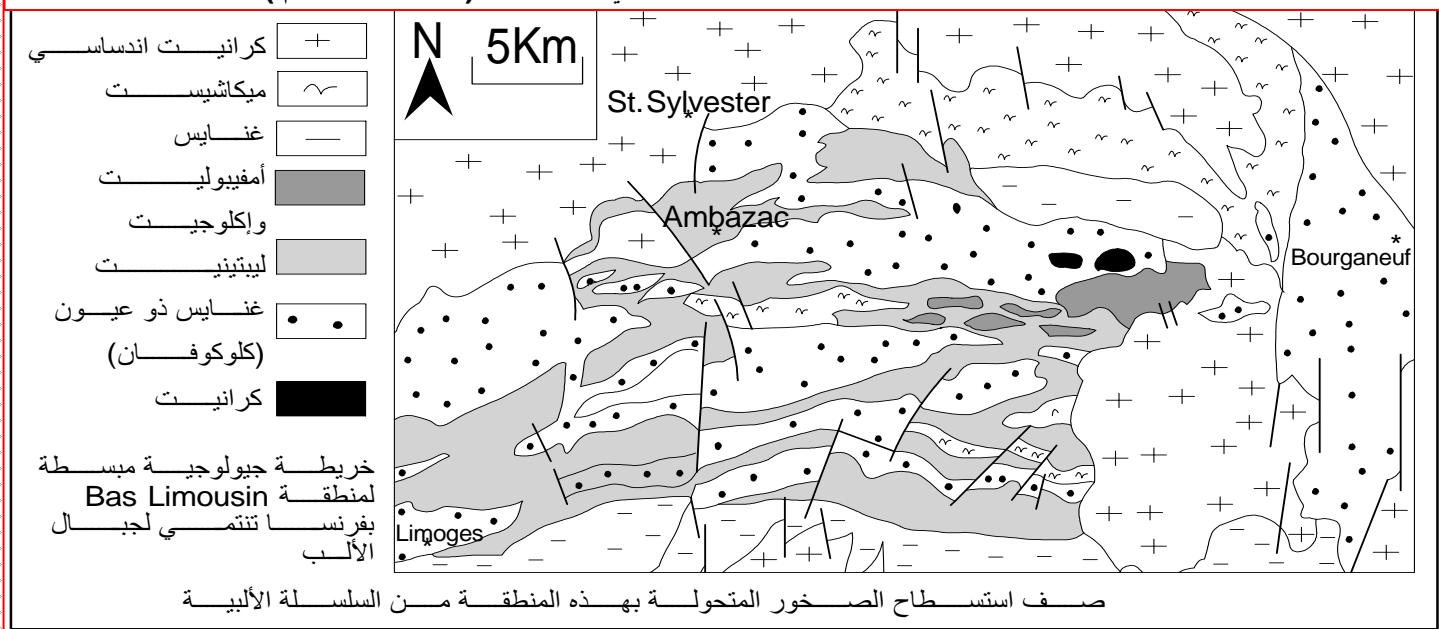
- تأثير تغير عوامل الضغط والحرارة خلال تشكيل السلسل الجبلية.
- فما هي **الخصائص البنوية والعيدانية** للصخور المتحولة المميزة لمناطق الطرmer والاصطدام؟
- ما هي ظروف التحول وما هي علاقتها بتكوينية الصفائح؟
- كيف يمكن للصخرة المتحولة أن تخترن ظروف تحولها؟

١ - الصخور المتحولة المنتشرة بسلسل الاصطدام.

① دراسة خريطة جيولوجية لمنطقة Bas Limousin بجبال الألب: وثيقة 1 لوحه 1.

اللوحة 1

الوثيقة 1: خريطة جيولوجية مبسطة لمنطقة Bas Limousin بفرنسا تنتمي لجبال الألب (سلسل الاصطدام).



بالإضافة إلى التشوّهات التكتونية، تتميز سلسل الألب الناتجة عن الاصطدام باستطاح صخور ذات تركيب عيداني مميز تسمى صخوراً متحولة (Roches métamorphiques): الميكاشيسست، الغنايس، الأمفيبولييت والليبيتينيت والتي تتدخّل مع الكرانيت.

② الخصائص البنوية والعيدانية والكيميائية للصخور المتحولة: وثيقة 2 لوحه 1.

التوريق:

بنية واضحة في بعض الصخور المتحولة حيث يضاف إلى الشيستية تمايز معين بين الأسرة ينتج عنه تكوين وريقات.

الشيستية:

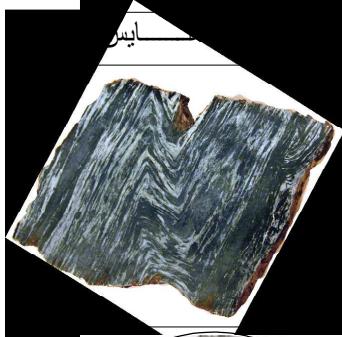
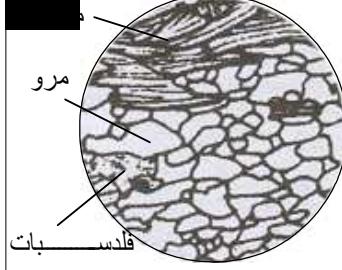
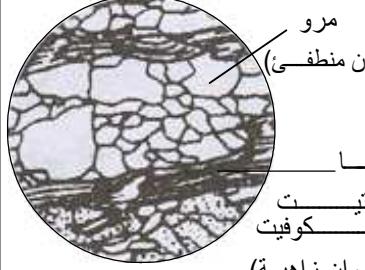
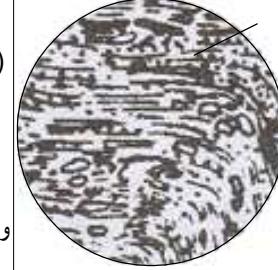
توريق أقل أو أكثر دقة تكتسبه للصخور المتحولة بفعل عامل الضغط، ويختلف عن التوريق كما يمكن أن يتجزأ إلى صفائح منتظمة.

