

الفصل الثاني

التحول وعلاقته بدينامية الصفائح

مقدمة:

الصخور المتحولة هي صخور ناتجة عن تحول في الحالة الصلبة لصخور سابقة الوجود، تحت

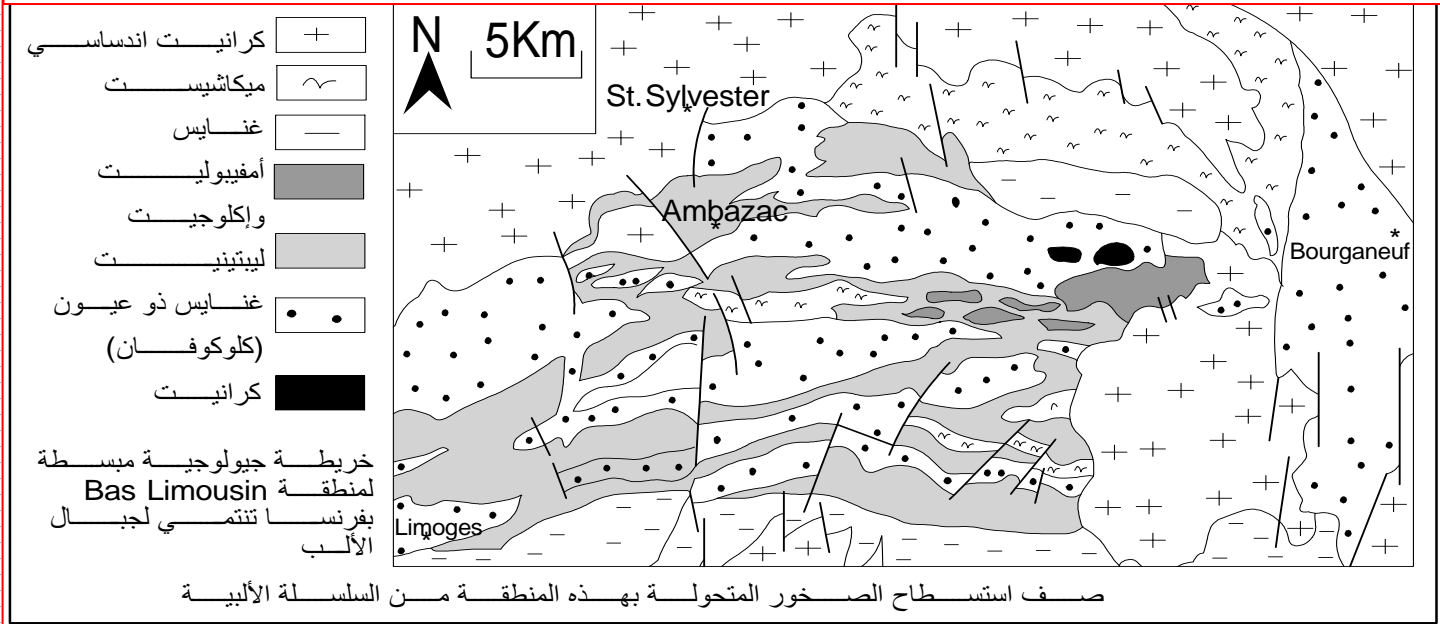
- تأثير تغير عوامل الضغط والحرارة خلال تشكل السلاسل الجبلية.
- فما هي الخصائص البنيوية والعيانية للصخور المتحولة المميزة لمناطق الطمر والاصطدام؟
- ما هي ظروف التحول وما هي علاقتها بتكتونية الصفائح؟
- كيف يمكن للصخرة المتحولة أن تحتزن ظروف تحولها؟

1 - الصخور المتحولة المنتشرة بسلاسل الاصطدام.

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

اللوحة 1

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



بالإضافة إلى التشوهات التكتونية، تتميز سلاسل الألب الناتجة عن الاصطدام باستسطاح صخور ذات تركيب عيداني مميز تسمى صخورا متحولة (Roches métamorphiques): الميكاشيست، الغنايس، الأمفيوليت والليبتينيت والتي تتداخل مع الكرانيت.

② الخصائص البنيوية والعيانية والكيميائية للصخور المتحولة: وثيقة 2 لوحة 1.

