الفصل الثاني

التحول وعلاقته بديناميكية 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.

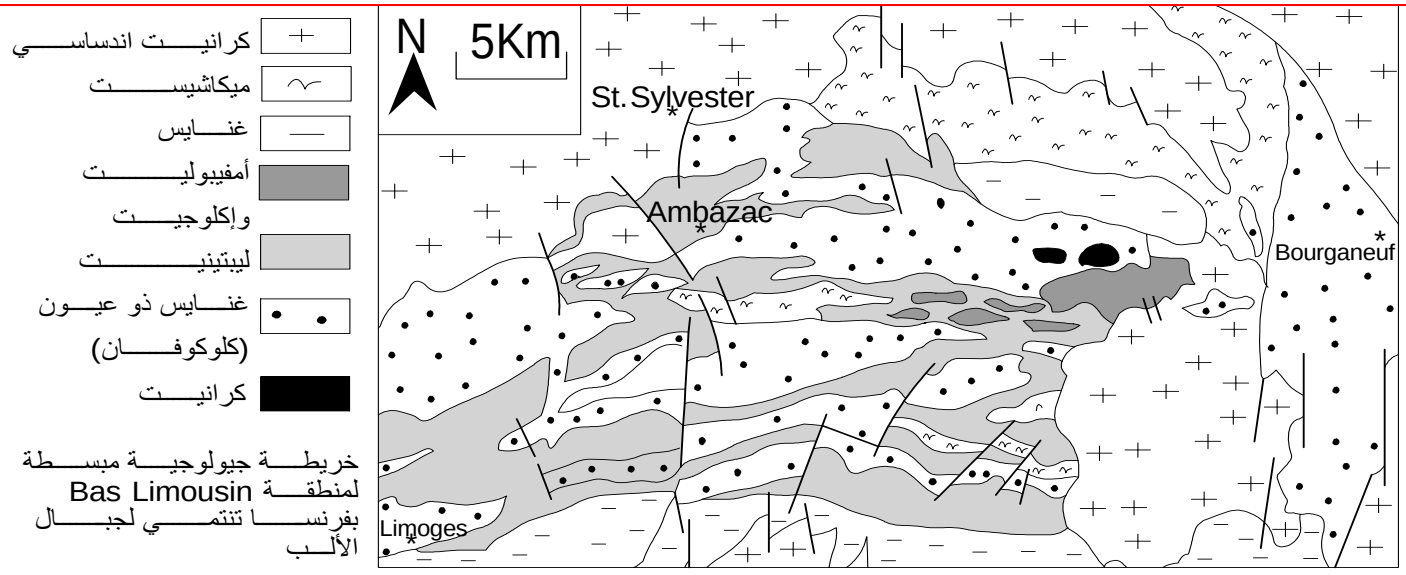
- **فما هي الخاصيات البنيوية والعيدانية للصخور المتحولة المميزة لمناطق الطمر والاصطدام؟**
- **ما هي ظروف التحول وما هي علاقتها بتكتونية الصفائح؟**
- **كيف يمكن للصخرة المتحولة أن تختزن ظروف تحولها؟**

I – الصخور المتحولة المنتشرة بسلاسل الاصطدام.

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

اللوحـــــة 1

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



صف استسطاح الصخور المتحولة بهذه المنطقة من السلسلة الألبية

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

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

التنضد:

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

الشيستية:

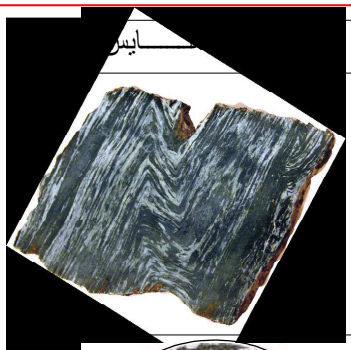
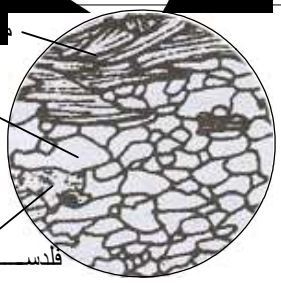
توريق أقل أو أكثر دقة تكتسبه للصخور المتحولة بفعل عامل الضغط، ويختلف عن التطبق كما يمكن أن يتجزأ إلى صفائح منتظمة.

