

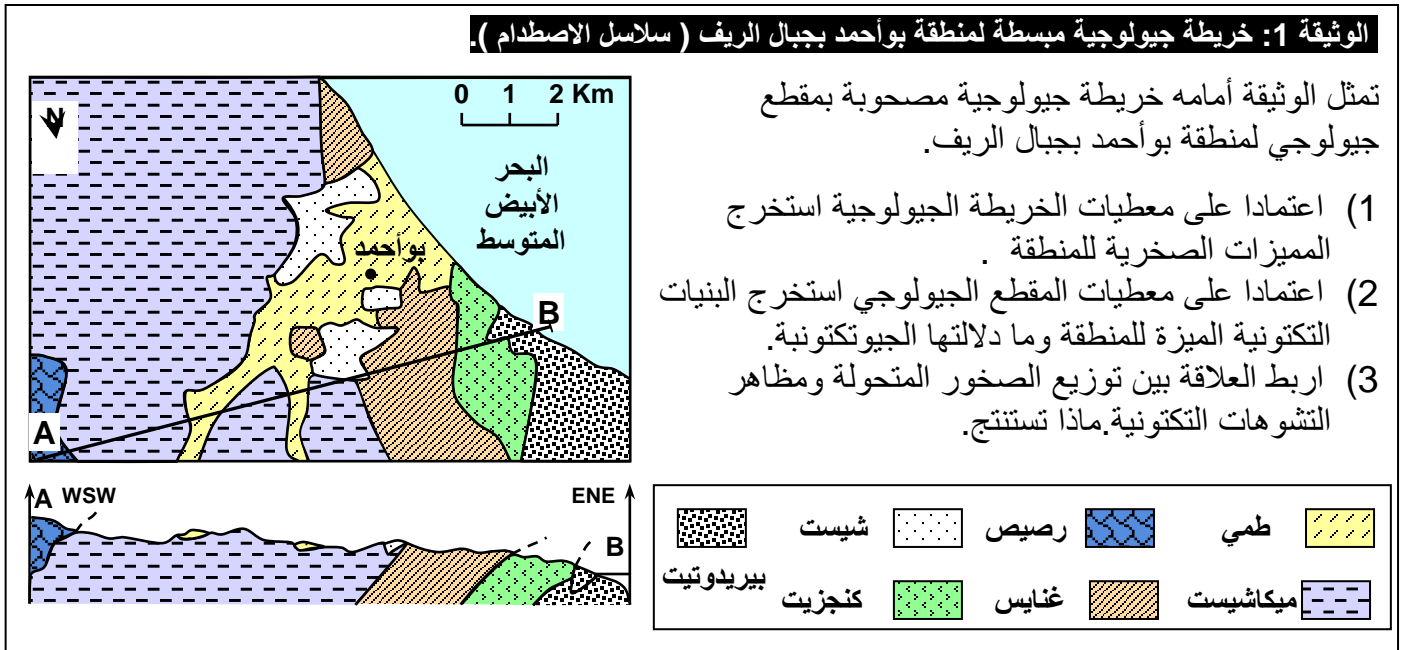
التحول وعلاقته بدينامية الصفائح

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: أنظر الوثيقة 1



(1) المميزات الصخرية :

- الصخور الرسوبية : طمي + رصيص.
- الصخور المتحولة : شيبست + ميكاشيست + غنايس.
- الصخور الصحارية : كنجزيت + البيريدوتيت.

(2) البنيات التكتونية ودلالاتها :

فوالق معكوسة + طيات: يدل وجودها على أن المنطقة تعرضت لقوى انضغاطية تكتونية .

(3) العلاقة بين توزيع الصخور المتحولة ومظاهر التشوهات التكتونية :

تخضع الصخور المتحولة لتوزيع محدد انطلاقا من الجنوب الغربي نحو الشمال الشرقي حيث نجد شيبست ثم ميكاشيست ثم بعد ذلك الغنايس كما نلاحظ تعقد تدريجي في البنيات التكتونية بحيث يصبح وسع الطيات صغير وتكثر الصدعات كلما اتجهنا نحو الشمال الشرقي.

② الخصائص البنيوية والعيانية والكيميائية للصخور المتحولة: أنظر الوثيقة 2. a مفهوم التضد، الشيستية والتوريق.

التوريق:

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

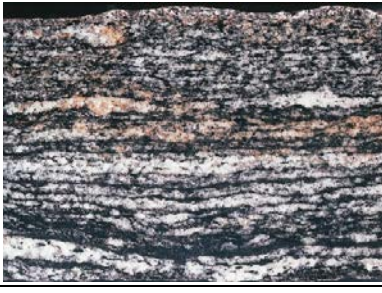


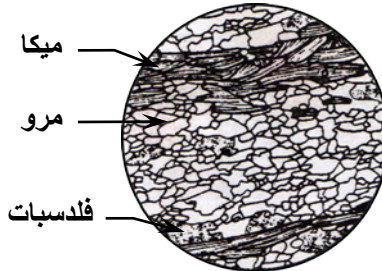
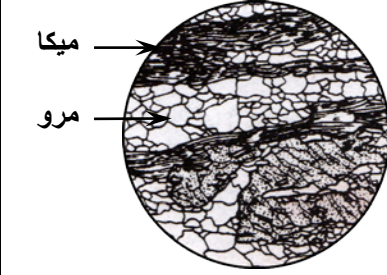
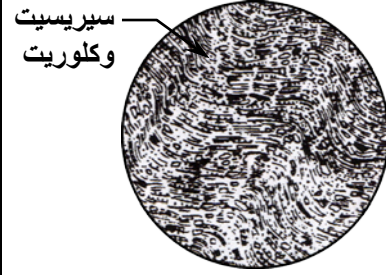
الشيستية:

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

التضد:

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

الوثيقة 2: بعض مميزات الصخور المتحولة المنتشرة في سلاسل الاصطدام.