التنضد:

هو نوع من التطبّق تبيّنه مكونات الصخرة وهو ناجم فقط عن ظاهرة التربّب.

اللوحة 2

الوثيقة 2 : تعرف بعض مميزات الصخور المتواجدة في مناطق الاصطدام.

الميكاشيس	الشيس	الأخضر	
			ملاحظة الصخرة بالعين المجردة
			ملاحظة فيحة الصدقة بالمجهز المقطب
تعاقب أسرة فاتحة مكونة من المرو والفلدسبات مع أسرة داكنة مكونة من البيوتيت	أسرة من المرو وأسرة من البيوتيت والموسكوفيت (اللون زاهية)	المعادن موجهة على شكل صفائح	وصف حالة المعادن
توريق (غير قابلة لانفصام)	توريق (سهلة الانفصام)	شيسية	البنية
مرق + بيوتيت فلدسبات أليمنيت بيجادي الألومين	مرق بيوتيت الألومين	معادن طينية (كلوريت) سيريسيت الألومين	التركيب العيداني
68,7	60,9%	60,2%	SiO ₂
16,2%	19,1%	20,9%	Al ₂ O ₃
4,1%	4,1%	3,7%	FeO
3%	3,7%	4,1%	K ₂ O

** فارن بين مميزات هذه الصخور ** تتشكل كل الصخور الطينية في نفسها الكبير من سيليكات الألومين. اقترح فرضية حول العلاقة بين هذه الصخور والصخور المتحولة.

★ نلاحظ أن العينات الصخرية تختلف من حيث البنية والتركيب العيداني:

- الشيس الأخضر: بنية شيسية ويتشكل من السيريسيت والكلوريت.
- الميكاشيس: بنية مورقة قابلة لانفصام، وتتشكل من البيوتيت والموسكوفيت والمرو.
- بنية مورقة غير قابلة لانفصام، وتتشكل من الميكا والمرو والفلدسبات.

فعد الانتقال من الشيس إلى الميكاشيس إلى الغايس:

- ترداد بنية الصخور تعقيدا: من التضدد إلى الشيسية إلى التوريق.
- تخفي بعض المعادن وتظهر أخرى.
- تتشكل هذه الصخور من نفس العناصر الكيميائية لكن بنسب مختلفة.

★ تتميز هذه الصخور المتحولة (شيس، ميكاشيس، وغايس) بوجود أو غياب بعض المعادن مع أن لها نفس التركيب الكيميائي العام.

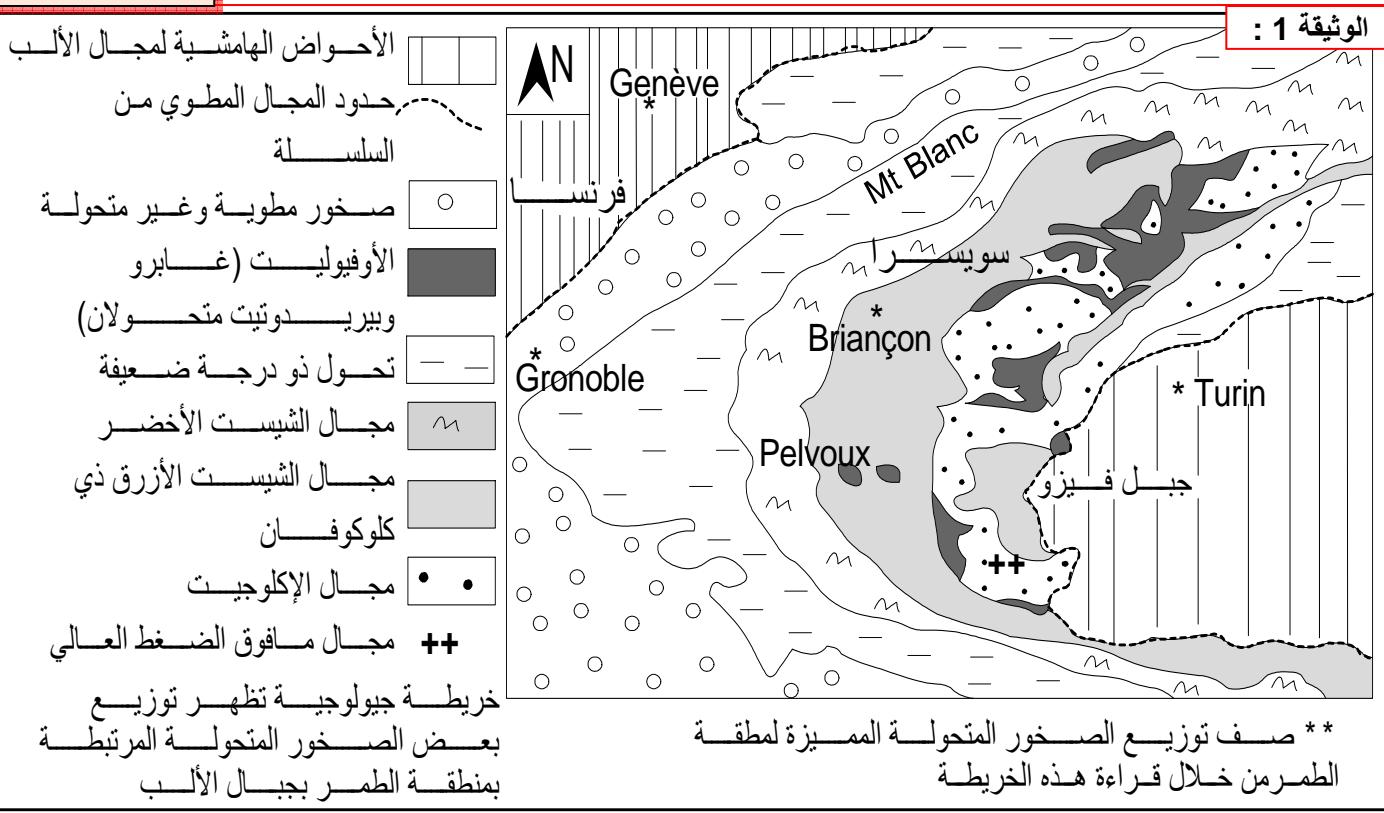
إن أهم المعادن المكونة لهذه الصخور المتحولة هي عبارة عن سيليكات الألومين. إذا علمنا أن الصخور الطينية تتشكل أساساً من سيليكات الألومين، يمكن افتراض أن العينات المدرستة هي ناتجة عن تحول صخور طينية.