التوريق:

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

Moutamadris.ma

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

	الشيســـت الأخضـــر	الميكاشيســـت	الغنايس
ملاحظة الصـــخرة بـــالعين المجـردة			
ملاحظة الصـــفيحة الدقيقـــة بـــالمجهر المســـتقطب	سريسـيت (ألـوان زاهيـة) + كلوريـت (لـون أخضـر)	مرو (لـون منطفـئ) ميكـا بيوتيـت وموسـكوفيت (ألـوان زاهيـة)	 مرو فلدسـبات
وصـف حالـة المعـادن	المعـادن موجهـة علـى شـكل صـفائح	أسـرة مـن المـرو وأسـرة مـن البيوتيـت والموسـكوفيت	تعاقـب أسـرة فاتحـة مكونـة مـن المـرو والفلدسـبات مـع أسـرة داكنـة مكونـة مـن البيوتيـت
البنيـــة	**شيستية**	**توريق (سهلة الانفصام)**	**توريق (غير قابلة للانفصام)**
التركيـب العيـداني	معـادن طينيـة (كلوريـت وسيريسـيت) سـيليكات ألـومين	مرو بيوتيـت بيجـادي سـيليكات ألـومين	مـرو + بوتيـت فلدسـبات بيجـادي سـليمانيت سـيليكات ألـومين
التركيـب الكيميـائي SiO_2	60,2%	60,9%	68,7
Al_2O_3	20,9%	19,1%	16,2%
FeO	3,7%	4,1%	4,1%
K_2O	4,1%	3,7%	3%

** قـارن بيـن مميـزات هـذه الصـخور.
** تتشـكل الصـخور الطينيـة فـي قسـمها الكبـير مـن سـيليكات الألـومين. اقـترح فرضـية حـول العلاقـة بيـن هـذه الصـخور والصـخور المتحولـة.

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

- الشيست الأخضر: بنية شيستية ويتشكل من السيريسيت والكلوريت.
- الميكاشيست: بنية مورقة قابلة للانفصام، وتتشكل من البيوتيت والموسكوفيت والمرو.
- بنية مورقة غير قابلة للانفصام، وتتشكل من الميكا والمرو والفيلدسبات.

فعند الانتقال من الشيست إلى الميكاشيست إلى الغنايس:

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

★ تتميز هذه الصخور المتحولة (شيست، ميكاشيست، وغنايس) 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 أساسا من سيليكات الألبومين، يمكن افتراض أن العينات المدروسة هي ناتجة عن تحول صخور طينية.