الغنايس	الميكاشيست	الشيست الأخضر	ملاحظة الصخرة بالعين المجردة
			
			ملاحظة الصفيحة الدقيقة بالمجهر المستقطب
68.7	60.9	60.2	SiO ₂
16.2	19.1	20.9	Al ₂ O ₃
0.7	1.2	2.8	Fe ₂ O ₃
4.1	4.1	3.7	FeO
1.3	1.4	0.85	MgO
1.8	1.7	0.55	CaO
3.8	2.1	2.45	Na ₂ O
3	3.7	4.1	K ₂ O

التركيب الكيميائي (%)

- 1) صف البنية المجهرية لكل عينة من الصخور. ماذا تلاحظ.
- 2) استخراج المكونات العيانية التي تتميز بها كل صخرة. ماذا تستنتج.
- 3) يمثل الجدول أسفل الوثيقة نسب العناصر الكيميائية التي تحتوي عليها كل صخرة. ماذا تستنتج من خلال تحليل معطيات الجدول.
- 4) أثبتت الدراسة الميدانية للمنطقة وجود صخور طينية ذات تركيب كيميائي يغلب عليه العنصرين (SiO₂ و Al₂O₃). اقترح فرضية توضح من خلالها العلاقة بين هذه الصخور والصخور المتحولة الموجودة بالمنطقة.

1) البنية المجهرية للعينات:

- CE** الشيست الأخضر: صخرة ذات بنية شيستية تأخذ خلالها المعادن اتجاهها دالا على اتجاه القوى التي تعرضت إليها.
- CE** الميكاشيست: صخرة لامعة ذات بنية مورقة قابلة للانقسام، تتميز بتعاقب أسرة من البيوتيت والموسكوفيت (الألوان الزاهية)، وأسرة من المرو (ألوان منطفئة).

CE الغنايس : صخرة ذات بنية مورقة غير قابلة للانفصام، بها المعادن على شكل أسرة فاتحة (المرو والفلدسبات) وأخرى داكنة (الميكال).

نلاحظ انه كلما اتجهنا من الشيست إلى الميكاشيست إلى الغنايس، ازداد قد البلورات مع اختلاف في بنية الصخور، حيث تزداد هذه البنية تعقيدا: من التنضد إلى الشيستية إلى التوريق. كما تختفي بعض المعادن وتظهر أخرى.

(2) التركيب العيداني للعينات:

CE الشيست : تتشكل من السيريسيت(ميكال بيضاء ذات بلورات جد رقيقة) والكلوريت ذو اللون الأخضر (لدى تسمى الصخرة بالشيست الأخضر).

CE الميكال شيست : تتشكل من الميكال (البيوتيت والموسكوفيت) ومن المرو.

CE الغنايس : تتشكل أساسا من الميكال (البيوتيت والموسكوفيت) والمرو والفلدسبات.

نستنتج ظهور معادن جديدة واختفاء أخرى كلما انتقلنا من الشيست إلى الغنايس مرورا بالميكاشيست.

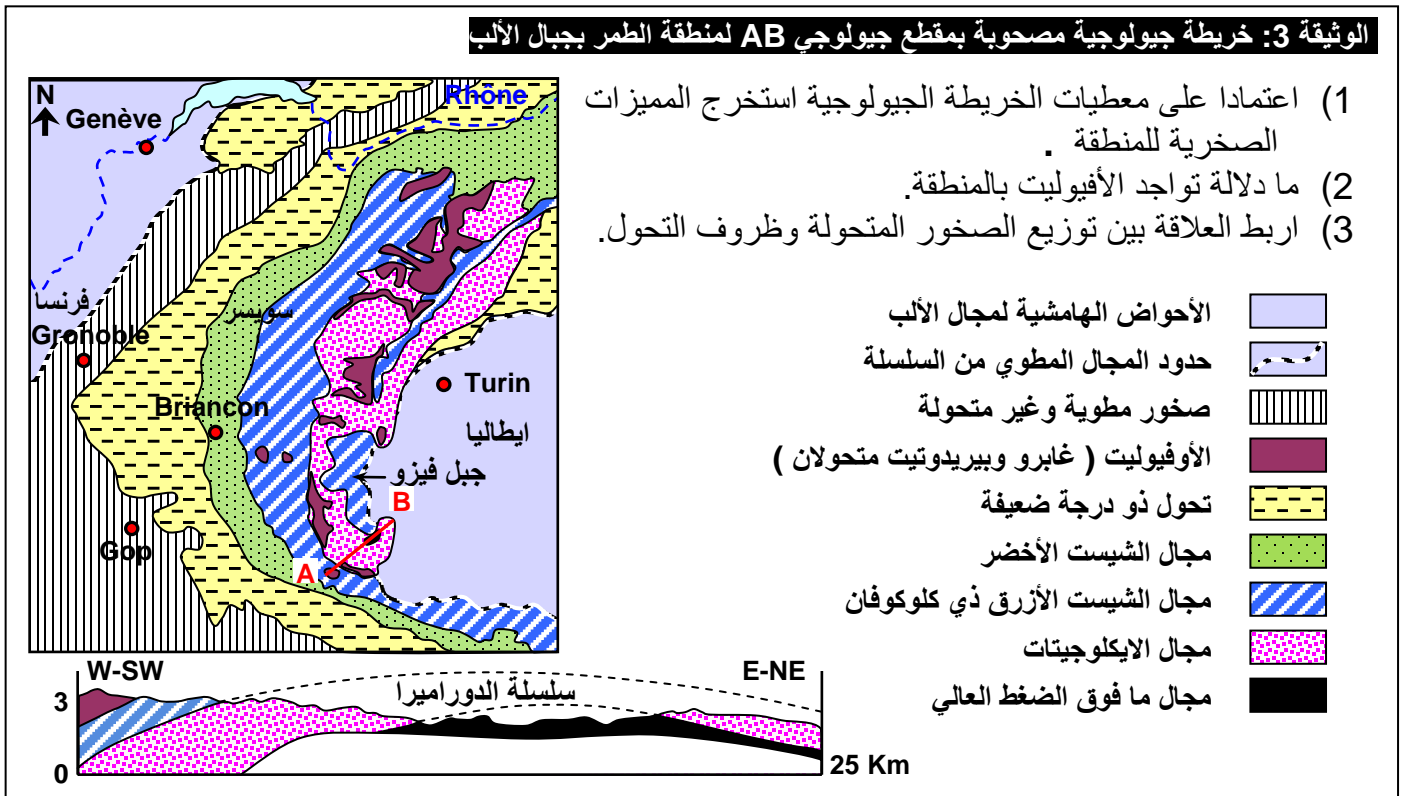
(3) لهذه الصخور نفس التركيب الكيميائي، ويغلب عليه العنصرين ($2SiO$ و $3O_2Al$). وتسمى المعادن التي تحتوي عليها وتتوفر على هذا التركيب بسيليكات الألومين.