التوريق:

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

الشيسية:



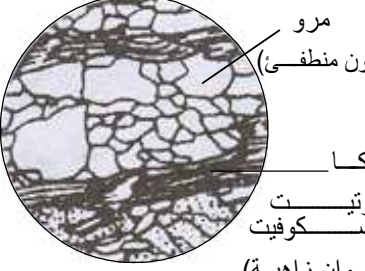

توريق أقل أو أكثر دقة تكتسبه للصخور المتحولة بفعل عامل الضغط، ويختلف عن التطبق كما يمكن أن يتجزأ إلى صفائح منتظمة.

التنضد:

هو نوع من التطبق تبينه مكونات الصخرة وهو ناجم فقط عن ظاهرة الترسيب.

اللوحة 2

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

الميكاشيست	الشيسيت الأخضر	ملاحظة الصخرة بالعين المجردة
		
		ملاحظة الصفيحة الدقيقة بالمجهر المستقطب
مرو (لون منطفي) ميكاشيست بيوتيت وموسكوفيت (ألوان زاهية)	سيريست (ألوان زاهية) + كلوريت (لون أخضر)	وصف حالة المعادن
توريق (سهولة الانقسام)	شيسيتية	البنية
مرو + بيوتيت فلدسبات بيجادي سليكات ألومين	مرو + بيوتيت بيجادي سليكات ألومين	التركيب العيداني
68,7	60,9%	60,2%
16,2%	19,1%	20,9%
4,1%	4,1%	3,7%
3%	3,7%	4,1%
		SiO ₂
		Al ₂ O ₃
		FeO
		K ₂ O

** قارن بين مميزات هذه الصخور
** تتشكل الصخور الطينية في قسمها الكبير من سيلكات الألومين. اقترح فرضية حول العلاقة بين هذه الصخور والصخور المتحولة.

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

- الشيسيت الأخضر: بنية شيسيتية ويتشكل من السيريست والكلوريت.
- الميكاشيست: بنية مورقة قابلة للانقسام، وتتشكل من البيوتيت والموسكوفيت والمرو.
- بنية مورقة غير قابلة للانقسام، وتتشكل من الميكاشيست والمرو والفيلدسبات.

فعند الانتقال من الشيسيت إلى الميكاشيست إلى الغنايس:

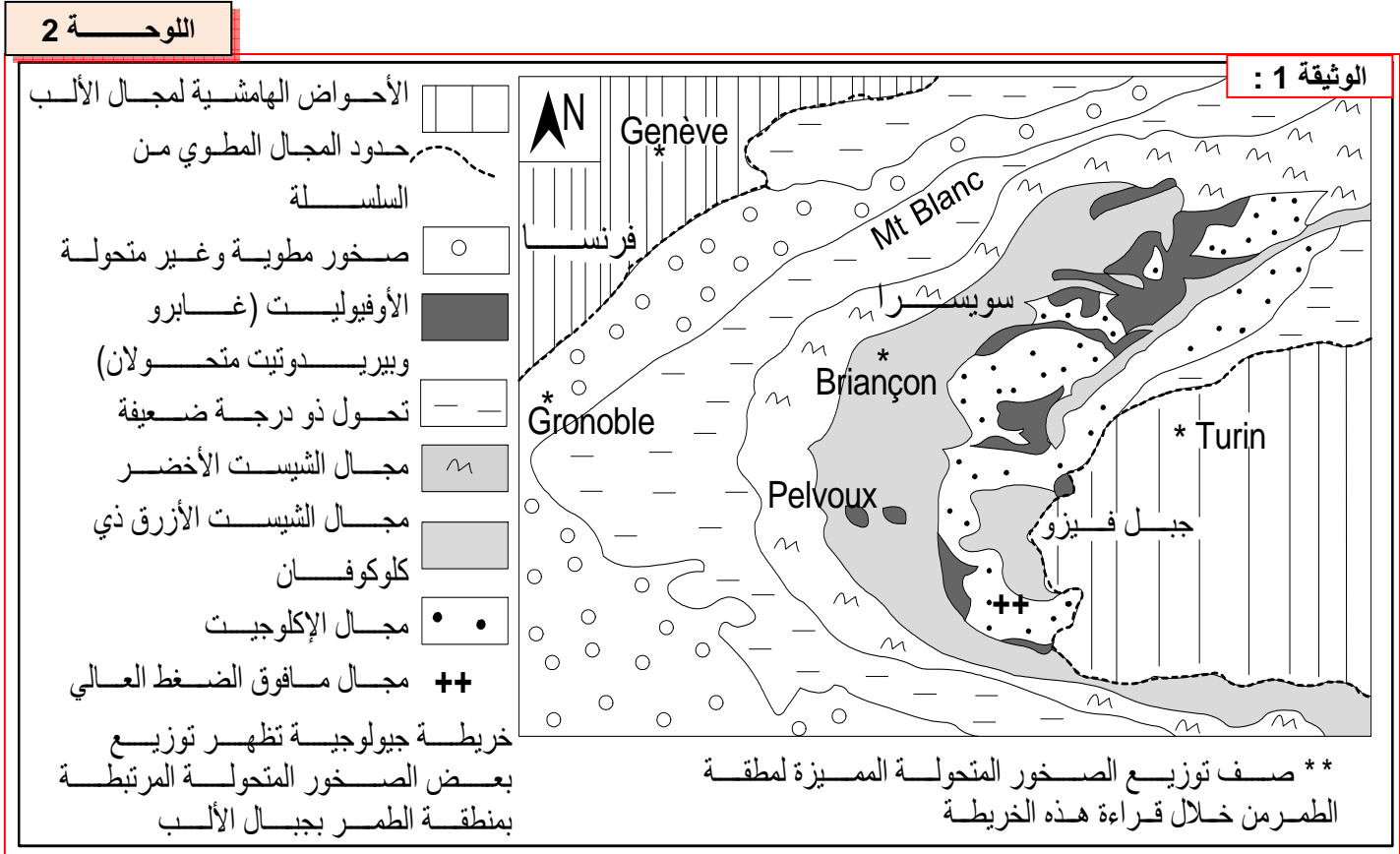
- تزداد بنية الصخور تعقيدا: من التندد إلى الشيسيتية إلى التوريق.
- تختفي بعض المعادن وتظهر أخرى.
- تتشكل هذه الصخور من نفس العناصر الكيميائية لكن بنسب مختلفة.

★ تتميز هذه الصخور المتحولة (شيسيت، ميكاشيست، وغنايس) بوجود أو غياب بعض المعادن مع أن لها نفس التركيب الكيميائي العام.

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

II - الصخور المتحولة المنتشرة بسلاسل الطمر.

① استسطاح بعض الصخور المتحولة الشاهدة عن طمر قديم: وثيقة 1 لوحة 2.



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

تبرز الخريطة لمنطقا في توزيع الصخور المتحولة حيث ننتقل تدريجيا من مجال الشيست الأخضر نحو مجال الشيست الأزرق ثم إلى مجال الإكلوجيتات المتداخلة مع الأوفيوليت.

ان وجود الاكلوجيت المتميز بمعدي البجادي Grenat والجادييت Jadeite (كلينوبيريوكسين صودي)، والتي تتشكل في ظروف ضغط عالية، لشاهد على حدوث طمر سابق لسلاسل الاصطدام.

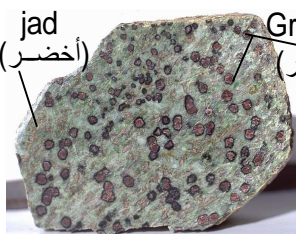


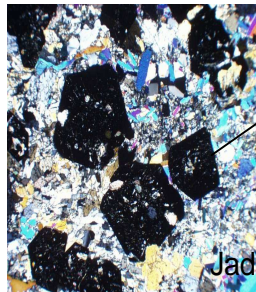

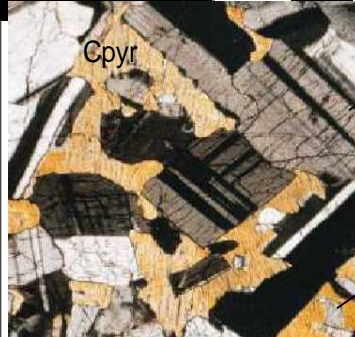
② خصائص الصخور المتحولة لمناطق الطمر: وثيقة 2 لوحة 2.