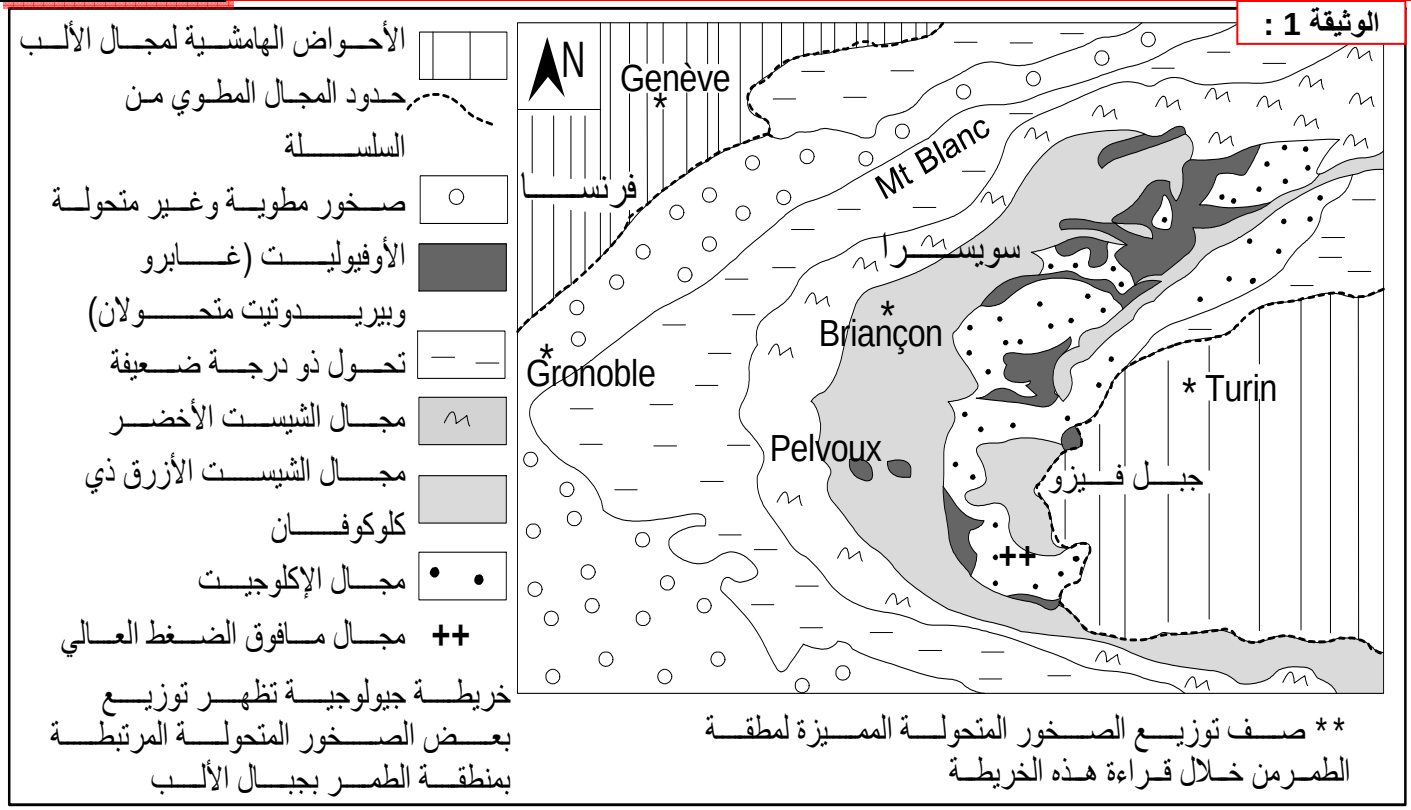
Moutamadris.ma

II – الصخور المتحولة المنتشرة بسلاسل الطمر.

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

اللوحـــــة 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 المستسطحة بمناطق الطمر القديمة.

تبرز الخريطة تمنطقا 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 بمعدني البجادي Grenat والجاديت Jadeite (كلينوبيروكسين صودي)، والتي تتشكل في ظروف ضغط عالية، لشاهد على حدوث طمر سابق لسلاسل الاصطدام.

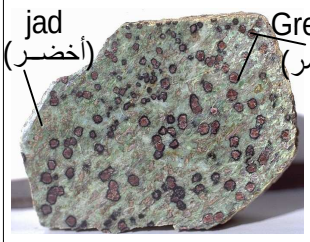
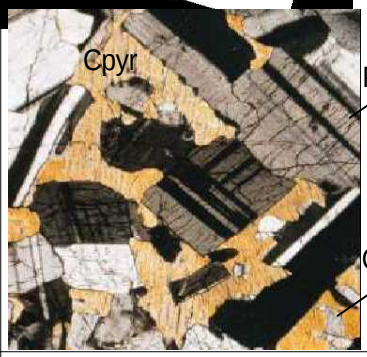
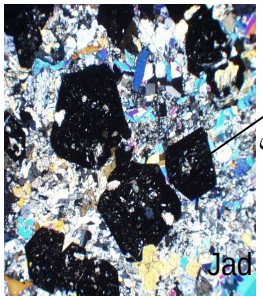
② **خصائص الصخور المتحولة لمناطق الطمر:** وثيقة 2 لوحة 2.

★ 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 مسبوقا باختفاء المحيط الألبي نتيجة طمر صفيحة صخرية تحت أخرى، وانتهت القارتان المحمولتان على هاتين الصفيحتين بالاصطدام، وهي ظروف ملائمة لتكون صخور متحولة.