II - الصخور المتحولة المنتشرة بسلال الطمر.

① استطاح بعض الصخور المتحولة الشاهدة عن طمر قديم: وثيقة 1 لوحه 2.

اللوحة 2

الوثيقة 1 :



تتميز مناطق الطمر الحالية بظروف ملائمة لتشكل الصخور المتحولة، إلا أنه يصعب ملاحظتها ودراستها لوجودها في الأعماق، لذلك يتم اللجوء إلى دراسة الصخور المستسخنة بمناطق الطمر القديمة.

تبز الخريطة تمنطقاً في توزيع الصخور المتحولة حيث ننتقل تدريجياً من مجال الشيست الأخضر نحو مجال الشيست الأزرق ثم إلى مجال الإكلوجيتات المتداخلة مع الأوفولييت.

ان وجود الإكلوجيت المميز بمعدني البجادي Jadeite والجادبيت Grenat (كلينوبيروكسسين صودي)، والتي تتشكل في ظروف ضغط عالية، لشاهد على حدوث طمر سابق لسلال الاصطدام.

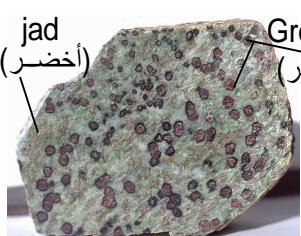
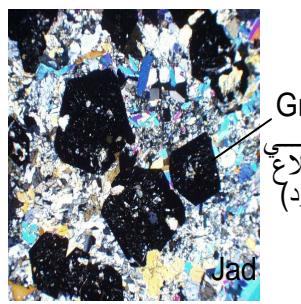
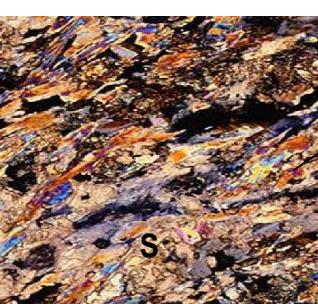
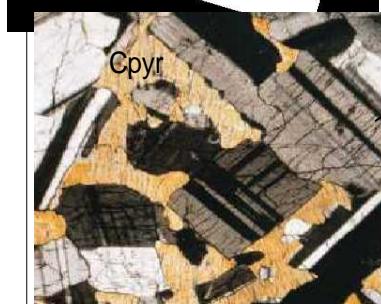
② خصائص الصخور المتحولة لمناطق الطمر: وثيقة 2 لوحه 2.

★ رغم اختلاف بنيتها وتركيبها العيداني، فإن لهذه الصخور نفس التركيب الكيميائي العام. إذن الصخور الروسوبية والبلورية لمنطقة الألب الفرنسي الإيطالي خضعت للتحول، ودرجة هذا التحول تختلف حسب المناطق.

★ تقيد هذه المعطيات بأن لهذه الصخور أصل مشترك حيث نتجت كلها عن تحول صخرة الكابرو. يتبيّن إذن أن تشكّل السلسلة الألبية كان مسبوقاً باحتفاء المحيط الألبي نتيجة طمر صفيحة صخرية تحت أخرى، وانتهت القارantan المحمولتان على هاتين الصفيحتين بالاصطدام، وهي ظروف ملائمة لتكون صخور متحولة.

اللوحة 2

الوثيقة 2 : تعرف بعض مميزات الصخور المتحولة المنتشرة بجبال الألب والمرتبطة بظاهرة الطرمر.

