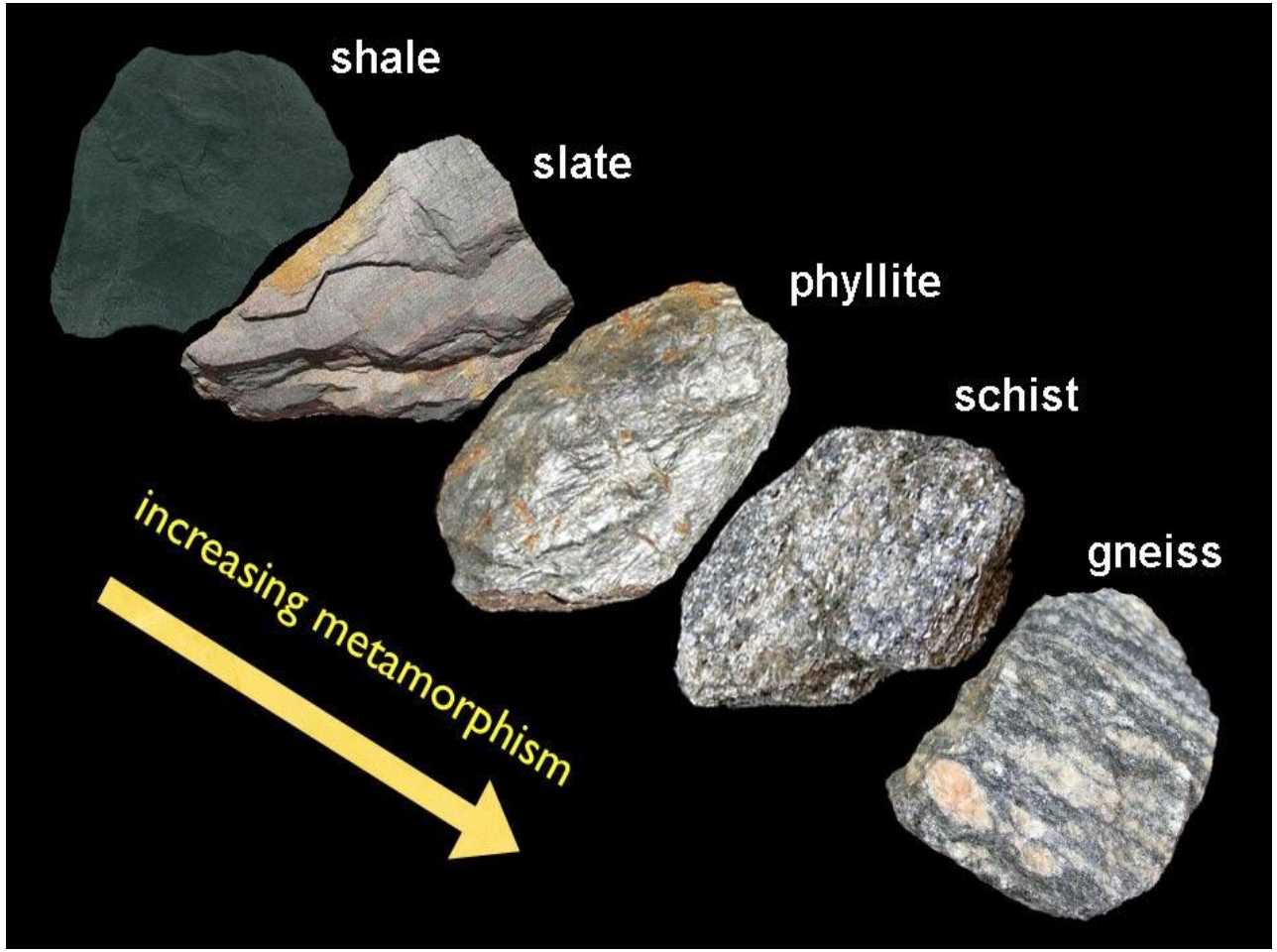
مقرر جيولوجيا هندسية

لطلاب الهندسة المدنية

مدرس المقرر

د.م. مهند سليم مهنا

الصخور المتحولة



- ما عملية التحول وما خصائص الصخور المتحولة ؟
- ما العوامل المسببة للتحول ؟ وما أشكاله؟
- ما درجات التحول؟ و المنيرالات الدليلية ؟
- مراحل تحول الصخر الغضاري (الحجر الطيني)؟
- مراحل تحول الصخر البازلتي ؟
- ما نسيج الصخور المتحولة ؟ وكيف تصنف؟
- ما أهم أنواع الصخور المتحولة ؟

تعريف عملية التحول و الصخور المتحولة

- إن كلمة تحول Metamorphism مشتقة من اللغة اليونانية، حيث (Meta) تعني التحول والتغير، و(morphos) تعني الشكل، أي التغير في الشكل. وبالعودة إلى دورة تشكل الصخور نجد أن عملية التحول تعني انتقال و تغير أحد أنواع الصخور الموجودة إلى نوع آخر من الصخور ندعوها الصخور المتحولة.
- الصخور المتحولة (ثانوية المنشأ) تنشأ من تحول الصخور الموجودة سابقاً (الرسوبية أو النارية أو حتى المتحولة) ولكن غالباً ما تنشأ الصخور المتحولة عن الصخور رسوبية.
- كل صخر متحول ينتج من خلال عمليات التحول عن صخر آخر ندعوه الصخر الأصل (الصخر الأب/Parent rock).
- يمكن تعريف عملية التحول Metamorphism بأنها العملية التي تؤدي إلى التغير الذى يطرأ على صخر سابق، حيث يحدث هذا التغير في النسيج و/أو التركيب المنيرالي أو أحياناً في التركيب الكيميائي.
- تحدث عملية التحول عندما تتعرض الصخور الموجودة (الصخور الأصل/الأب) إلى ظروف جديدة، من حرارة و/أو ضغط متزايدين، مختلفة بشكل كبير عن الظروف الأولية التي تشكل فيها الصخر الأصل. و كرد فعل على هذه الظروف الجديدة يبدأ الصخر بالتغير التدريجي حتى يصل إلى حالة استقرار مع الظروف الجديدة.
- أحياناً تكون شدة التحول كبيرة بحيث تضيع معالم الصخر الأصل.