Moutamadris.ma

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

	الغـــابرو الأفيوليـــتي	الشيســـت الأزرق ذي كلوكوفـــان وإبيـــدوت	الإكلوجيـــت ذات بيجـــادي وجادييـــت
ملاحظة الصـــخرة بـــالعين المجـــردة			
ملاحظة الصـــفيحة الدقيقـــة بـــالمجهر المســـتقطب			
التركيـــب العيـــداني	كلينوبيروكســـــين: Cpyr بلاجيـــوكلاز : Plag	كلوكوفـــان: Glau إبيـــدوت: Epi ســـبينيل: Sp	بيجـــادي : Grenat جادييـــت : Jad (=كلينوبيروكســـــين)

التركيـــب الكيميـــائي — لهـذه الصـخور نفـس التركيـب الكيميـائي المبيـن فـي الجـدول جانبـه

SiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO	CaO	Na2O	K_2O
47,1%	14,2%	12,7%	11%	9,9%	2,2%	0,4%

** قـارن بيـن ممـيزات هـذه الصـخور.
** مـا المعلومـات الإضـافية الـتي يمكـن استخلاصـها مـن وجـود الغـابرو الأوفيوليـتي بهـذه المنطقـة ومـا علاقتـه بالصـخور المتحولـة المجـاورة لـه؟

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 طهور شيستية على مستوى الطين المتدفق من ثقوب الاسطوانة، وتكون متعامدة مع اتجاه قوة الضغط. كما أن صفائح الميكا تصفف في اتجاه الشيستية.

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:

كاولينيت (سيليكات ألومين مميه) ← 500 ℃ ← ميتاكاولنيت (سيليكات ألومين غير مميه) ← 870 ℃ ← ميليت (سيليكات ألومين غير مميه)

Moutamadris.ma

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

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

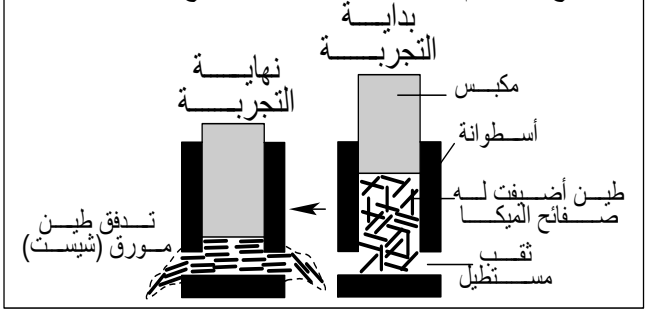
إن تواجد معدن معين من هذه المعادن في صخرة ما، يشهد على ظروف معينة للضغط والحرارة، خضعت لها الصخرة (تواجد الدستين مثلا ⇦ ضغط مرتفع)، بذلك تنعت هذه المعادن بالمعادن المؤشرة.

اللوحـــــة 3

الوثيقة 1 : معطيات تجريبية

"أ" تـــأثير الضـــغط: تجربـــة Daubrée

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



"ب" تـــأثير الحـــرارة: تجربـــة Winkler

أخضع Winkler صخورا طينية لضغط ثابت: 2 كيلوبار مع ارتفاع تدريجي لدرجة الحرارة:

- عند 570℃:

تظهر معادن جديدة مثل البيوتيت والأندلوسيت حسب التفاعل

أندلوسيت ⟶ (2Kbar, 570℃) كاولينيت

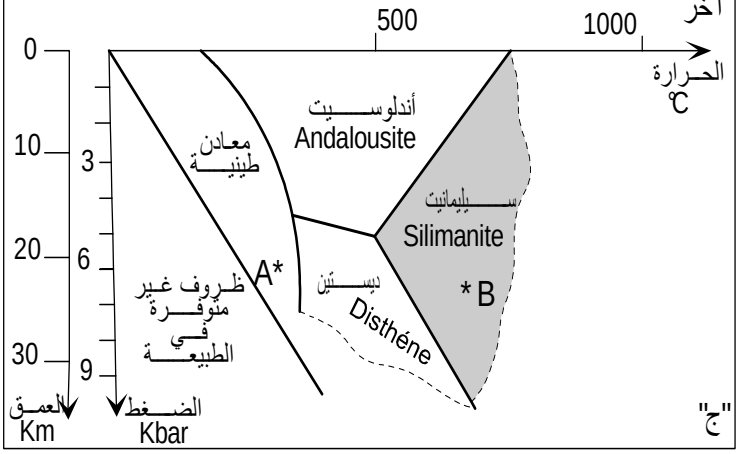
- عند 700℃:

يبدأ الانصهار الجزئي فيصبح الوسط مكونا من جزأين: جزء صلب يضم البيوتيت والسيليمانيت وجزء سائل.