الإكلوجيست ذات بيجادي وجادبيت  <p>jad (أخضر) Grenat (أحمر)</p>	الشيسست الأزرق ذي كلوكوفان وإبيدوت  <p>Glaucophane (أزرق) Epidote (داكن)</p>	الغابرو الأفيوليتي  <p>Cpx (داكن) Plag (فات) Cpx (داكن)</p>	ملاحظة الصخرة بالعين المجردة														
 <p>Grenat (سوداء) Jad</p>	 <p>Glaucophane (Blauw) Epidote (Braun) Sapphirine (Gelb)</p>	 <p>Hornblende (Schwarze Kristalle) Plagioclase (Weisse Kristalle)</p>	ملاحظة الصخرة في المicroscope														
Grenat : بيجادي Jad : جادبيت جاديوبيروكس : (كلينيوبيروكسين)	Glau : كلوكوفان Epi : إبيدوت Sp : سبينيل	Cpx : كلينوبيروكسسين Plag : بلجيوكلاز	 التركيب العيداني														
<table border="1"> <thead> <tr> <th>K₂O</th><th>Na₂O</th><th>CaO</th><th>FeO</th><th>MgO</th><th>Al₂O₃</th><th>SiO₂</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0,4%</td><td>2,2%</td><td>9,9%</td><td>11%</td><td>12,7%</td><td>14,2%</td><td>47,1%</td></tr> </tbody> </table>	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	0,4%	2,2%	9,9%	11%	12,7%	14,2%	47,1%	لهذه الصخور نفس التركيب الكيميائي المبين في الجدول جانبه	التركيب الكيميائي	
K ₂ O	Na ₂ O	CaO	FeO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂											
0,4%	2,2%	9,9%	11%	12,7%	14,2%	47,1%											

* قارن بين مميزات هذه الصخور.
** ما المعلومات الإضافية التي يمكن استخلاصها من وجود الغابرو الأفيوليتي بهذه المنطقة وما علاقته بالصخور المتحولة المجاورة له؟

III - عوامل التحول.

تنتج الصخور المتحولة عن تحول في الحالة الصلبة لصخور سابقة الوجود، تحت تأثير عوامل الضغط والحرارة.

① تجارب الكشف عن ظروف التحول:

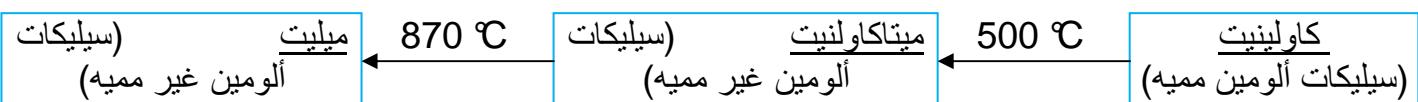
a - تأثير الضغط: تجربة Daubrée أنظر الشكل أ وثيقة 1 لوحة 3.

يلاحظ ظهور شيشية على مستوى الطين المتذبذب من ثقوب الاسطوانة، وتكون متعمدة مع اتجاه قوة الضغط. كما أن صفائح الميكا تصف في اتجاه الشيشية.

ب - تأثير الحرارة:

a - تجربة طهي الاجور:

بعد تسلیط درجة حرارة مرتفعة على عجين الطين يتم الحصول على اجور يفقد خلاله الطين لدونته حتى لو أضفنا إليه الماء من جديد، و هذا يعني أن الحرارة المرتفعة أحدثت تغيرا نهائيا في خصائصه دون حدوث الانصهار، و تبين التفاعلات التالية بعض التحولات العيدانية خلال هذه الظاهرة:



b - تجربة Winkler: أنظر الشكل ب وثيقة 1 لوحه 3.

يتبيّن من خلال هذه التجارب أنه عند ارتفاع درجة الحرارة تخضع الصخرة الصلبة لغيرات عيدانية حيث تظهر معادن و تختفي أخرى. إذن فالحرارة مسؤولة عن هذه التغيرات في الحالة الصلبة.

ج - تأثير الحرارة والضغط: تجربة Richardson ومساعدوه أنظر الشكل ج وثيقة 1 لوحه 3.

يتبيّن من معطيات التجربة إن لكل معدن ظروف حرارة وضغط يكون خاللها في حالة استقرار، حيث أن تغيير هذه الظروف يؤدي إلى تحوله إلى معدن آخر. وظروف استقرار كل معدن تشكّل ما يسمى مجال استقرار المعدن.

مثلاً عند مرور صخرة من الظروف A إلى الظروف B، يظهر أولاً معدن الديستين، ومع تزايد درجات الحرارة يختفي الديستين ويظهر السيلمانيت.

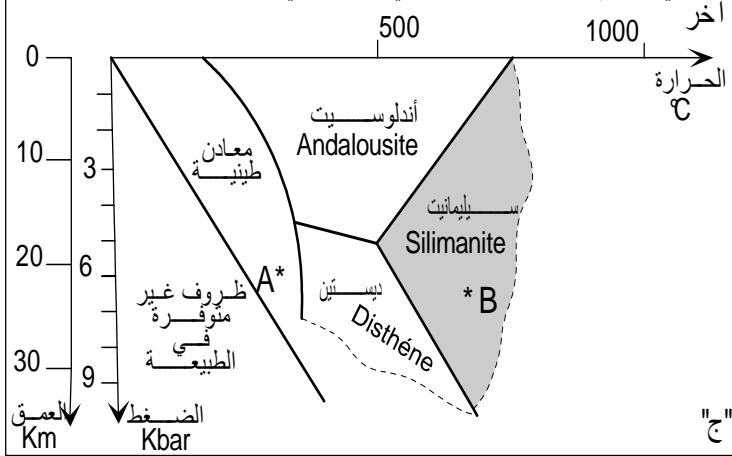
إن تواجد معدن معين من هذه المعادن في صخرة ما، يشهد على ظروف معينة للضغط والحرارة، خضعت لها الصخرة (تواجد الديستين مثلاً \rightarrow ضغط مرتفع)، بذلك تتعتّف هذه المعادن بالمعادن المؤشرة.