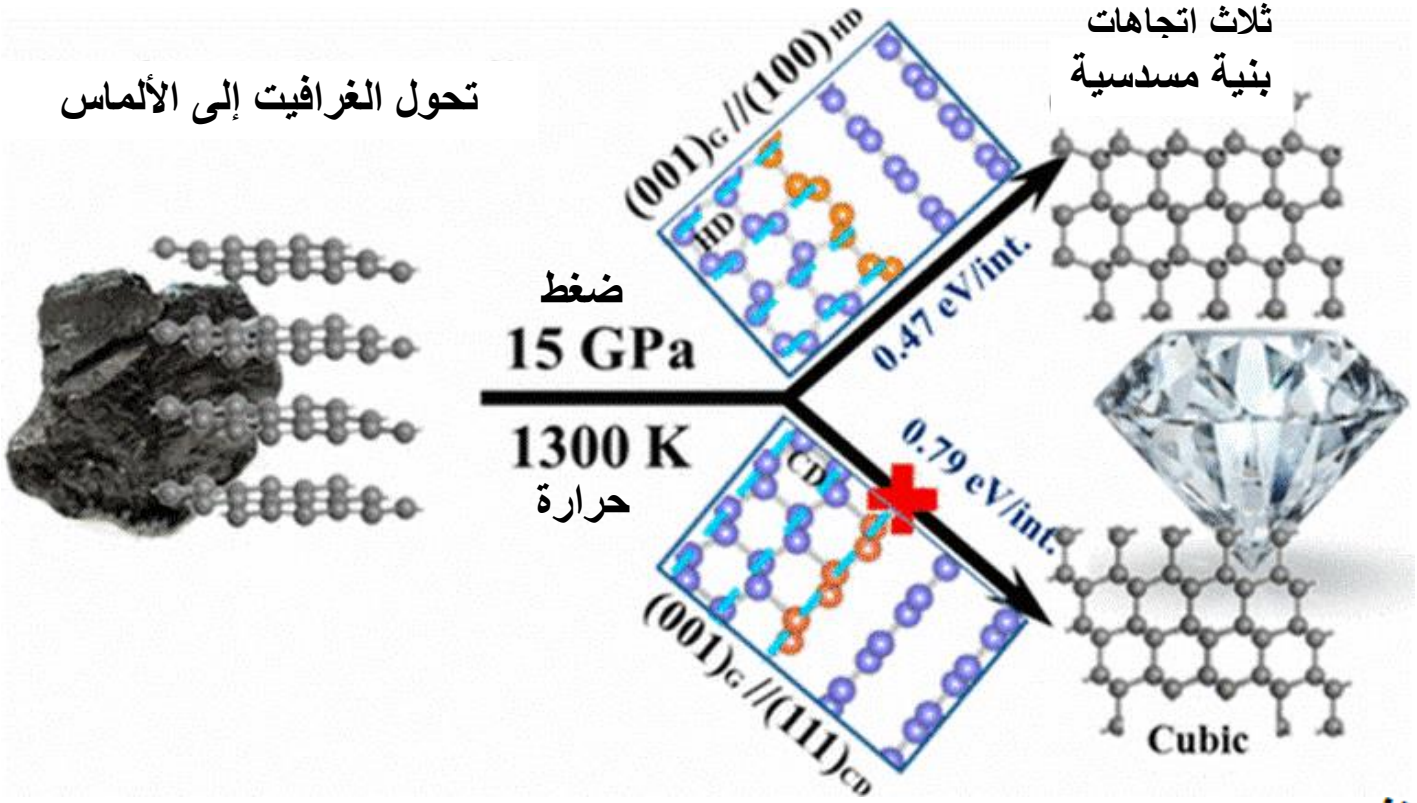
أهم العوامل المسببة للتحول هي:

- الحرارة (Temperature: T)
- الضغط (Pressure: P)
- المحاليل والغازات النشطة كيميائياً (Chemical active fluids)

إن هذه العوامل قد تؤثر بشكل منفرد أو مجتمعةً و يمكن أن يلعب أحد العوامل دوراً أكثر من العوامل الأخرى، حيث أن الصخور تتكون من منيرالات و هذه المنيرالات تكون مستقرة ضمن مجال محدد من الضغط و الحرارة، فعند تغيرهما تتشكل منيرالات جديدة تكون مستقرة في الظروف الجديدة.

مثال: تحول الغرافيت إلى ألماس:

في ظروف من الحرارة و الضغط المحددين ما دون المستقيم الموضح بالشكل جانباً و المتعلق بالحرارة و الضغط يكون الغرافيت مستقراً و عندما تتغير الشروط و يزداد الضغط و الحرارة من أجل أعماق أكبر يصبح الغرافيت غير مستقراً و يتحطم و تعيد ذرات الكربون تموضعها ضمن الشبكة البلورية بما يتناسب مع الظروف الجديدة و يتكون منيرال جديد هو الألماس الذي له نفس التركيب الكيميائي للغرافيت (C) و لكن مختلف عنه في الكثير من الخواص الفيزيائية. و بالتالي الألماس يحتاج إلى ظروف محددة ليتشكل وهي ضغط عالي نسبياً و حرارة عالية



العوامل المسببة للتحول

1. العامل الأول (الحرارة): تساهم الحرارة في عملية التحول وتأتي من مصدرين رئيسيين هما:

a. الحرارة المتزايدة نتيجة التدرج الجيوحراري مع العمق (أي تزداد الحرارة مع العمق بحدود 30°C/km)

b. الحرارة المنتقلة خلال عملية التحول التماسي والناتجة عن اندفاع الماغما المنصهرة واختراقها للطبقات الصخرية التي تعلوها