تـــأثير الضـــغط والحـــرارة: تجربـــة Richardson ومعـاونوه

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 العيداني وبالتالي تحول معدن إلى آخر



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

Moutamadris.ma

② ظروف التحول في الطبيعة:

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

الوثيقة 2 : ظروف التحول في الطبيعة

"أ" الضـــغط؟

** الضـــغط التكتونـــي: النـــاجم عـــن القـــوى التكتونيـــة فـــي المنـــاطق الغـــير المســـتقرة

** الضـــغط الصـــخري: $P = \frac{\text{وزن العمـــود}}{\text{مســـاحة قاعدتـــه}}$

وبـــذلك تخضـــع المـــواد فـــي بـــاطن الأرض لضـــغط تتناســـب درجتـــه مـــع العمـــق وكثافـــة الصـــخور

** الضـــغط الجزيـــئي للموائـــع البيفرجيـــة تضـــم الصـــخور بيـــن بلوراتهـــا بعـــض الموائـــع (CO_2 و H_2O) تتســـبب فـــي ضـــغط إضـــافي يســـمى الضـــغط الجـــزئي للموائـــع.

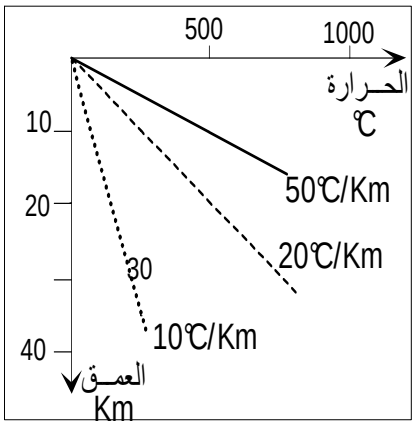
"ب" الحـــرارة؟

تتغـــير درجـــات الحـــرارة فـــي الأعمـــاق (الدرجـــة الســـعيرية) حســـب التركيـــب الـــداخلي لـــلأرض وتوصـــيلية الصـــخور

* التركيـــب الـــداخلي لـــلأرض.

* توصـــيلة الصـــخور للحـــــــرارة.

* الطبيعـــــة الجيولوجيـــــة للمنطقـــة، حيـــث تكـــون منخفضـــة فـــي المنـــاطق المســـتقرة جيولوجيـــا ومرتفعـــة فـــي المنـــاطق النشـــيطة.



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 البيفرجية 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 – مفهوما المعدن المؤشر والسلسلة التحولية.

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

★ **التحول:** هو مجموعة من التغيرات البنيوية والعيدانية 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 فتواجده 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.

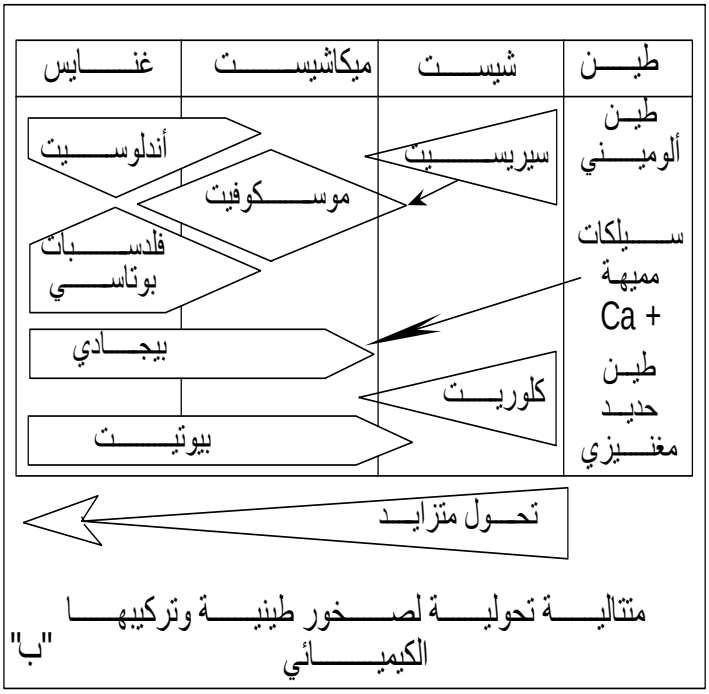
★ **متتالية تحولية:** مجموعة من الصخور المتحولة المنحدرة من نفس الصخرة الأصلية التي خضعت لدرجات تحول متصاعدة مثلا المتتالية الطينية تضم:

الطين (الأصل) ⇦ الشيست ⇦ الميكاشيست ⇦ الغنايس.