اللوحة 3

الوثيقة 1 : معطيات تجريبية

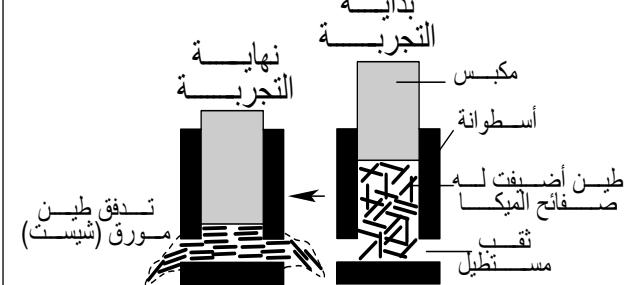
تأثير الضغط والحرارة: تجربة Richardson ومساعدوه
أضاء هؤلاء الباحثون عينات من خليط سيلكات الألومين لدرجة حرارة وضغط مرتفعين ومتغيرين فاستطاعوا تحديد مجال استقرار المعادن الثلاث: الأنجلوسيلمانيت الديستين والسيلمانيت

تمثل الخطوط المستقيمة حدود مجال استقرار كل معدن ويعبر الخط الفاصل بين مجالين عن الظروف اللازمة لكي يتم التفاعل العيادي وبالتالي تحول معدن إلى آخر



** حل نتائج تجارب الشكل "أ" و "ب" وحدد عوامل التحول
** اعط التفاعل العيادي الذي يمكن أن يحصل عند مرور صخرة من الظروف A إلى B مثلاً (بيان الشكل ج).
** فيم يمكن أن يفيد تواجد معدن من معادن سيلكات الألومين في صخرة معينة؟ بم يمكن نعت هذه المعادن؟

تأثير الضغط: تجربة Daubrée
أضاء الباحث Daubrée خليطاً من الطين وصفائح بليروية من الميكا لضغط عالٍ بواسطة مكبس داخل أسطوانة بقاعدتها قبوب مستطيلة الشكل يوضح الرسمأسفله معطيات ونتائج هذه التجربة.



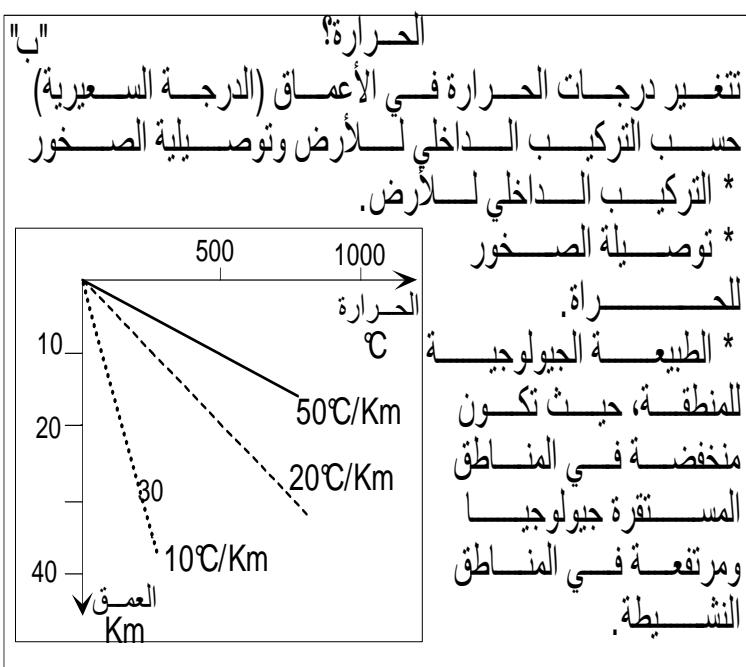
تأثير الحرارة: تجربة Winkler
أضاء صخوراً طينية لضغط ثابت: 2 كيلوبار مع ارتفاع تدريجي لدرجة الحرارة:
- عند 570°C: تظهر معادن جديدة مثل البيوتيت والأندلوسيت حسب التفاعل
- عند 700°C: يبدأ الانصهار الجزيئي فيصبح الوسط مكوناً من جزأين: جزء صلب يضم البيوتيت والسيلمانيت وجزء سائل.

② ظروف التحول في الطبيعة:

اللوحة 3

أ - الضغط: أنظر الشكل أ وثيقة 2 لوحدة 3.

الوثيقة 2 : ظروف التحول في الطبيعة



الحرارة؟
تتغير درجات الحرارة في الأعماق (الدرجة السعيرية)
حسب التركيب الداخلي للأرض وتوصيلية الصخور
*** التركيب الداخلي للأرض.**
*** توصيلية الصخور**
الحرارة.
*** الطبيعة الجيولوجية**
للمجموعة، حيث تكون
منخفضة في المناطق
المستقرة جيولوجيا
ومرتفعة في المناطق
النشطة.