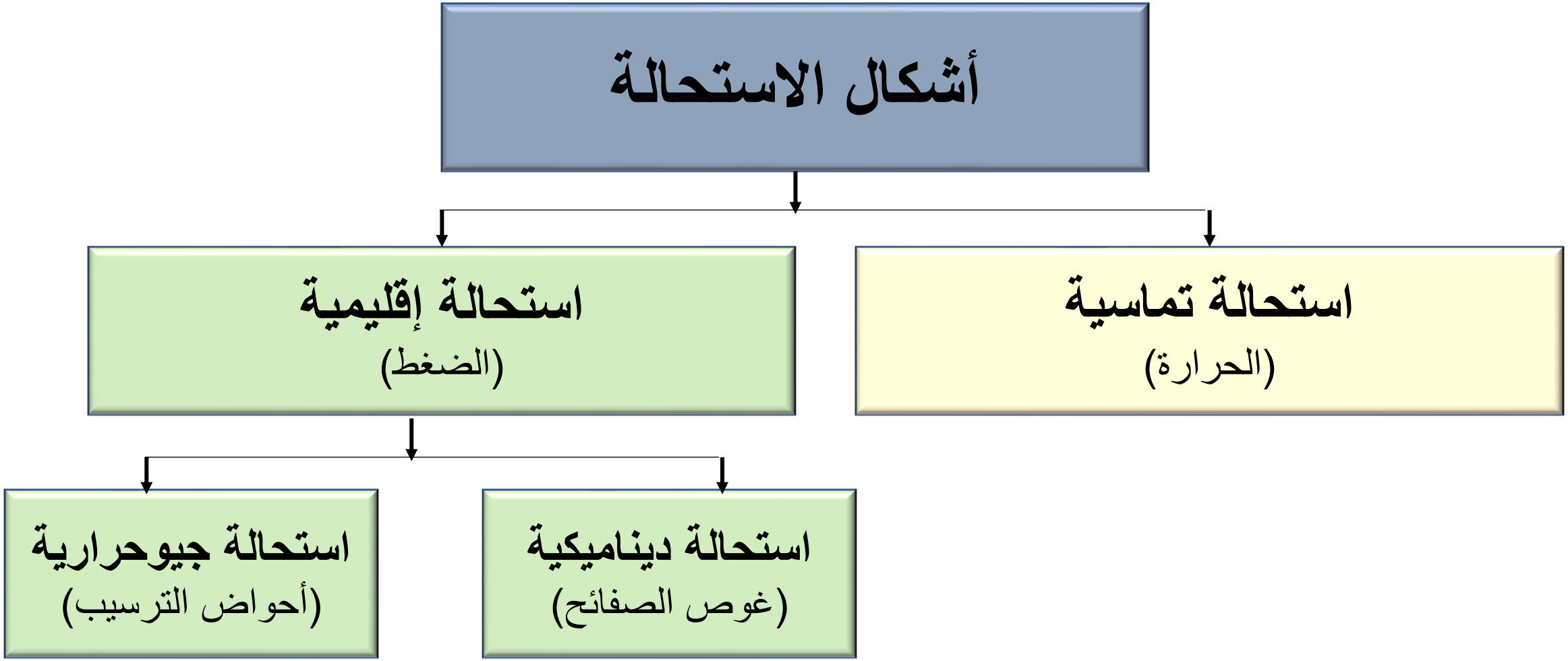
2. العامل الثاني (الضغط): نميز بين نوعين من الضغوط أو الإجهادات التي تتعرض لها الصخور:

a. الضغط أو الإجهاد الجيوستاتيكي: وهو الضغط الناتج عن وزن الطبقات (أفقياً وشاقولياً)

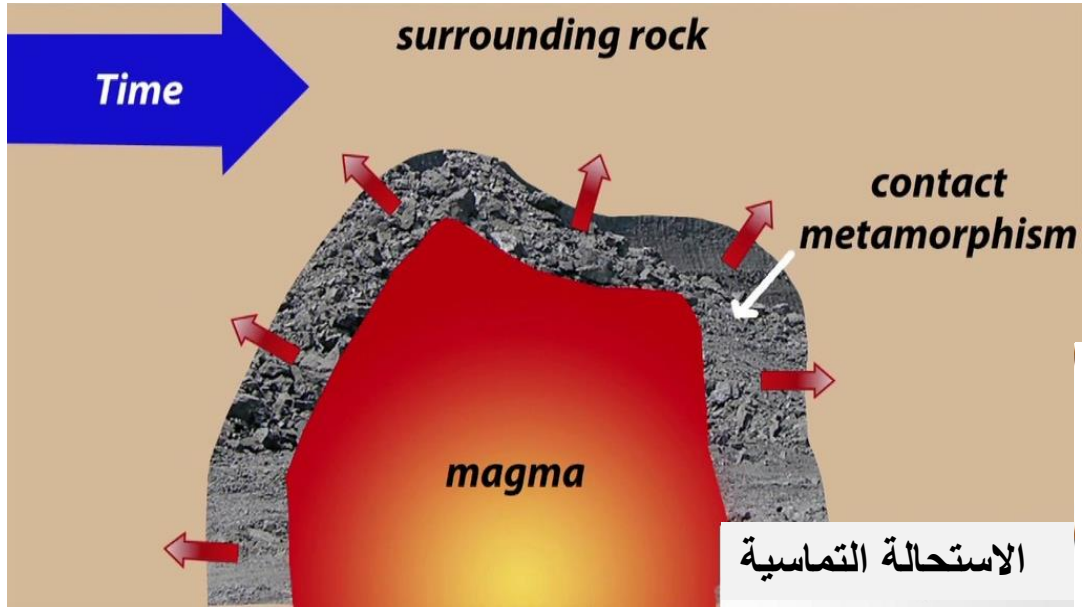
b. الضغط أو الإجهاد التكتوني: وهو الضغط الناتج عن القوى التكتونية التي تؤدي إلى حركة الصفائح القارية