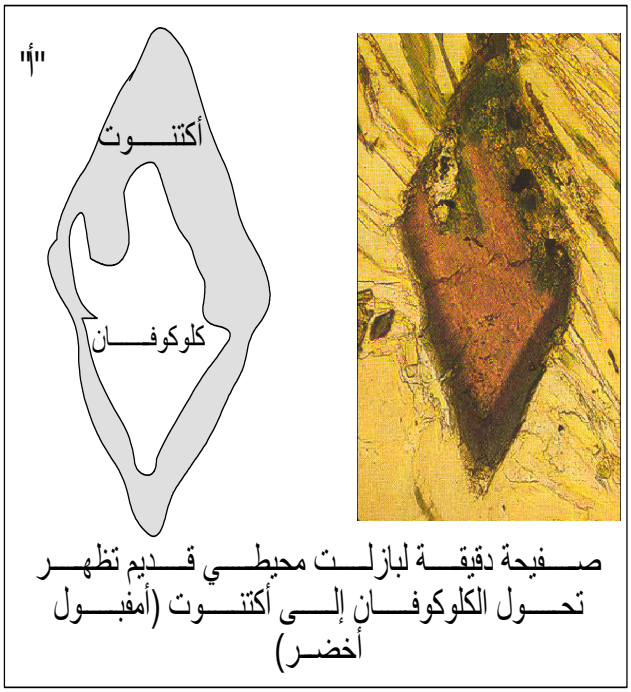
Moutamadris.ma

② مفهوم سحنة التحول والسلسلة التحولية: أنظر الشكل د وثيقة 1 لوحة 4.

الوثيقة 1 : مفهوما المعدن المؤشر والمتتالية التحولية. **اللوحـــــة 4**



متتاليـــة تحوليـــة لصـــخور طينيـــة وتركيبهـــا الكيميـــائي "ب"

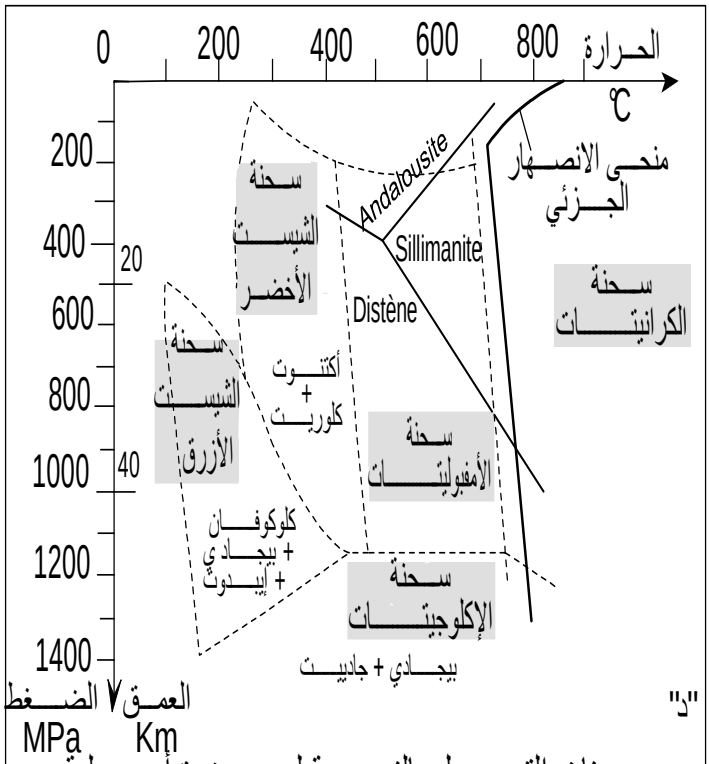


صـــفيحة دقيقـــة لبازلـــت محيطـــي قـــديم تظهـــر تحـــول الكلوكوفـــان إلـــى أكتنـــوت (أمفبـــول أخضـــر)

الصـــخور	التفـــاعلات	المعـــادن المؤشـــرة
ميكاشيســـت ذو موســـكوفيت	كلوريـــت + موســـكوفيت	موســـكوفيت وكلوريـــت
ميكاشيســـت ذو نـــوعين مـــن الميكـــا	بيجـــادي + بيوتيـــت	موســـكوفيت متبـــق
غنـــايس ذو نـــوعين مـــن الميكـــا	مرو + موســـكوفيت	بيوتيـــت اختفـــاء الكلوريـــت
غنـــايس ذو بيوتيـــت	ســـليمانيت + أرتـــوز ســـليمانيت + مـــرو + بيوتيـــت	بيوتيـــت وســـليمانيت اختفـــاء الموســـكوفيت
غنـــايس أبيـــض	كورديبريـــت + مرو	اختفـــاء البيوتيـــت