الضغط؟
** **الضغط التكتوني:** الناجم عن القوى
التكتونية في المناطق الغير المستقرة
*** الضغط الصخري:** $P = \frac{\text{وزن العمود}}{\text{مساحة قاعدته}}$

وبذلك تخضع المواد في باطن الأرض لضغط
تناسب درجة مع العمق وكثافة الصخور
*** الضغط الجزيئي للموائع البيفرجية**
تضم الصخور بين بدورانها بعض الموائع
(H_2O و CO_2) تسبب في ضغط إضافي
يسمي الضغط الجزيئي للموائع.

تخضع الصخور في الطبيعة للتغير الضغط حسب:

- **الضغط التكتوني:** ناتج عن الحركات التكتونية.
- **الضغط الصخري:** يزداد الضغط مع زيادة العمق، حيث أن الطبقات الصخرية في باطن الأرض تخضع لضغط مستمر يتناسب مع كثافة الصخور التي تعلوها. ويسمى هذا الضغط **بضغط الغلاف الصخري.**
- **ضغط الموائع:** يتمثل في الموائع البيفرجية المتواجدة في أعماق الأرض، كالماء وثنائي أكسيد الكربون، والتي تغير من ظروف التفاعلات.

أ - درجة الحرارة: أنظر الشكل ب وثيقة 2 لوحدة 3.

تزداد درجة الحرارة مع العمق في باطن الأرض، وتكون هذه الزيادة ما يسمى الدرجة السعيرية، وتتغير حسب التركيب الداخلي والطبيعة الجيولوجية للمجموعة.

IV - مفهوم المعدن المؤشر والسلسلة التحولية.

① مفهوم التحول والمعدن المؤشر: أنظر الشكل أ، ب، ج وثيقة 1 لوحدة 4.

- ★ **التحول:** هو مجموعة من التغيرات البنوية والعيadianية التي تطرأ على صخرة سابقة الوجود (رسوبية، صهارية أو متحولة)، في حالتها الصلبة، بفعل عامل الضغط أو الحرارة أو هما معا.
- ★ **معدن مؤشر:** معدن يظهر في ظروف جد محددة لدرجة الضغط والحرارة، وبذلك فتواجده في صخرة متحولة يمثل ذاكرة للظروف القصوى للضغط والحرارة التي وصلتها الصخرة، مثلاً تواجد البيجادي في الصخور المتحولة لمناطق الطرmer بعد شاهداً على تعرض هذه الأخيرة لضغط عال.
- ★ **متالية تحولية:** مجموعة من الصخور المتحولة المنحدرة من نفس الصخرة الأصلية التي خضعت لدرجات تحول متقدمة مثل المتالية الطينية تضم:

الطين (الأصل) ← الشيست ← الميكاشيريت ← الغايس.

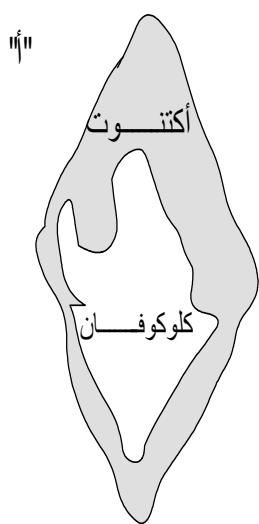
الأستاذ : يوسف الأندلسبي

الصفحة : - 230 -

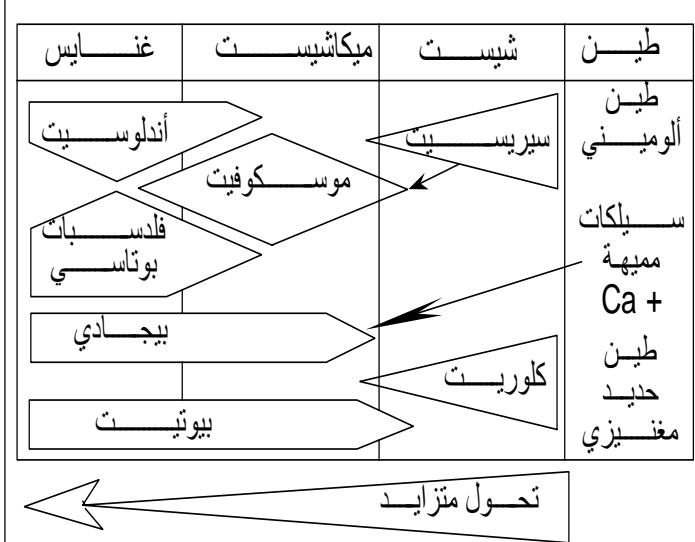
② مفهوم سحنة التحول والسلسلة التحولية: انظر الشكل د وثيقة 1 لوحه 4.