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

★ تفيد هذه المعطيات بأن لهذه الصخور أصل مشترك حيث نتجت كلها عن تحول صخرة الكابرو. يتبين إذن أن تشكل السلسلة الألبية كان مسبقا باختفاء المحيط الألبية نتيجة طمر صفيحة صخرية تحت أخرى، وانتهت القارتان 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 الطمر.

الإكلوجيت ذات بيجادي وجادييت	الشيسيت الأزرق ذي كلوكوفان وإبيدوت	الغابرو الأفيوليتي															
			<p>ملاحظة الصخرة بالعين المجردة</p>														
			<p>ملاحظة الصفحة الدقيقة بالمجهر المستقطب</p>														
<p>Grenat : بيجادي Jad : جادييت (=كلينوبيروكسين)</p>	<p>كلوكوفان : Glau إبيدوت : Epi سبينيل : Sp</p>	<p>كلينوبيروكسين : Cpyr بلاجيوكلاز : Plag</p>	<p>التركيب العيدي</p>														
<table> <tr> <td>K₂O</td> <td>Na₂O</td> <td>CaO</td> <td>FeO</td> <td>MgO</td> <td>Al₂O₃</td> <td>SiO₂</td> </tr> <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> </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%	<p>لهذه الصخور نفس التركيب الكيميائي المبين في الجدول جانبه</p>		
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%											
<p>التركيب الكيميائي</p>																	

** 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 عاملي الضغط والحرارة.

① تجارب الكشف عن ظروف التحول:

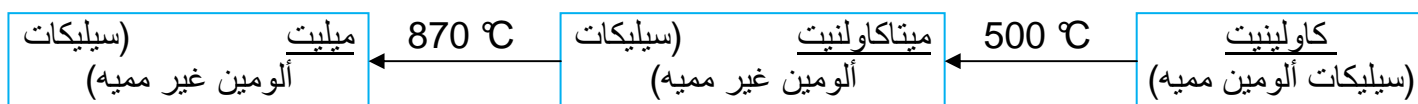
أ - تأثير الضغط: تجربة Daubrée أنظر الشكل أ وثيقة 1 لوحة 3.

يلاحظ ظهور شيسيتية على مستوى الطين المتدفق من ثقب الاسطوانة، وتكون متعامدة مع اتجاه قوة الضغط. كما أن صفائح الميكا تصفف في اتجاه الشيسيتية.

ب - تأثير الحرارة:

a - تجربة طهي الاجور:

بعد تسليط 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 لوحة 3.

يتبين من خلال هذه التجارب أنه عند ارتفاع درجة الحرارة تخضع الصخرة الصلبة لتغيرات عيانية 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 لوحة 3.

يتبين من معطيات التجربة إن لكل معدن ظروف حرارة وضغط يكون خلالها في حالة استقرار، حيث أن تغير هذه الظروف يؤدي إلى تحوله إلى معدن آخر. وظروف استقرار كل معدن تشكل ما يسمى مجال استقرار المعدن.

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

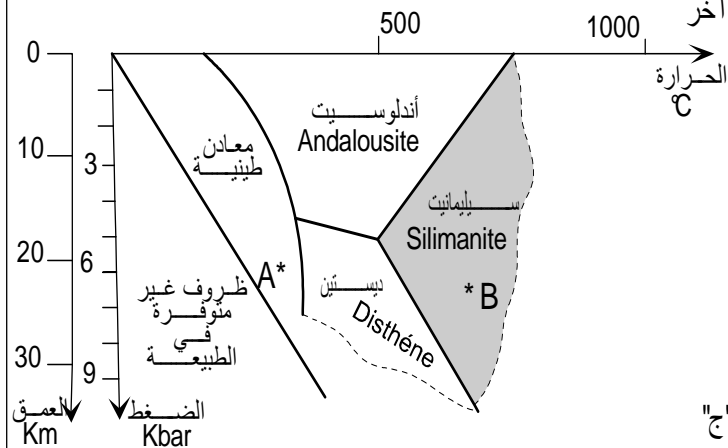
إن تواجد معدن معين من هذه المعادن في صخرة ما، يشهد على ظروف معينة للضغط والحرارة، خضعت لها الصخرة (تواجد الديستين مثلا \rightarrow ضغط مرتفع)، بذلك تنعت هذه المعادن بالمعادن المؤشرة.