3. العامل الثالث : المحاليل والغازات النشطة كيميائياً:

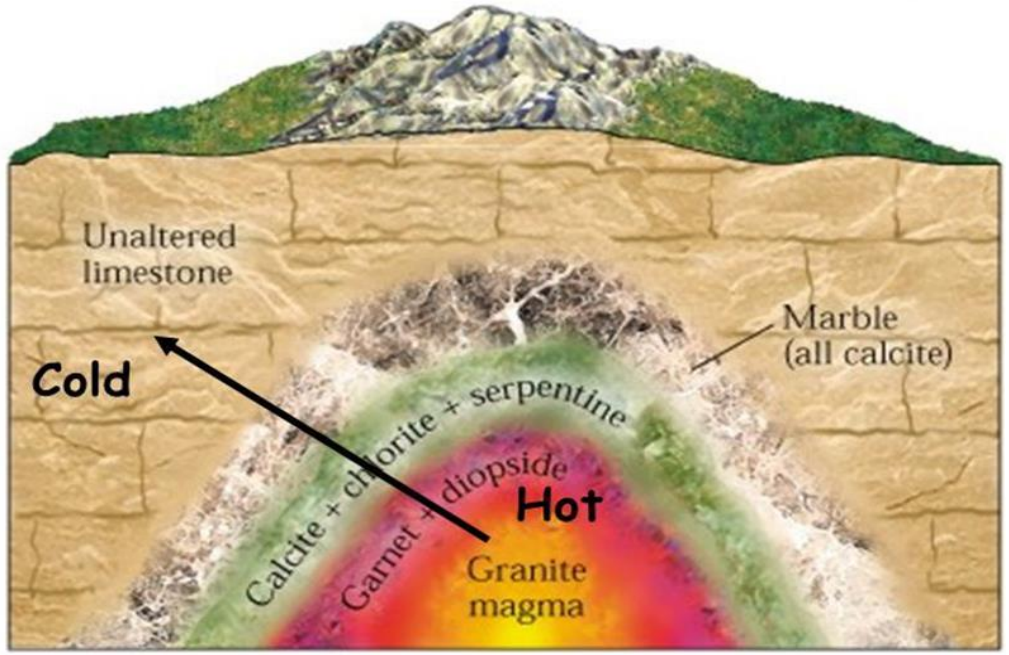
تؤثر الغازات والأبخرة المحملة بعناصر كيميائية متعددة على الصخور، حيث تتفاعل هذه الغازات مع الصخور في ظروف الحرارة المرتفعة، مما يؤدي إلى إعادة تبلور للمواد الأولية وإلى تغير كبير في النسيج والتركيب الكيميائي للصخور.


أشكال الاستحالة
استحالة تماسية
(الحرارة)
استحالة إقليمية
(الضغط)
استحالة ديناميكية
(غوص الصفائح)
استحالة جيوحرارية
(أحواض الترسيب)

أشكال التحول (الاستحالة):



الاستحالة التماسية



1. **الاستحالة التماسية (Contact Metamorphism):**

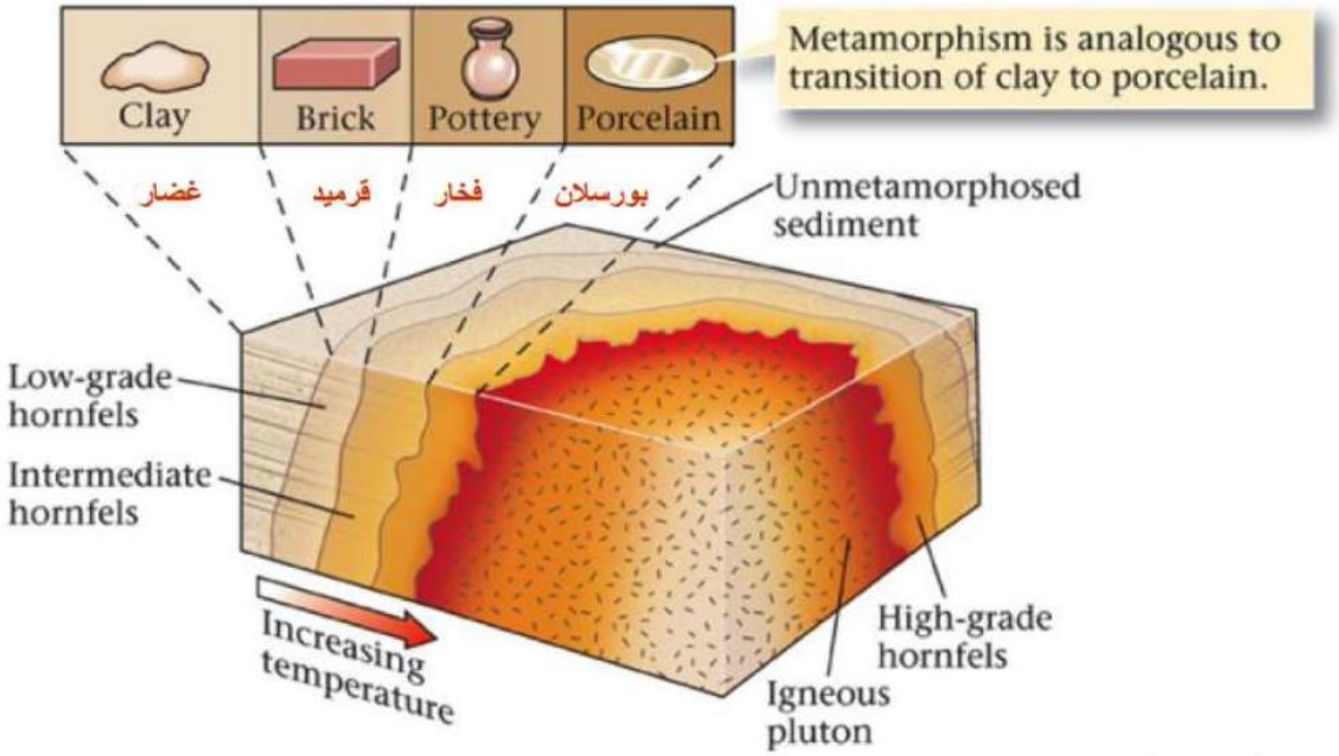
- تسمى أحياناً التحول الحراري لأن العامل الرئيسي في الاستحالة هنا هو العامل الحراري،
- يحدث هذا الشكل من التحول نتيجة اندفاع الماغما نحو الطبقات العليا و اختراقها للطبقات الصخرية الموجودة و تماسها معها بشكل مباشر،
- تسمى المنطقة المتأثرة بالتحول الحراري (الهالة : Aureole
- تكون المنطقة المتأثرة بالتحول محدودة نسبياً من عدة أمتار حتى عدة كيلومترات