اللوحة 4

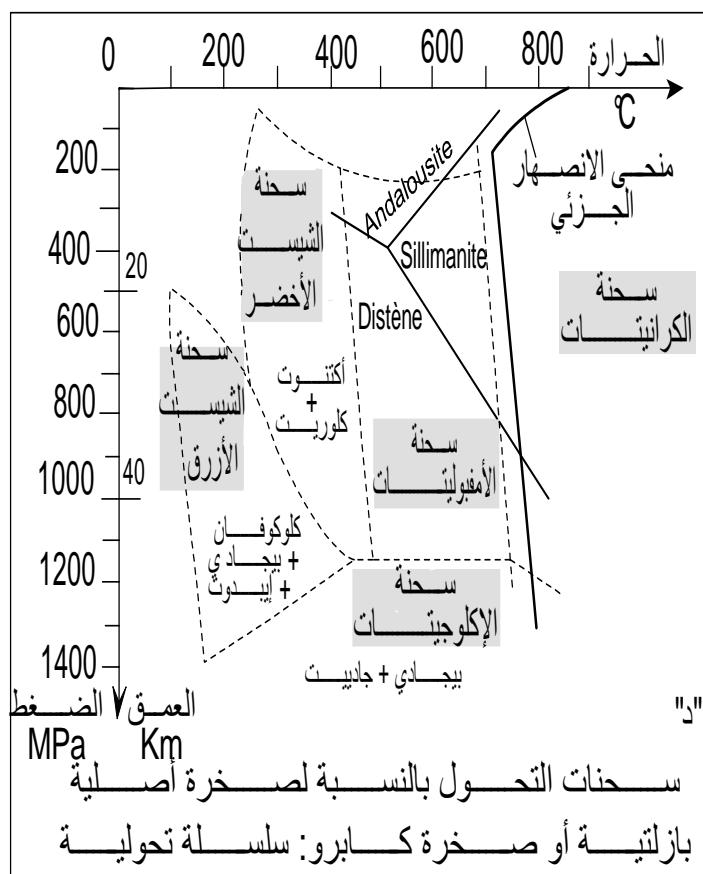
الوثيقة 1 : مفهوم المعدن المؤشر والمتالية التحولية.



صفيحة دقيقة لبازلت محيطي قديم تظهر تحول الكلوكوفان إلى أكتنوت (أمفول أحضر)



متالية تحولية لصخور طينية وتركيبها "ب" الكيميائي



الصخور	التعاقلات	المعادن المؤشرة
ميكاشيس نو	كلوريت + موس كوفيت	موسكوفيت
موس كوفيت	موس كوفيت + متبقي	ميكاشيس
دونوعين من الميكا	بيجادي + بيوتايت	دونوعين من الميكا
غنايس ذو نوعين من الميكا	بيوتايت + الكوريت	غنايس ذو الميكا
غنايس ذو سليمانيت + أرتوز	مرسو + موس كوفيت	سليمانيت + مرسو
غنايس ذو سليمانيت + مرسو + بيوتايت	بيوتايت + سليمانيت + إلماينيت	غنايس ذو إلماينيت
غنايس أبيض	كورديبريت + مرسو	كورديبريت

تحول متزايد

تغير التركيب العيادي حسب ظروف الضغط "ج" والحرارة

** معتمدًا على الأشكال "أ" ، "ب" و "ج" ، اعط تعريفاً دقيقاً لمفهوم التحول، المعدن المؤشر والمتالية التحولية

** معتمدًا على الشكل "د" ، اعط تعريفاً لسحنة التحول والسلسلة التحولية

★ **سحنة التحول:** حسب ظروف الضغط ودرجة الحرارة، تتعدد مجالات استقرار مجموعة معدنية معينة تسمى سحنة التحول. وكل صخرة سابقة الوجود خضعت لظروف تحول سحنة معينة، تظهر بها نفس المجموعة المعدنية المميزة لهذه السحنة، رغم اختلاف تركيبها.

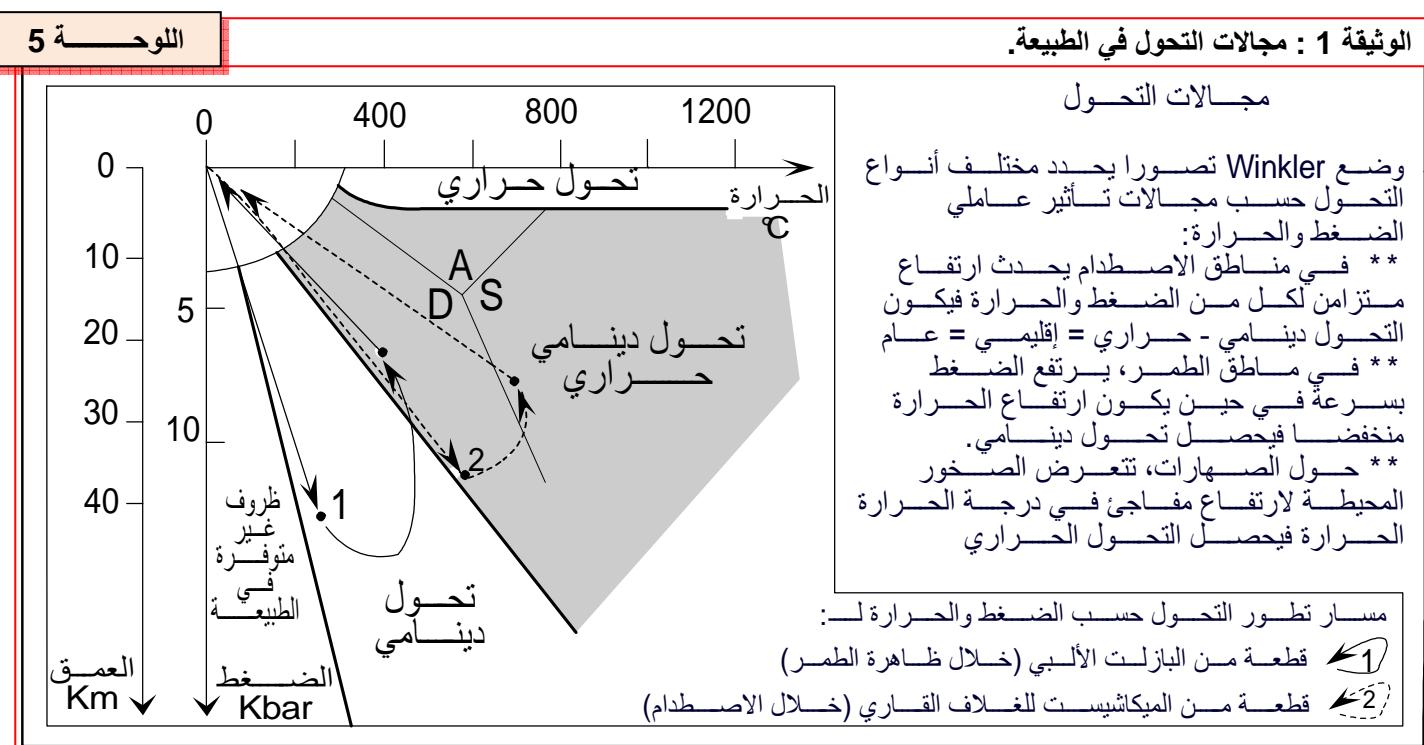
★ **سلسلة التحول:** هي متالية السحنات المميزة لصخرة أصلية معينة، وذلك حسب تغير ظروف الضغط ودرجات الحرارة. وتمكن من معرفة تطورات الضغط والحرارة التي خضعت لها الصخرة الأصلية في العمق.