(4) الصخور المتحولة لها نفس التركيب الكيميائي لكنها تختلف من حيث البنية وهذا يدل على أن لهذه الصخور نفس الأصل، لكن خضعت لظروف تشكل مختلفة.

إذا علمنا أن الصخور الطينية تتشكل أساسا من سيليكات 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: أنظر الوثيقة 3.



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.

1) المميزات الصخرية للمنطقة:

تبرز الخريطة لمنطقاً في توزيع الصخور المتحولة حيث تنتقل تدريجياً من مجال الشيبست الأخضر (غني بالكوريت)، نحو مجال الشيبست الأزرق (غني بالكلوكوفان)، ثم إلى مجال الإكلوجيتات (جادييت والبيجادي) المتداخلة مع الأوفوليت.

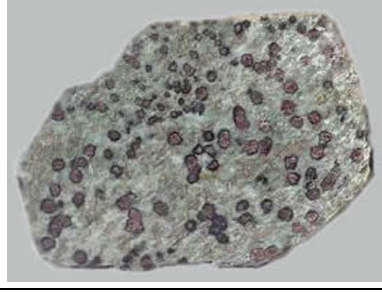


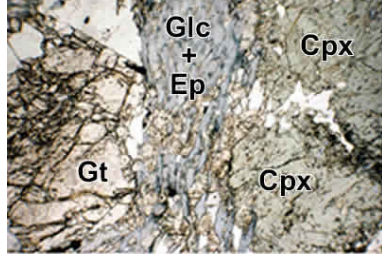
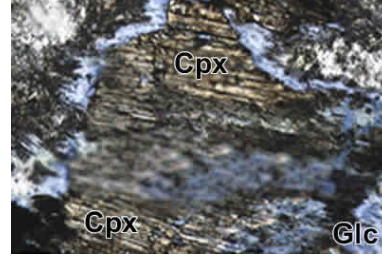
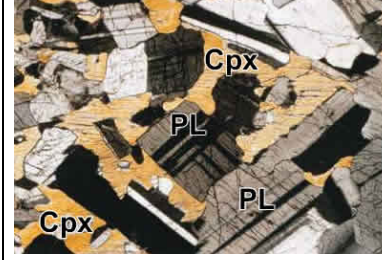
2) دلالة تواجد الأوفوليت بالمنطقة:

يدل الأوفوليت على أن الاصطدام الذي نتجت عنه جبال الألب كان مسبقاً بطمر ثم طفو.

3) العلاقة بين توزيع الصخور المتحولة وظروف التحول:

هناك زيادة في شدة التحول كلما اتجهنا من الشيبست الأخضر إلى الشيبست الأزرق ثم إلى الإكلوجيت. ان وجود الإكلوجيت المتميز بمعدي البجادي Grenat والجادييت Jadeite (كلينوبيروكسين صودي)، والتي تتشكل في ظروف ضغط عالية، لشاهد على حدوث طمر سابق لسلاسل الاصطدام.

② خصائص الصخور المتحولة لمناطق الطمر: أنظر الوثيقة 4.

الوثيقة 4: بعض الخصائص البنيوية والعيانية للصخور المتحولة المنتشرة بمناطق الطمر.									
اكلوجيت ذو بجادي وجادييت			شيبست أزرق ذي كلوكوفان وبيدوت			غابرو أوفوليتي			
									الملاحظة بالعين المجردة
									ملاحظة الصفحة الدقيقة بالمجهر المستقطب
Cpx = بيروكسين Ep+Glc = كلوكوفان وبيدوت Gt = البجادي			Cpx = بيروكسين Glc = كلوكوفان			Cpx = بيروكسين PL = بلاجيوكلاز			التركيب العياني
SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	العناصر	التركيب الكيميائي (لهذه العينات نفس
47,1	14,2	2,3	11	12,7	9,9	2,2	0,4	النسب المنوية	التركيب الكيميائي (العام)

* قارن بين خصائص الصخور المدروسة.