الاستحالة التماسية لا ينتج عنها أي تورق أو تشكل نسيج صفائحي في الصخر المتحول،
أهم الامثلة على الصخور المتحولة حرارياً (استحالة تماسية):

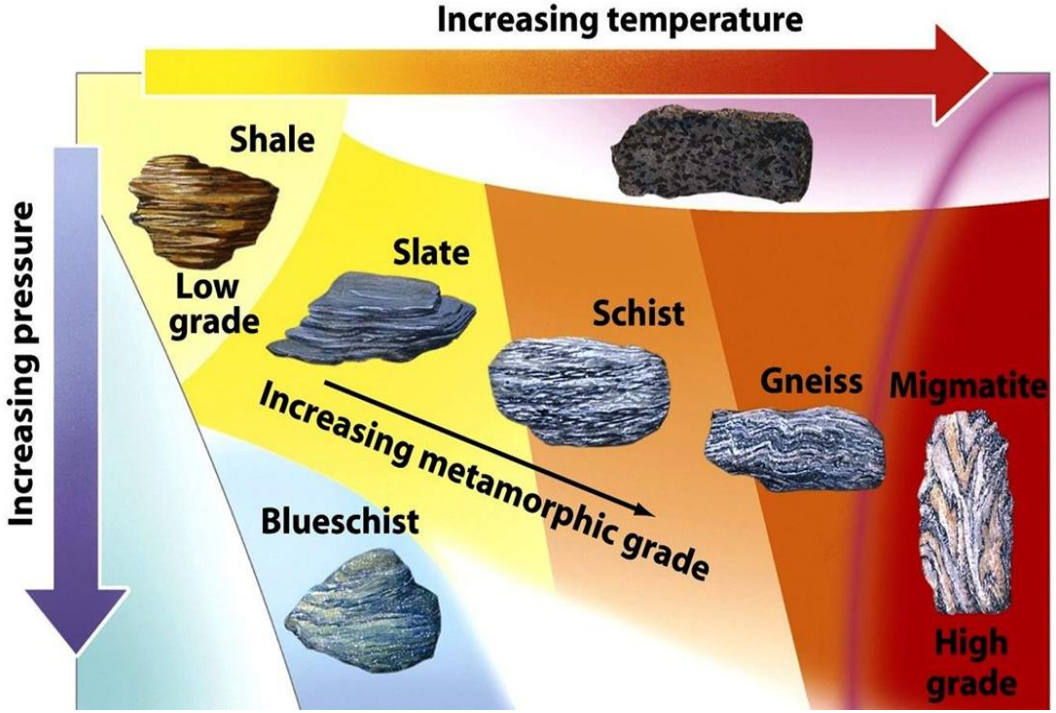
السربنتين، الرخام، الكوارتزيت

يتعرض الصخر الغضاري لدرجات مختلفة من التحول الحراري (التماسي) حسب قربه من الجسم المغماتي، حيث يتحول إلى أردواز ثم شيست ثم نايس.

يمكن تشبيه استحالة الغضار هذه بعملية تصنيع الغضار إلى بورسلان مروراً بالقرميد والفخار.

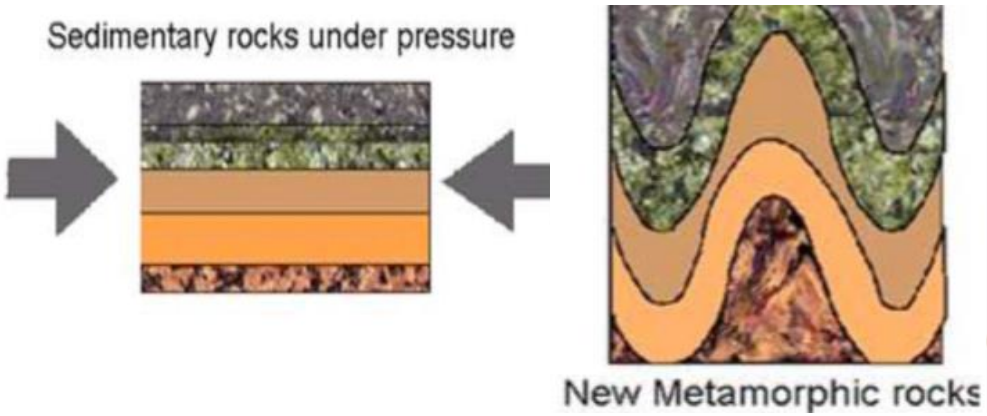


أشكال التحول (الاستحالة):