③ خلاصة:

لتحديد التركيب العيادي لصخرة متحولة (شيشت، غنais...) ننجز صفيحة دقيقة لهذه الصخرة في المختبر، وبعد تحديد المعادن المتحولة، نتعرف على سحنة التحول والمتالية المنتسبة لها الصخرة ومن ثم نتعرف على الظروف التكتونية التي تشكلت فيها.

V - مفهوم التحول الدينامي والتحول الدينامي الحراري.

① مجالات التحول في الطبيعة: أنظر وثيقة 1 لوحة 5



يتبيّن من معطيات هذه الوثيقة أن تحول الصخور مرتبط بتغيير عامل الضغط والحرارة، وهذه الأخيرة ترتبط بدينامية الصفائح. وهكذا يمكن تحديد عدة مجالات للتحول: التحول الدينامي Dynamique والتحول الدينامي الحراري Thermo-dynamique والتحول الحراري Thermique.

② ظروف التحول في مناطق الاصطدام: أنظر وثيقة 2 لوحة 5.

في مناطق الاصطدام تخضع الصخور لارتفاع متزامن لكل من الضغط والحرارة نتيجة اصطدام صفيحتين قاريتين، فيحصل دينامي حراري (تحول إقليمي Métamorphisme régional).

③ ظروف التحول في مناطق الطرmer: أنظر وثيقة 3 لوحه 5.

في مناطق الطرمر تخضع الصخور المنغزرة لضغط عال، نتيجة طمر غلاف صخري محبيطي تحت الغلاف الصخري القاري، في حين يكون ارتفاع درجة الحرارة منخفضا، فيحصل تحول دينامي.

ملاحظة: أثناء صعود الصهارات، تتعرض الصخور المحبيطة بالغرفة الصهارية لارتفاع مفاجئ في درجات الحرارة، فيحصل بذلك تحول للصخور المحبيطة، يسمى بالتحول الحراري.

لوحة 5

الوثيقة 2 : ظروف التحول في مناطق الاصطدام.

تحول مناطق الاصطدام

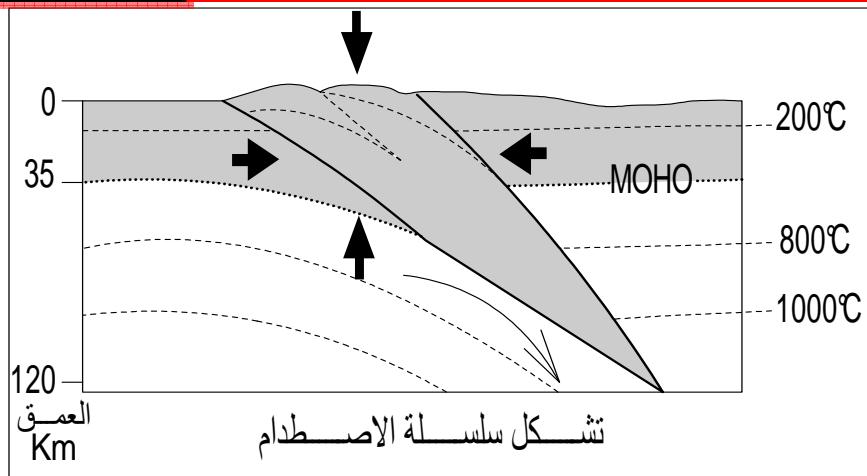
= تحول دينامي حراري

يعود التحول في مناطق الاصطدام إلى ارتفاع متزامن في درجة الحرارة والضغط.

ضغط الكتلة الصخرية

ضغط القوى التكتونية
الانضغاطية

توازن تضاغطي



لوحة 5

الوثيقة 3 : ظروف التحول في مناطق الطرmer.

تحول مناطق الطرmer

= تحول دينامي

ينغزز الغلاف الصخري المحبيطي تحت الغلاف الصخري القاري، فتتغير الظروف التي تخضع لها الصخور المنغزرة كارتفاع الكبير في الضغط.

قد يحدث أن تصعد صخور الشرة المحبيطة إلى الأعلى نتيجة ظروف جيولوجية مختلفة فيلاحظ تكون صخور جديدة تختلف عن تلك التي انغررت