* ماذا تستخلص من وجود الكابرو الأفيوليتي بهذه المنطقة وما علاقته بالصخور المتحولة المجاورة.

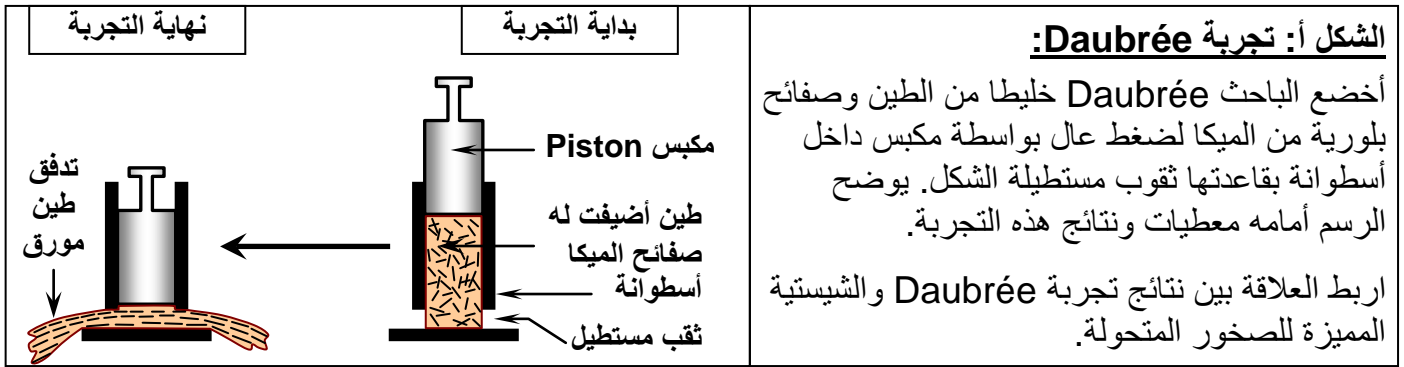
a رغم اختلاف بنيتها وتركيبها العيداني، فإن لهذه الصخور نفس التركيب الكيميائي العام. إذن الصخور الرسوبية والبلورية لمنطقة الألب الفرنسي الإيطالي خضعت للتحول، ودرجة هذا التحول تختلف حسب المناطق.

a 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 الألبى نتيجة طمر صفيحة صخرية تحت أخرى، وانتهت القارتان المحمولتان على هاتين الصفيحتين بالاصطدام، وهي ظروف ملائمة لتكون صخور متحولة.

III - عوامل التحول.

① تجارب الكشف عن ظروف التحول:

أ - تأثير الضغط: تجربة Daubrée أنظر الوثيقة 5 شكل أ.

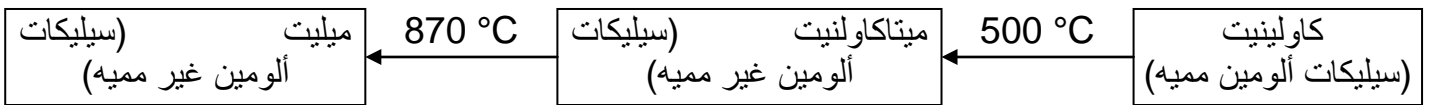


يلاحظ ظهور شيسيتية على مستوى الطين المتدفق من ثقب الاسطوانة، وتكون متعامدة مع اتجاه قوة الضغط. كما أن صفائح الميكا تصف في اتجاه الشيسيتية.

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، وهذا يعني أن الحرارة المرتفعة أحدثت تغيرا نهائيا في خصائصه دون حدوث الانصهار، وتبين التفاعلات التالية بعض التحولات العيدانية خلال هذه الظاهرة:

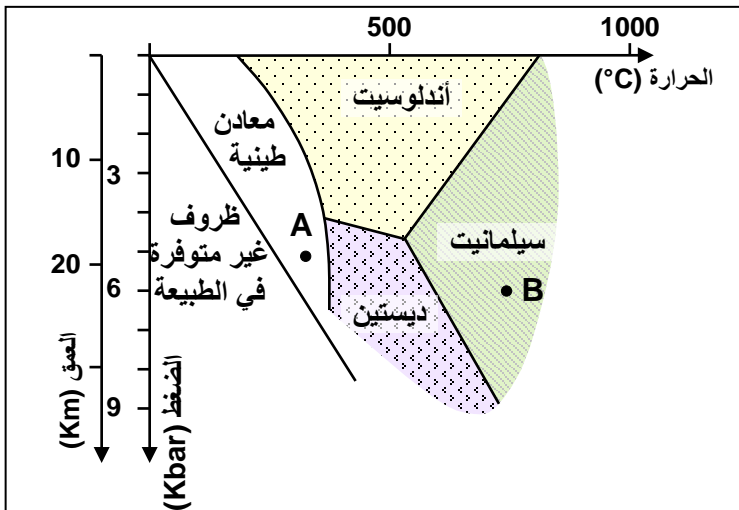


b - تجربة Winkler: أنظر الوثيقة 5 شكل ب.