2. **الاستحالة الاقليمية (Regional Metamorphism):**

- **استحالة ديناميكية في مناطق غوص الصفائح :**
  - يحدث هذا الشكل من التحول عادة بسبب عمليات جيولوجية كبيرة (حركات تكتونية مشكلة للجبال) ،
  - إن العامل الرئيسي في الاستحالة هنا هو الضغط (اجهادات و قوى تكتونية عالية)
  - تكون المنطقة المتأثرة بالتحول ممتدة على مساحات كبيرة جداً بالمقارنة مع الاستحالة التماسية .
  - الاستحالة الإقليمية ينتج عنها تورق وتشكل نسيج صفائحي في الصخر المتحول وكذلك تجعدات وانثناءات
  - أهم الامثلة على الصخور المتحولة بالضغط اقليمياً (استحالة ديناميكية): النايس ، الشيست



- **استحالة جيو-حرارية في أعماق أحواض الترسيب:**
  - يحدث هذا الشـــكل من التحول عادة نتيجة تراكم الطبقات الرســـوبية لأعماق كبيرة في أحواض الترســـيب (زيادة الاجهادات الجيوســـتاتيكية) وبســـبب ارتفاع درجات الحراة الجيو-الحراري(ازدياد الحرارة التدريجي مع العمق) حيث تبدأ الاستحالة عند عمق 8 كم تقريباً حيث تكون درجة الحرارة بحدود 200 درجة.
  - تكون المنطقة المتأثرة بالتحول ممتدة على مساحات كبيرة جداً بالمقارنة مع الاستحالة التماسية .
  - عوامل الاستحالة هنا هي الضغط و الحرارة، و تكون درجة التحول منخفضة نسبياً.
  - ينتج عنها تورق وتشكل نسيج صفائحي مستوي بدون تجعدات وانثناءات وأهم الامثلة :الأرجيليت و الأردواز

ما هو دور الصخر الأصلي في عملية التحول (الاستحالة) ؟

الصخر الأصلي يقدم المنيرالات المصدر التي ستتحول إلى منيرالات جديدة و في بعض أنواع الاستحالة (كحالة الاستحالة التماسية) يكون للصخر المتحول نفس التركيب المنيرالي للصخر المصدر(الصخر الأصل أو الأب) الذي تحول عنه على سبيل المثال:

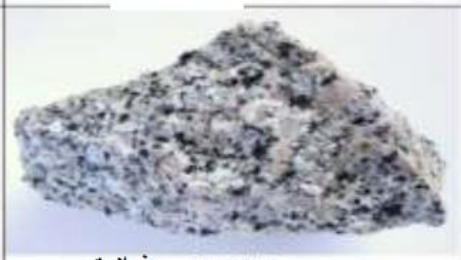
Parent rock	الصخر الأصل (الأب)		الصخر المتحول (Metamorphic rocks)
Sandstone	الحجر الرملي (صخر رسوبي)	←	Quartzite كوارتزيت (صخر متحول)
Granite	الغرانيت (صخر ناري أو مغماتي)	←	Gneiss نايس (صخر متحول)
Limestone	الحجر الكلسي (صخر رسوبي)	←	Marble الرخام (صخر متحول)

Peridotite البيريدوتيت (صخر ناري) ← السربنتين/ أو التالك (صخر متحول)