اللوحة 3

الوثيقة 1 : معطيات تجريبية

تأثير الضغط والحرارة: تجربة Richardson ومعاونوه

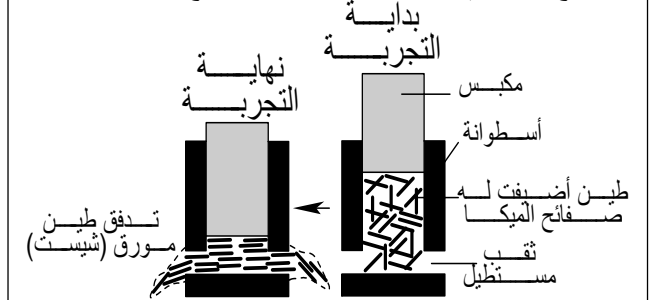
أخضع هؤلاء الباحثون عينات من خليط سيلكات الألومين لدرجة حرارة وضغط مرتفعين ومتغيرين فاستطاعوا تحديد مجال استقرار المعادن الثلاث: الأندلوسيت الديستين والسيلمانيت تمثل الخطوط المستقيمة حدود مجال استقرار كل معدن ويعبر الخط الفاصل بين مجالين عن الظروف اللازمة لكي يتم التفاعل العياني وبالتالي تحول معدن إلى آخر



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

تأثير الضغط: تجربة Daubrée

أخضع الباحث Daubrée خليطا من الطين وصفائح بلورية من الميكسا لضغط عال بواسطة مكبس داخل أسطوانة بقاعدتها ثقب مستطيلة الشكل يوضح الرسم أسفله معطيات ونتائج هذه التجربة.



تأثير الحرارة: تجربة Winkler

أخضع Winkler صخورا طينية لضغط ثابت: 2 كيلوبار مع ارتفاع تدريجي لدرجة الحرارة: - عند 570°C

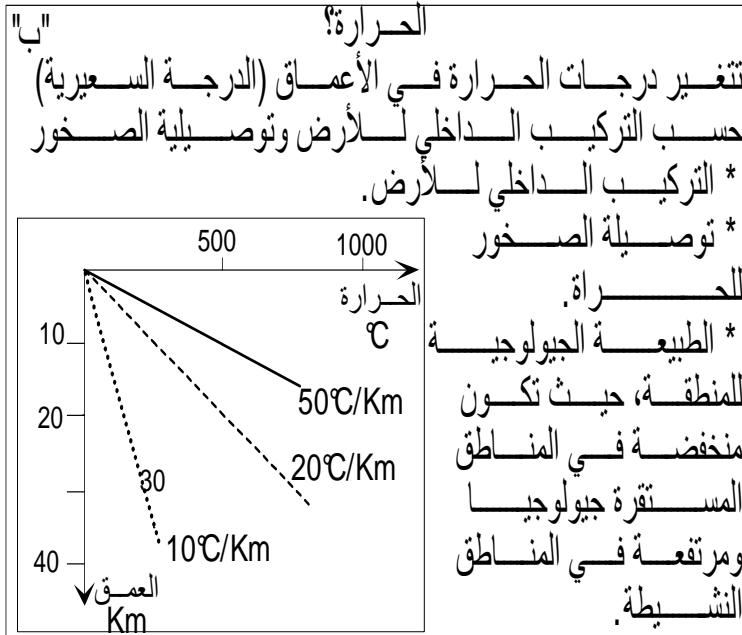
تظهر معادن جديدة مثل البيوتيت والأندلوسيت حسب التفاعل
أندلوسيت $\xrightarrow[570^{\circ}\text{C}]{2\text{Kbar}}$ كاولينيت

- عند 700°C يبدأ الانصهار الجزئي فيصبح الوسط مكونا من جزأين: جزء صلب يضم البيوتيت والسيلمانيت وجزء سائل.

② ظروف التحول في الطبيعة:

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

الوثيقة 2 : ظروف التحول في الطبيعة



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 تتناسب درجته مع العمق وكثافة الصخور

** الضغط الجزيئي للموائع البفريجية تضم الصخور بين بلوراتها بعض الموائع (H_2O و CO_2) تتسبب في ضغط إضافي يسمى الضغط الجزيئي للموائع.