<p>الشكل ب: تجربة Winkler: أخضع الباحث Winkler ومساعدوه صخورا طينية لضغط ثابت (2Kbar) مع ارتفاع تدريجي لدرجة الحرارة:</p> <p>* عند 570°C تظهر معادن جديدة كالبيوتيت والأندلوسيت حسب التفاعل التالي:</p> $\text{Al}_4\text{SiO}_4(\text{OH})_8 + 2\text{SiO}_2 \rightarrow \text{SiO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{Al}_2\text{SiO}_5$ <p>كاولينيت أندلوسيت</p> <p>* عند 700°C يبدأ الانصهار حيث يصبح الوسط يضم جزأين: جزء صلب يحتوي على البيوتيت والسيليمانيت، وجزء سائل ناتج عن الانصهار الجزئي للمادة الأصلية.</p>

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 الوثيقة 5 شكل ج.



الشكل ج: تجربة Richardson ومساعدوه:

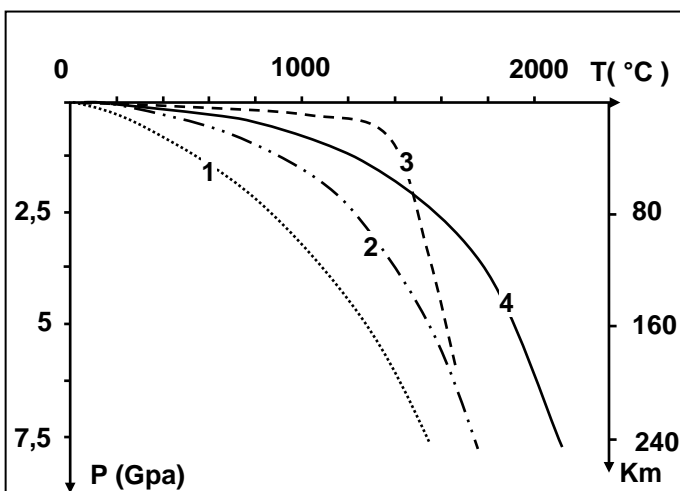
أخضع هؤلاء الباحثون عينات من خليط من سيليكات الألومين لدرجة حرارة وضغط مرتفعين ومتغيرين، فاستطاعوا تحديد مجال استقرار المعادن الثلاثة: الأندلوسيت Andalousite، والسيلمانيت Sillimanite، والديستين Disthène، (أنظر المبيان أمامه) تمثل الخطوط المستقيمة حدود مجال استقرار كل معدن، ويعبر الخط الفاصل بين مجالين عن الظروف اللازمة لكي يتم التفاعل العياني، وبالتالي تحول معدن إلى آخر.
انطلاقاً من تحليل معطيات هذه الوثيقة:

- * أعط التفاعل العياني الذي يمكن أن يحصل عند مرور صخرة من الظروف A إلى الظروف B .
- * بين سبب الاختلاف في التركيب العياني بين الصخور المتحولة، وماذا نعني بمجال استقرار معدن معين؟ وفيما يفيد تواجد هذا المعدن في صخرة ما؟

يتبين من معطيات التجربة أن 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.

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 N ضغط مرتفع)، بذلك تنعت هذه المعادن بالمعادن المؤشرة.

② ظروف التحول في الطبيعة: أنظر الوثيقة 6.



الوثيقة 6: ظروف التحول في الطبيعة.

* تزداد درجة الحرارة مع العمق في باطن الأرض وتكون هذه الزيادة ما يسمى الدرجة السعيرية (أنظر المبيان أمامه) **le gradient géothermique**، وتتغير حسب التركيب الداخلي والطبيعة الجيولوجية للمنطقة، وتكون منخفضة في المناطق المستقرة جيولوجياً ومرتفعة في المناطق النشطة.

* تخضع المواد في باطن الأرض لضغط تتناسب أهميته مع العمق وكثافة الصخور التي تعلوه. ويسمى بضغط الغلاف الصخري. وتحدد قيمته بالعلاقة التالية:

$$P = \frac{\text{وزن العمود الصخري}}{\text{مساحة قاعدته}}$$

- 1 = متوسطة الدرجة السعيرية القارية
- 2 - - - - = متوسطة الدرجة السعيرية المحيطية
- 3 - - - - = الدرجة السعيرية أسفل الدروة
- 4 ————— = الدرجة السعيرية بالنقطة الساخنة

تضم الصخور بين بلوراتها بعض الموائع (H₂O, CO₂) تتسبب في ضغط إضافي هو الضغط الجزيئي للموائع.

أ - درجة الحرارة:

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

ب - الضغط:

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.

IV - مفهوم المعدن المؤشر والسلسلة التحولية.

① مفهوم التحول والمعدن المؤشر: أنظر الشكل أ، ب، ج وثيقة 7.