تحـــول متزايـــد

تغـــير التركيـــب العيـــداني حســـب ظـــروف الضـــغط والحـــرارة "ج"



"د"

ســـحنات التحـــول بالنســـبة لصـــخرة أصـــلية بازلتيـــة أو صـــخرة كـــابرو: سلســـلة تحوليـــة

**معتمـــدا علـــى الأشـــكال "أ"، "ب" و "ج"، اعـــط تعريفـــا دقيقـــا لمفهـــوم التحـــول، المعـــدن المؤشـــر والمتتاليـــة التحوليـــة

** معتمـــدا علـــى الشـــكل "د"، اعـــط تعريفـــا لســـحنة التحـــول والسلســـلة التحوليـــة

Moutamadris.ma

★ **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 والحرارة. وتمكن من معرفة تطورات الضغط والحرارة التي خضعت لها الصخرة الأصلية في العمق.

③ خلاصة:

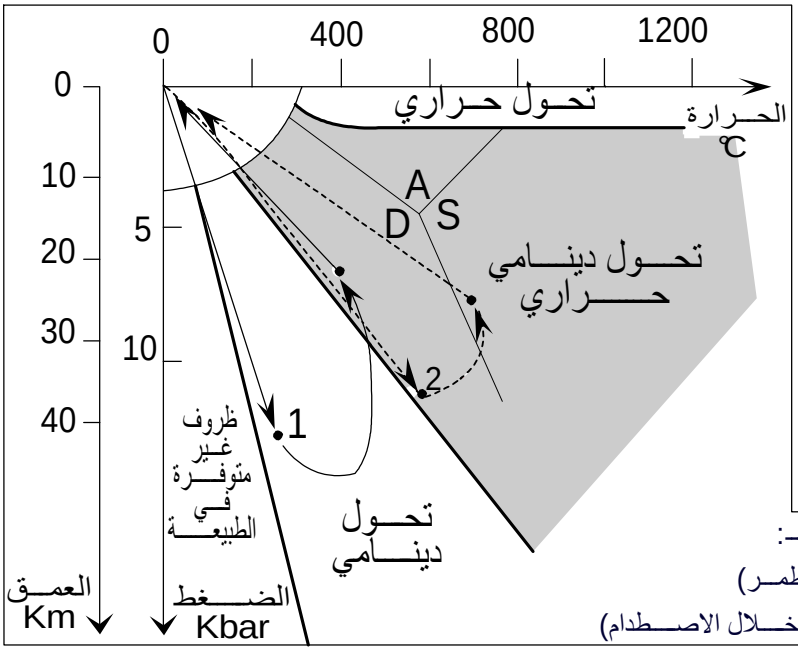
لتحديد التركيب العيداني لصخرة متحولة (شيست، غنايس ...) ننجز صفيحة دقيقة لهذه الصخرة في المختبر، وبعد تحديد المعادن المتحولة، نتعرف على سحنة التحول والمتتالية المنتمية لها الصخرة ومن تم نتعرف على الظروف التكتونية التي تشكلت فيها.

V – مفهوم التحول الدينامي والتحول الدينامي الحراري.

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

اللوحـــــة 5

الوثيقة 1 : مجالات التحول في الطبيعة.



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 الصهارات، تتعرض الصخور المحيطة لارتفاع مفاجئ في درجة الحرارة الحرارة فيحصل التحول الحراري

مسار تطور التحول حسب الضغط والحرارة لـ:

1 قطعة من البازلت الألبي (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 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).