تخضع الصخور في الطبيعة لتغير 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 البفريجية المتواجدة في أعماق الأرض، كالماء وثنائي أكسيد الكربون، والتي تغير من ظروف التفاعلات.

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

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

IV - مفهوم المعدن المؤشر والسلسلة التحولية.

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

★ **التحول:** هو مجموعة من التغيرات البنيوية والعيانية التي تطرأ على صخرة سابقة الوجود (رسوبية، صهارية أو متحولة)، في حالتها الصلبة، بفعل عاملي الضغط أو الحرارة أو هما معا.

★ **معدن مؤشر:** معدن يظهر في ظروف جد محددة لدرجة الضغط والحرارة، وبذلك فتواجهه في صخرة متحولة يمثل ذاكرة للظروف القصوى للضغط والحرارة التي وصلتها الصخرة، مثلا تواجد البيجادي في الصخور المتحولة لمناطق الطمر يعد شاهدا على تعرض هذه الأخيرة لضغط عال.

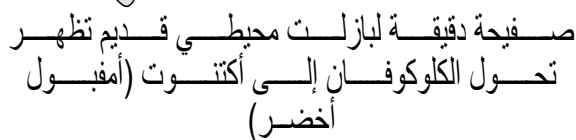
★ **متتالية تحولية:** مجموعة من الصخور المتحولة المنحدرة من نفس الصخرة الأصلية التي خضعت

لدرجات تحول متصاعدة

الطين (الأصل) ← الشيست ← الميكاشيست ← الغنايس.

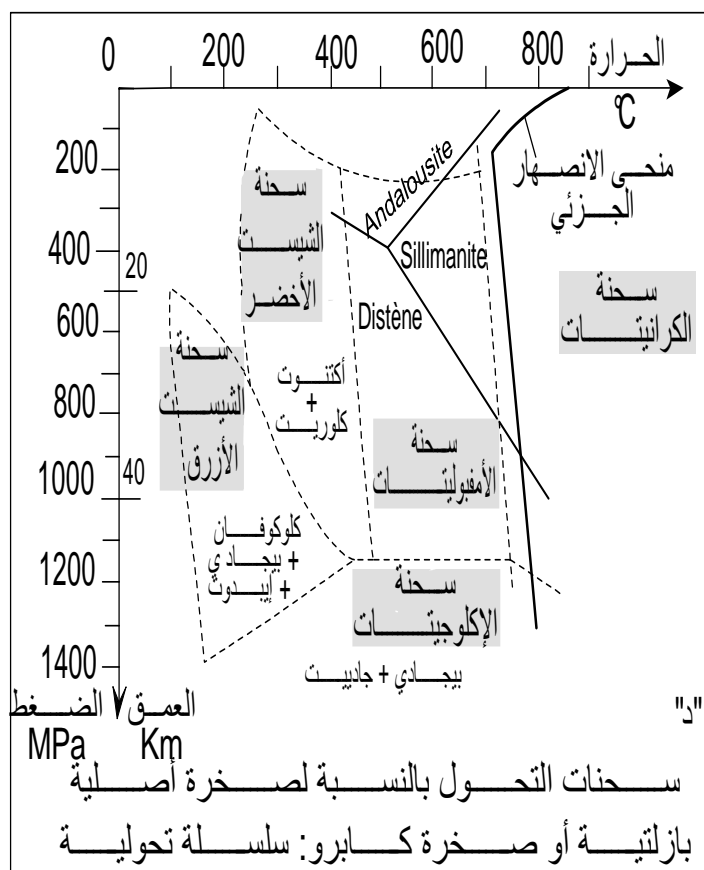
مثلا المتتالية الطينية تضم:

الوثيقة 1 : مفهوم المعدن المؤشر والمتتالية التحويلية.