الشكل أ: تحول الكلويفان إلى أكتنوت (مقبول أخضر) في بازلت متحول		الوثيقة 7: المعدن المؤشر والمتتالية التحولية	
		<p>* يعطي الشكل أ من الوثيقة ملاحظة بالضوء المستقطب لصفحة دقيقة لبازلت محيطي قديم متحول، مع رسم تفسيري لهذه الملاحظة. يبرز هذا الشكل مظهرا من مظاهر التحول، بين ذلك.</p>	
<p>الشكل ب: متتالية تحولية لصخور طينية وتركيبها العيداني.</p>		<p>* يعطي الشكل ب متتالية تحولية لصخور طينية وتركيبها العيداني</p>	
طين	شيبست	سبيرسيت	<p>* يعطي الشكل ج تغير التركيب العيداني حسب ظروف الضغط ودرجة الحرارة، أي حسب ارتفاع شدة التحول.</p>
طين ألوميني	ميكاشيست	موسكوفيت	
سلكاتات	غنايس	أندلوسيت	<p>‡ حلل معطيات الجدولين أ وب واستنتج.</p>
مميهة + Ca	موسكوفيت متبق	فلدسبات بوتاسي	
طين حديد مغنيزي	بيجادي Grenat	بيوتيت Biotite	<p>‡ انطلاقا من كل المعطيات السابقة، أعط تعريفا لمفهوم التحول، المعدن المؤشر والمتتالية التحولية.</p>
كلوريت	بيوتيت Biotite	بيوتيت Biotite	
تحول متزايد			
<p>الشكل ج: تغير التركيب العيداني حسب ظروف الضغط ودرجة الحرارة (ارتفاع شدة التحول).</p>			
الصخور	التفاعلات	المعادن المميزة	ارتفاع شدة التحول
ميكاشيست ذو موسكوفيت	كلوريت + موسكوفيت	موسكوفيت وكلوريت	<p>↑ ارتفاع شدة التحول</p> <p>↓</p>
ميكاشيست ذو نوعين من الميكا	بيجادي + بيوتيت	موسكوفيت متبق	
غنايس ذو نوعين من الميكا	مرو + موسكوفيت	بيوتيت (اختفاء الكلوريت)	
غنايس ذو بيوتيت	سيلمانيت + أرتوز سيلمانيت + مرو + بيوتيت	بيوتيت وسيلمانيت (اختفاء الموسكوفيت)	
غنايس أبيض	كوردبيريت + مرو	اختفاء البيوتيت	

ii تظهر ملاحظة الصفيحة الدقيقة للبازلت اختفاء الكلوكوفان وظهور الأكتينوت، وذلك تحت تأثير تغير ظروف التحول.

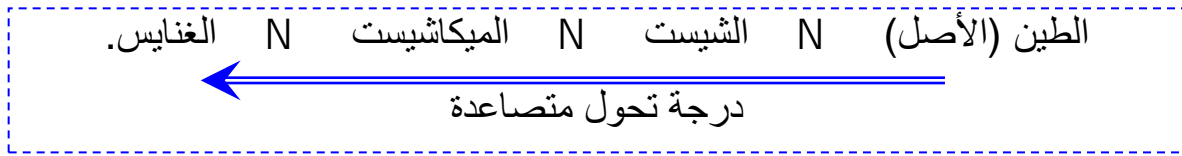
ii تحت تأثير عملي الضغط والحرارة تخضع الصخور لتحول، حيث نمر من تركيب عيداني لآخر، وذلك باختفاء معادن وظهور أخرى أكثر استقرارا في الظروف الجديدة.

ii تعريف التحول، المعدن المؤشر والمتتالية التحولية.

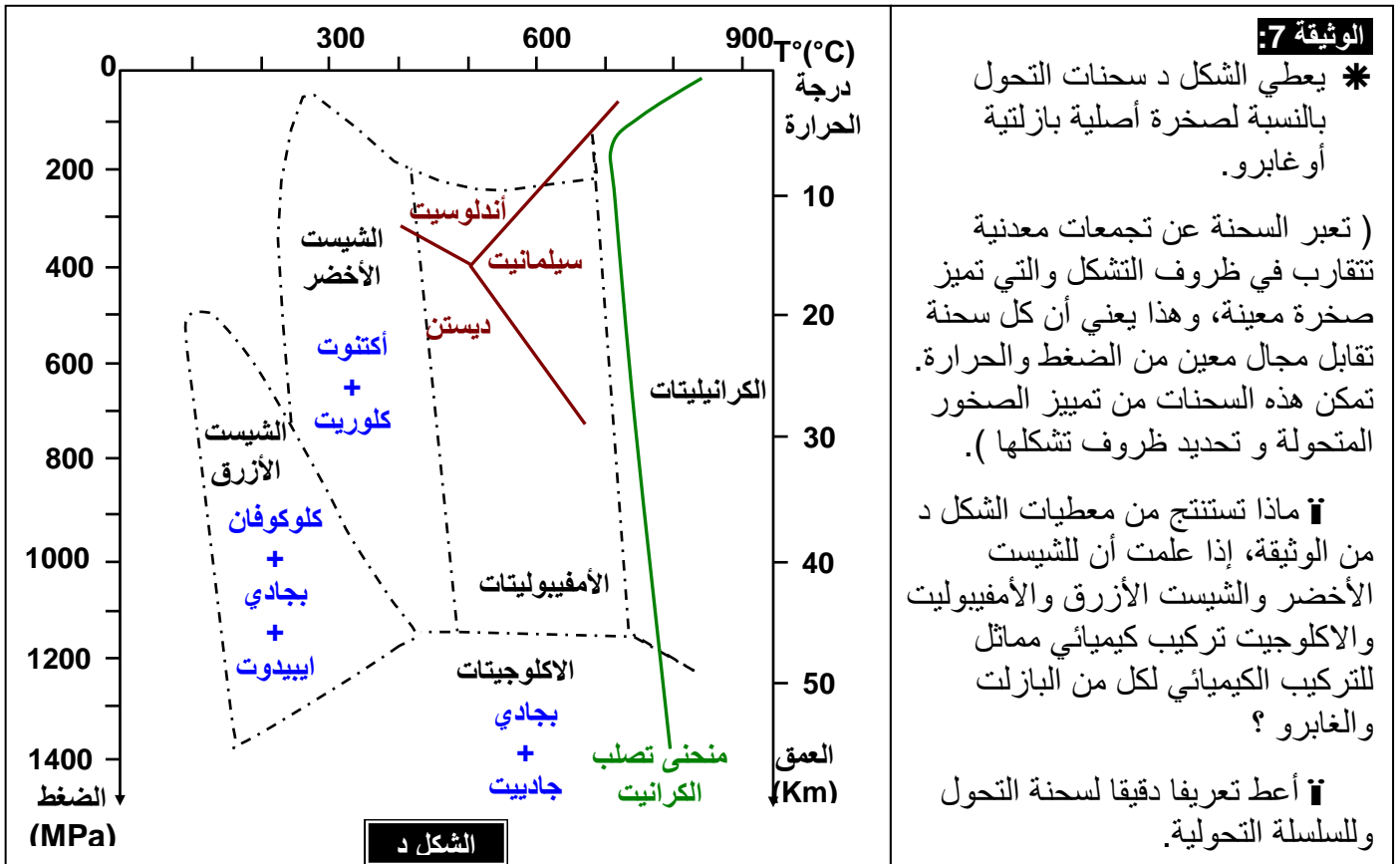
a التحول: هو مجموعة من التغيرات البنيوية والعيدانية التي تطرأ على صخرة سابقة الوجود (رسوبية، صهارية أو متحولة)، في حالتها الصلبة، بفعل عملي الضغط أو الحرارة أو هما معا.