Moutamadris.ma

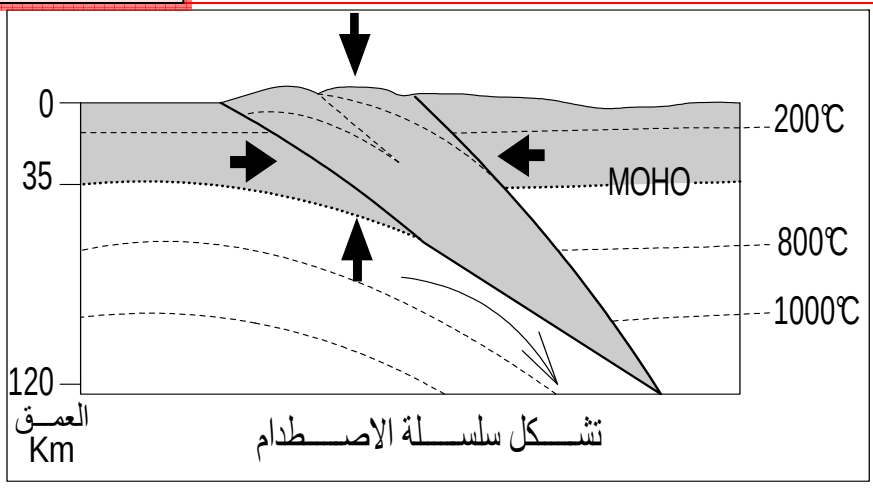
③ ظروف التحول في مناطق الطمر: أنظر وثيقة 3 لوحة 5.

في مناطق الطمر تخضع الصخور المنغرزة 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.

اللوحـــــة 5

الوثيقة 2 : ظروف التحول في مناطق الاصطدام.



تحـــول منـــاطق الاصـــطدام
=
تحـــول دينـــامي حـــراري

يعـــود التحـــول فـــي منـــاطق الاصـــطدام إلـــى ارتفـــاع مـــتزامن فـــي درجـــة الحـــرارة والضـــغط.

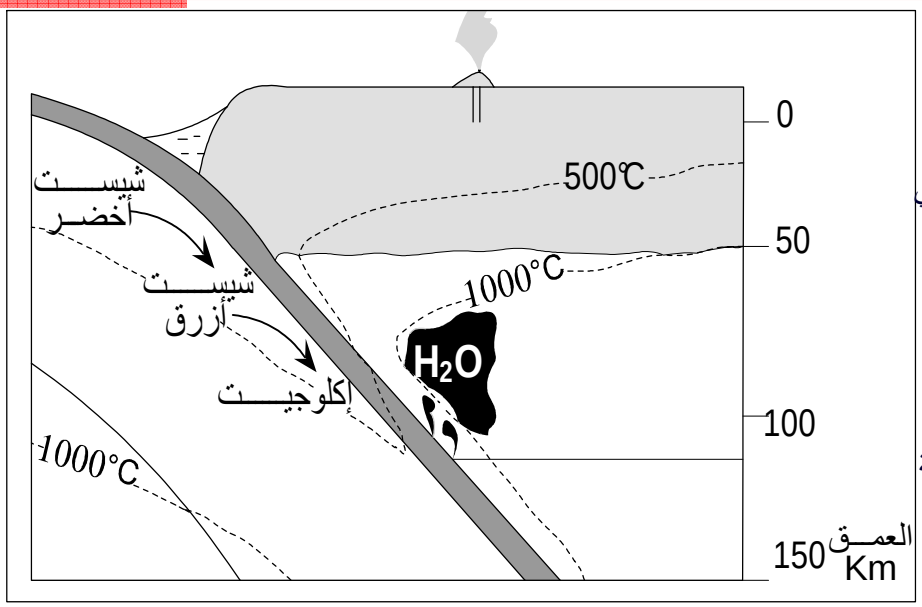
ضـــغط الكتلـــة الصـــخرية

ضـــغط القـــوى التكتونيـــة الانضـــغاطية

تـــوازن تضـــاغطي

اللوحـــــة 5

الوثيقة 3 : ظروف التحول في مناطق الطمر.



تحـــول منـــاطق الطمـــر
=
تحـــــول دينـــــامي

ينغـــرز الغـــلاف الصـــخري المحيطـــي تحـــت الغـــلاف الصـــخري القـــاري، فتتغـــير الظـــروف الـــتي تخضـــع لهـــا الصـــخور المنغـــرزة كالارتفـــاع الكبـــير فـــي الضـــغط.

قـــد يحـــدث أن تصـــعد صـــخور القشـــرة المحيطيـــة إلـــى الأعلـــى نتيجـــة ظـــروف جيولوجيـــة مختلفـــة فيلاحـــظ تكـــون صـــخور جديـــدة تختلـــف عـــن تلـــك الـــتي انغـــرزت

Moutamadris.ma