تحويل متزايد

متتالية تحويلية لصخور طينية وتركيبها الكيميائي



الصخور	التفاعلات	المعادن المؤشرة
ميكاشيسيت ذو موسكوفيت	كلوريت + موسكوفيت	موسكوفيت وكلوريت
ميكاشيسيت ذو نوعين من الميكا	بيجادي + بيوتيت	موسكوفيت متبق
غنايس ذو نوعين من الميكا	مرو + موسكوفيت	بيوتيت اختفاء الكلوريت
غنايس ذو بيوتيت	سليمانيت + أرتوز سليمانيت + مرو + بيوتيت	بيوتيت وسليمانيت اختفاء الموسكوفيت
غنايس أبيض	كورديريت + مرو	اختفاء البيوتيت

تحويل متزايد

تغير التركيب العيواني حسب ظروف الضغط "ج" والحرارة

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

**** معتمدا على الشكل "د"، اعط تعريفاً لسحنة التحول و السلسلة التحويلية**

★ **سحنة التحول:** حسب ظروف الضغط ودرجة الحرارة، تتحدد 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 متتالية 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 العيداني لصخرة متحولة (شيست، غنايس ...) ننجز صفيحة دقيقة لهذه الصخرة في المختبر، وبعد تحديد المعادن المتحولة، نعرف على سحنة التحول والمتتالية المنتمية لها الصخرة ومن ثم نعرف على الظروف التكتونية التي تشكلت فيها.

V - مفهوم التحول الدينامي والتحول الدينامي الحراري.

① مجالات التحول في الطبيعة: أنظر وثيقة 1 لوحة 5.

الوثيقة 1 : مجالات التحول في الطبيعة.

اللوحة 5

مجالات التحول

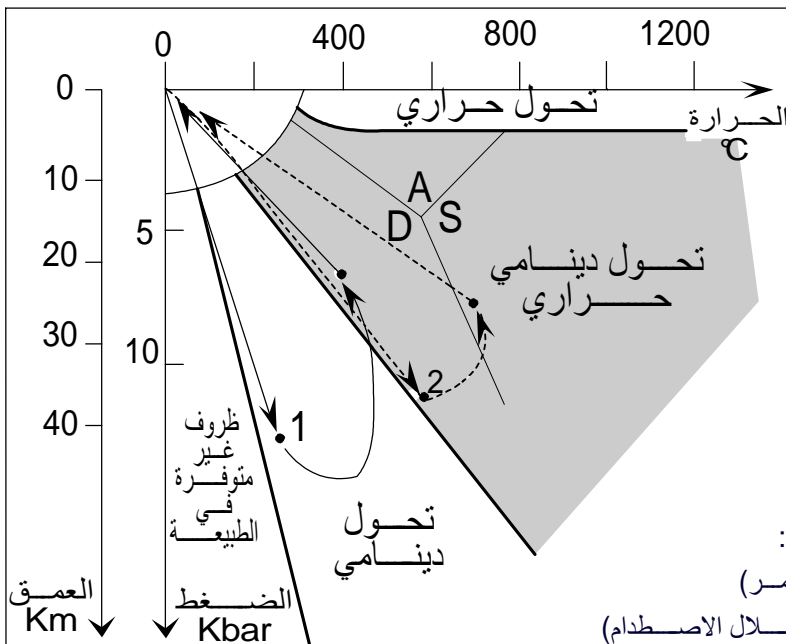
وضع Winkler تصورا يحدد مختلف أنواع التحول حسب مجالات تأثير عاملي الضغط والحرارة:

** في مناطق الاصطدام يحدث ارتفاع متزامن لكل من الضغط والحرارة فيكون التحول دينامي - حراري = إقليمي = عام
** في مناطق الطمر، يرتفع الضغط بسرعة في حين يكون ارتفاع الحرارة منخفضا فيحصل تحول دينامي.
** حول الصحارات، تتعرض الصخور المحيطة لارتفاع مفاجئ في درجة الحرارة الحرارة فيحصل التحول الحراري

مسار تطور التحول حسب الضغط والحرارة لـ:

① قطعة من البازلت الألبى (خلال ظاهرة الطمر)

② قطعة من الميكاشيست للغلاف القاري (خلال الاصطدام)



يتبين من معطيات هذه الوثيقة أن تحول الصخور مرتبط بتغير عاملي الضغط والحرارة، وهذه الأخيرة ترتبط بديناميكية 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 الطمر: أنظر وثيقة 3 لوحة 5.