a 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 والبيجادي في الصخور المتحولة لمناطق الطمر يعد شاهدا على تعرض هذه الأخيرة لضغط عال.

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



② مفهوم سحنة التحول والسلسلة التحولية: أنظر الشكل د وثيقة 7.



١١ يتبين من معطيات الوثيقة أن هناك اختلاف في التركيب العيداني لكل من الشيست الأخضر والشيست الأزرق والاكولوجيت والأمفيوليت. ويرجع هذا الاختلاف إلى اختلاف ظروف الحرارة والضغط الذي تكون فيه كل منها.

١٢ تعريف كل من سحنة التحول والسلسلة التحولية.

a 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.

a 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، نتعرف على سحنة التحول والمنتالية المنتمية 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 8.

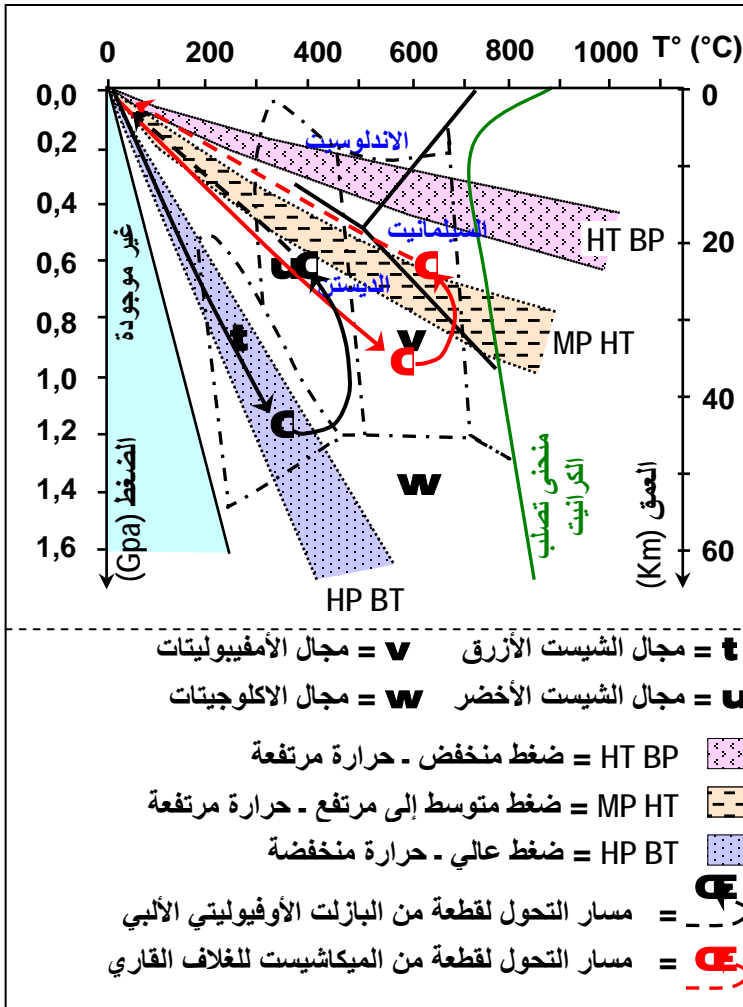
الوثيقة 8: مجالات التحول في الطبيعة.

ترتبط أنواع التحول بدينامية الصفائح، لذا فهي تختلف من مكان لآخر. واعتمادا على تغير الضغط والحرارة في أعماق الغلاف الصخري، وضع Winkler تصورا يحدد مختلف أنواع التحول حسب مجالات تأثير هذين العاملين معا.