Slate	
Phyllite	

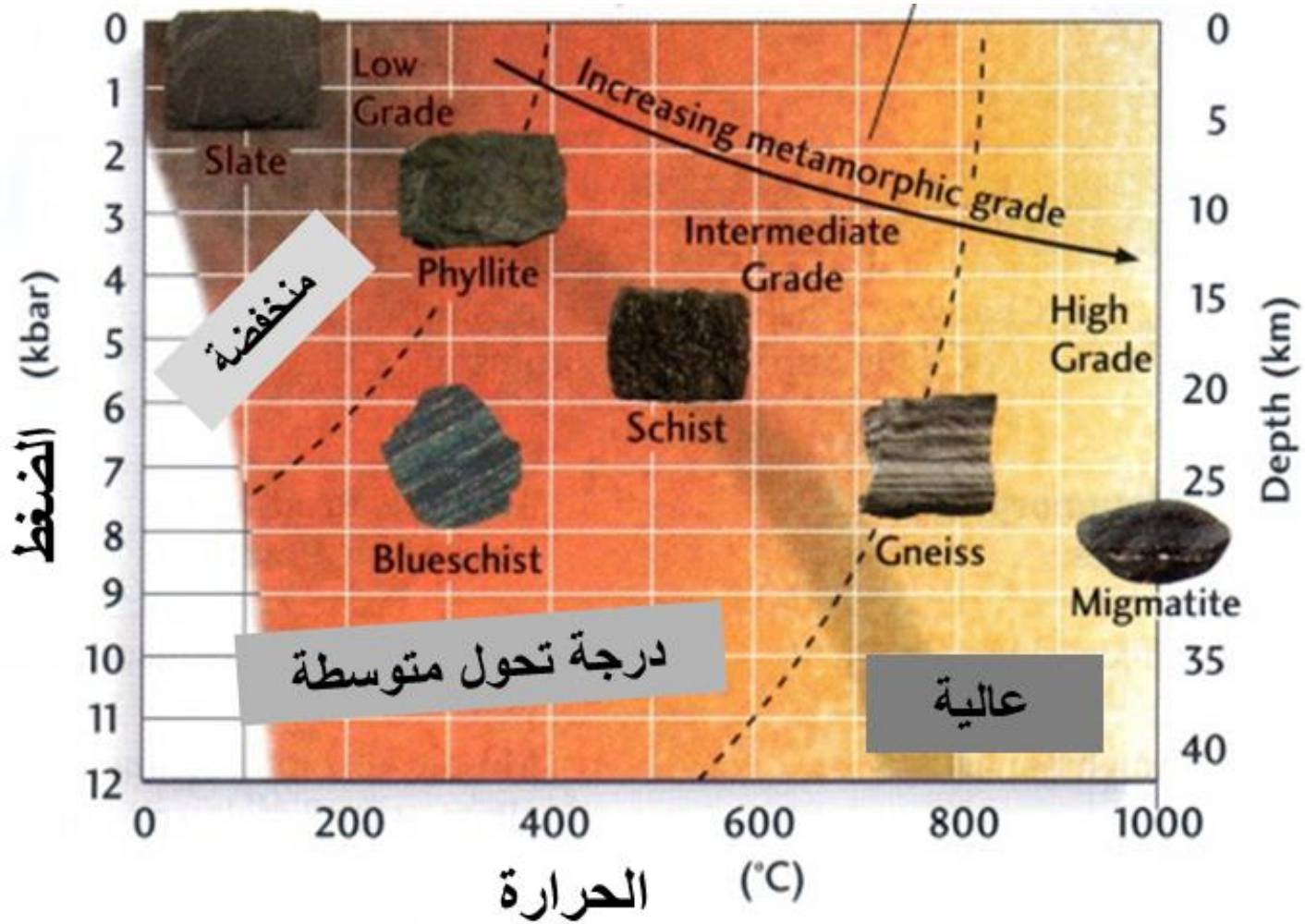
Schist	
Gneiss	

Quartzite	
Marble	

شكل التحول	الصخر الأصل (الأب)		الصخر المتحول
Type of Metamorphism	Parent Rock		Metamorphic Rock
استحالة إقليمية (بالضغط)	 غرانيت Granite		نايس Gneiss
	صخر طيني Mudstone		نايس/شيست/فيليت ...../أردواز/ارجيليت
استحالة تماسية (بالحرارة)	حجر رملي Sandstone		كوارتزيت Quartzite
	حجر كلسي Limestone		رخام Marble

يمكن تقسيم درجات التحول إلى:

- **درجة التحول المنخفضة (Low Grad):** و هي بيئة تحول ذات درجات حرارة منخفضة من 200-400 و ضغط منخفض نسبياً يوافق عمق بحدود 7.5 – 25 كم .
- **درجة تحول متوسطة (Medium Grad):** و هي بيئة تحول ذات درجات حرارة متوسطة من (300-700°C) و ضغط متوسطة يوافق عمق بحدود 7.5 – 35 كم .
- **درجة تحول عالية (High Grad):** و هي بيئة تحول ذات درجات حرارة عالية من (600-900°C) و ضغط عالي نسبياً يوافق عمق بحدود 7.5 – 35 كم و أكبر و هنا يمكن أن تتعرض الصخور لحالة انصهار جزئي.
- البيئة التي توافق درجات حرارة أعلى من 900 هي بيئة انصهار الصخر و تحوله لماغما و بالتالي يعطي بعد تصلبه صخور ماغماتية أو نارية من جديد.


Low Grade
Slate
Phyllite
Increasing metamorphic grade
Intermediate Grade
High Grade
منخفضة
Schist
Blueschist
Gneiss
Migmatite
درجة تحول متوسطة
عالية
الضغط (kbar)
Depth (km)
الحرارة (°C)
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
0
5
10
15
20
25
35
40
0
200
400
600
800
1000

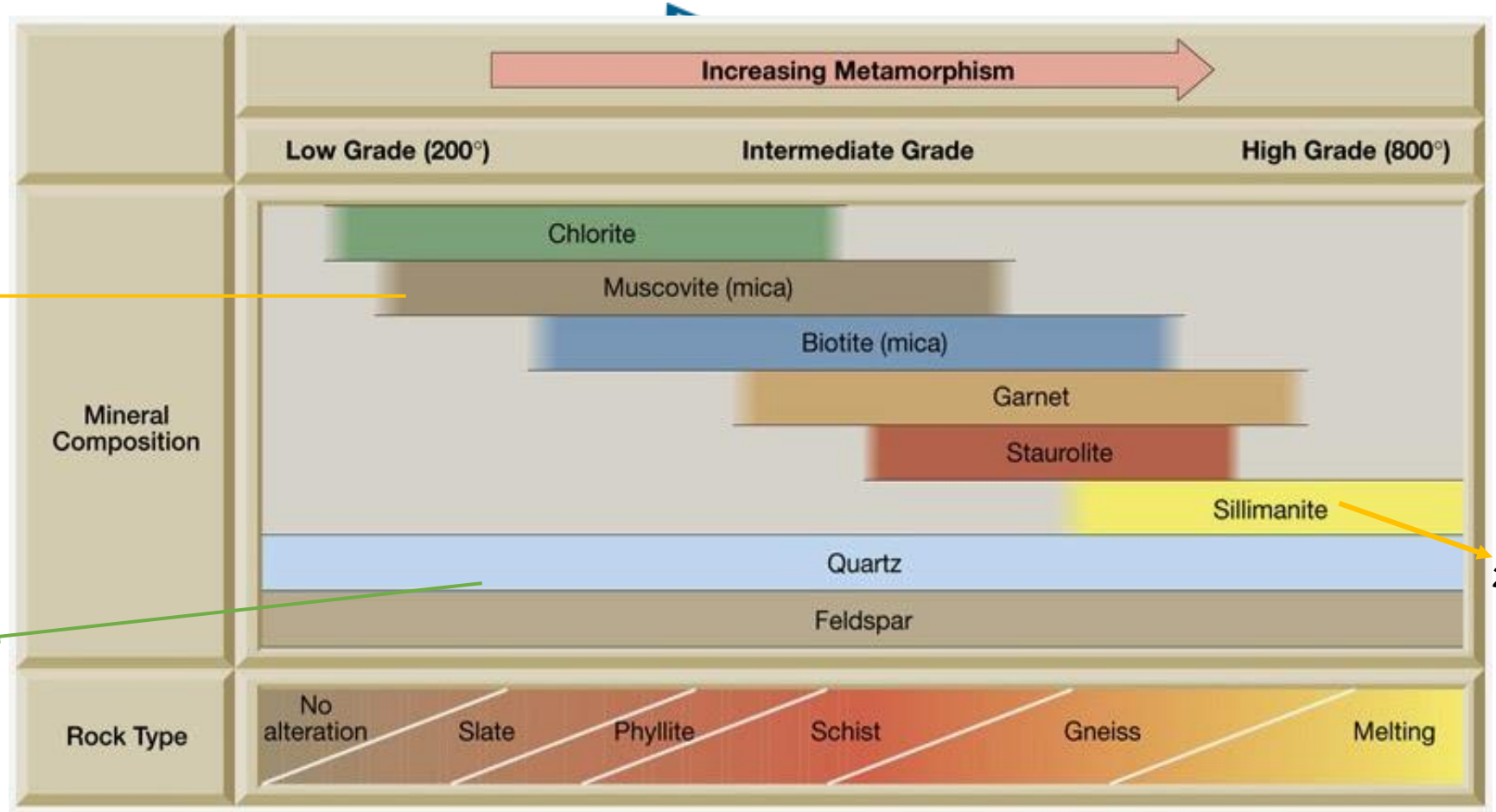
المنيرالات الدليلية (Indices Minerals):