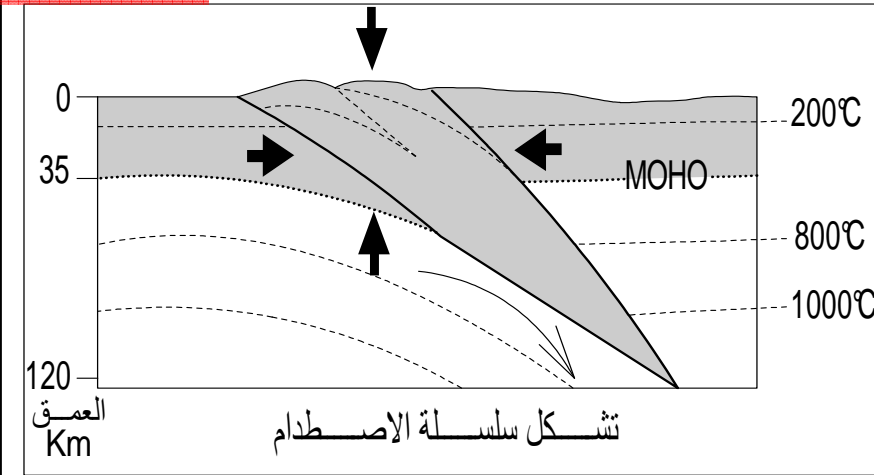
في مناطق الطمر تخضع الصخور المنغرفة لضغط عال، نتيجة طمر غلاف صخري محيطي تحت الغلاف الصخري القاري، في حين يكون ارتفاع درجة الحرارة منخفضا، فيحصل تحول دينامي.

ملاحظة:

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

الوثيقة 2 : ظروف التحول في مناطق الاصطدام.

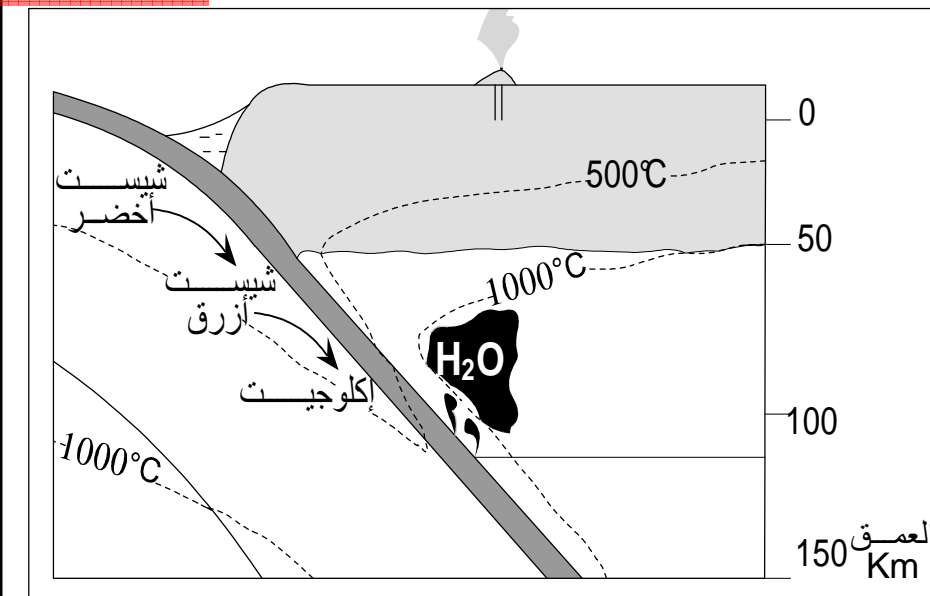
اللوحة 5



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 تضاعفي

الوثيقة 3 : ظروف التحول في مناطق الطمر.

اللوحة 5



تحول مناطق الطمر
= تحول دينامي
ينغرز الغلاف الصخري المحيطي تحت الغلاف الصخري القاري، فتتغير الظروف التي تخضع لها الصخور المنغرفة كالارتفاع الكبير في الضغط.
قد يحدث أن تصعد صخور القشرة المحيطية إلى الأعلى نتيجة ظروف جيولوجية مختلفة فيلاحظ تكون صخور جديدة تختلف عن تلك التي انغمرت