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

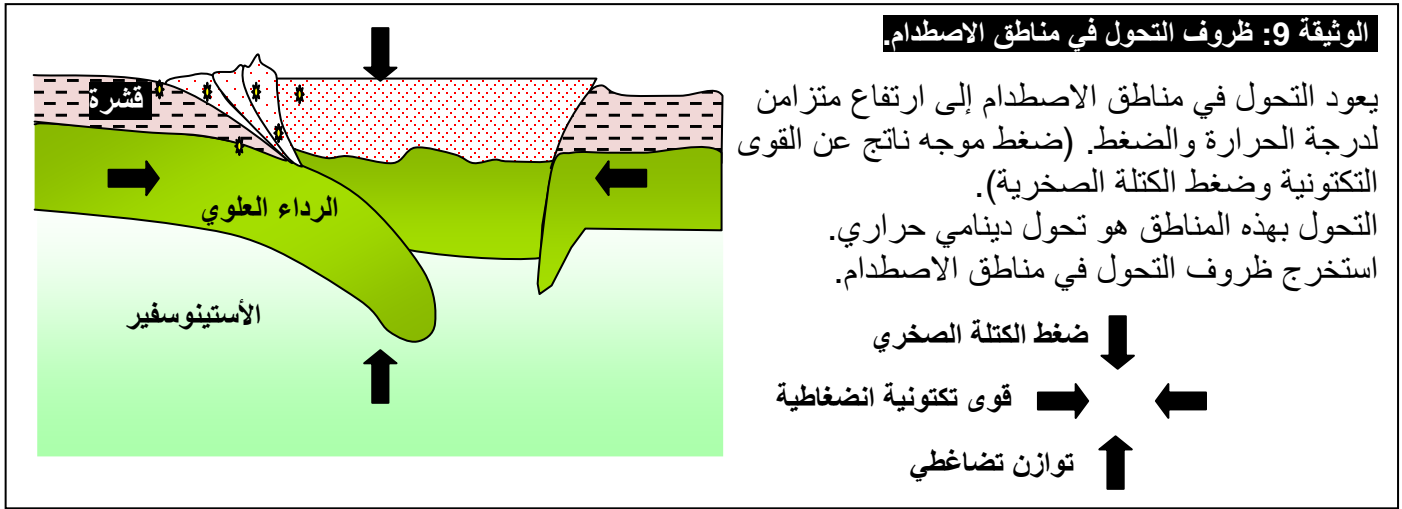
تمثل الوثيقة أمامه مختلف أنماط التحول في الطبيعة. اعتمادا على معطيات الوثيقة:

- 1) عرف مختلف أنواع التحول.
- 2) تتبع مسار تحول الصخور المدروسة واربط العلاقة بين هذا المسار وسحنات التحول، والظروف السائدة في كل من مناطق الاصطدام ومناطق الطمر.



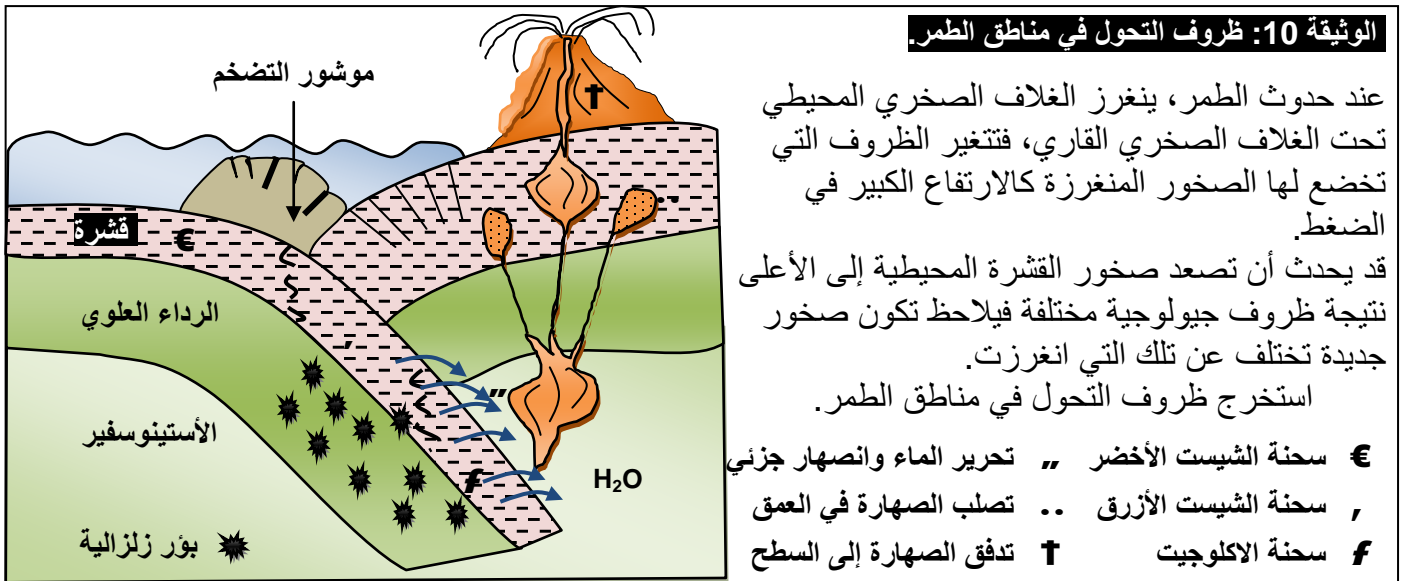
يتبين من معطيات هذه الوثيقة أن تحول الصخور مرتبط بتغير عاملي الضغط والحرارة، وهذه الأخيرة ترتبط بدينامية الصفائح. وهكذا يمكن تحديد عدة مجالات للتحول: التحول الدينامي Dynamique والتحول الدينامي الحراري Thermo-dynamique والتحول الحراري Thermique.

② ظروف التحول في مناطق الاصطدام: أنظر وثيقة 9.



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

③ ظروف التحول في مناطق الطمر: أنظر وثيقة 10.



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.