الغارنيت

السليمانيت

وعند كل درجة من درجات التحول تكون هناك صخور متحولة لها تركيب منيرالي يتناسب مع الظروف من الحرارة و الضغط و يكون مستقراً فيها. و يمكن من خلال معرفة التركيب المنيرالي لبعض الصخور الاستدلال على درجة التحول التي تعرض لها هذا الصخر، و هذه المنيرالات التي تعطي فكرة عن درجة التحول ندعوها بالمنيرالات الدليلية. فمثلاً في حالة الصخور المتحولة عن الغضار نلاحظ أن الكوارتز والفلدسبار منيرالات تكون مستقرة عند مجال واسع من تغير الحرارة و لذلك تكون موجودة في كل أنواع هذه الصخور (حسب الشكل) و لكن وجودها لا يعطي فكرة عن درجة التحول التي تعرض لها كل صخر منها. كذلك منيرال الموسكوفيت يكون مستقراً عند درجات حرارة الموافقة لدرجة تحول منخفضة حتى درجة تحول متوسطة، لذلك فوجود هذا المنيرال في صخر متحول يدل أن هذا الصخر تعرض لدرجة تحول منخفضة وحتى متوسطة، و بالتالي تعرض لدرجات حرارة بين 200 – 400 درجة تقريباً. في حين أن وجود منيرال الغارنت يدل أن الصخر تعرض لدرجة تحول متوسطة إلى عالية. وهذا ينطبق على بقية المنيرالات الدليلية (كلوريت ، بيتوتيت، غارنت، ستاورولیت ، كيانيت، سليمانيت)، حيث يدل وجود منيرال السليمانيت على أن الصخر تعرض لدرجات تحول عالية نسبياً.

يمكن ملاحظة أن حجم الحبيبات يتزايد مع تزايد درجة التحول فيكون ناعماً في الصخور ذات درجات التحول المنخفضة ليصبح خشناً في الصخور ذات درجات التحول الشديدة.



الموسكوفيت منيرال دليلي
يؤشر على درجة استحالة منخفضة إلى متوسطة

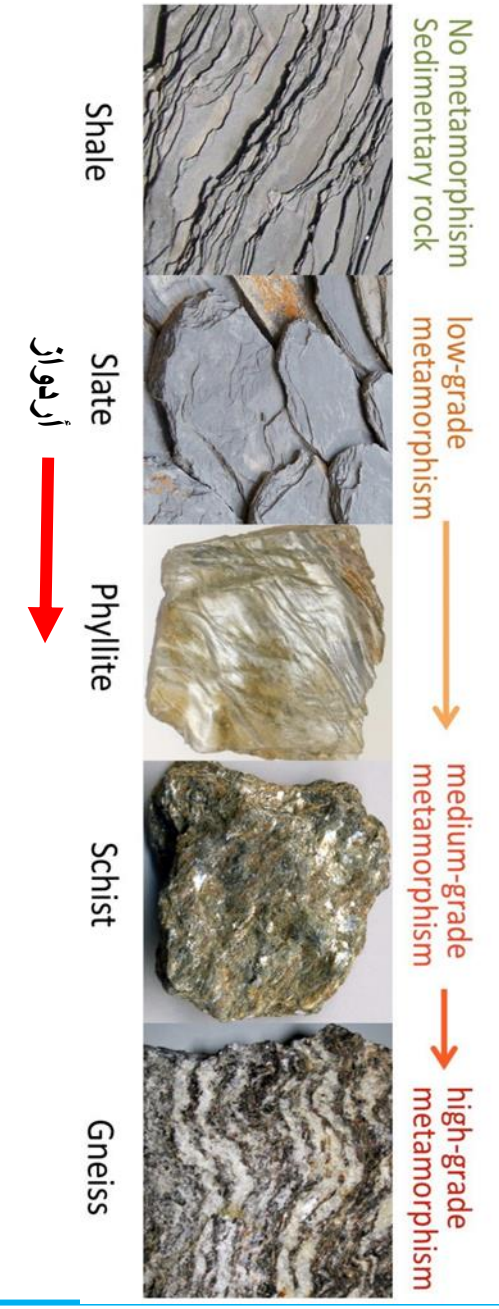
الكوارتز والفيلدسبار منيرالات غير دليلية
لايؤشر وجودها على درجة التحول فهي مستقرة عند مجال واسع من الحرارة

السليمانيت منيرال دليلي
يؤشر على درجة استحالة عالية

مراحل تحول الصخر الغضاري

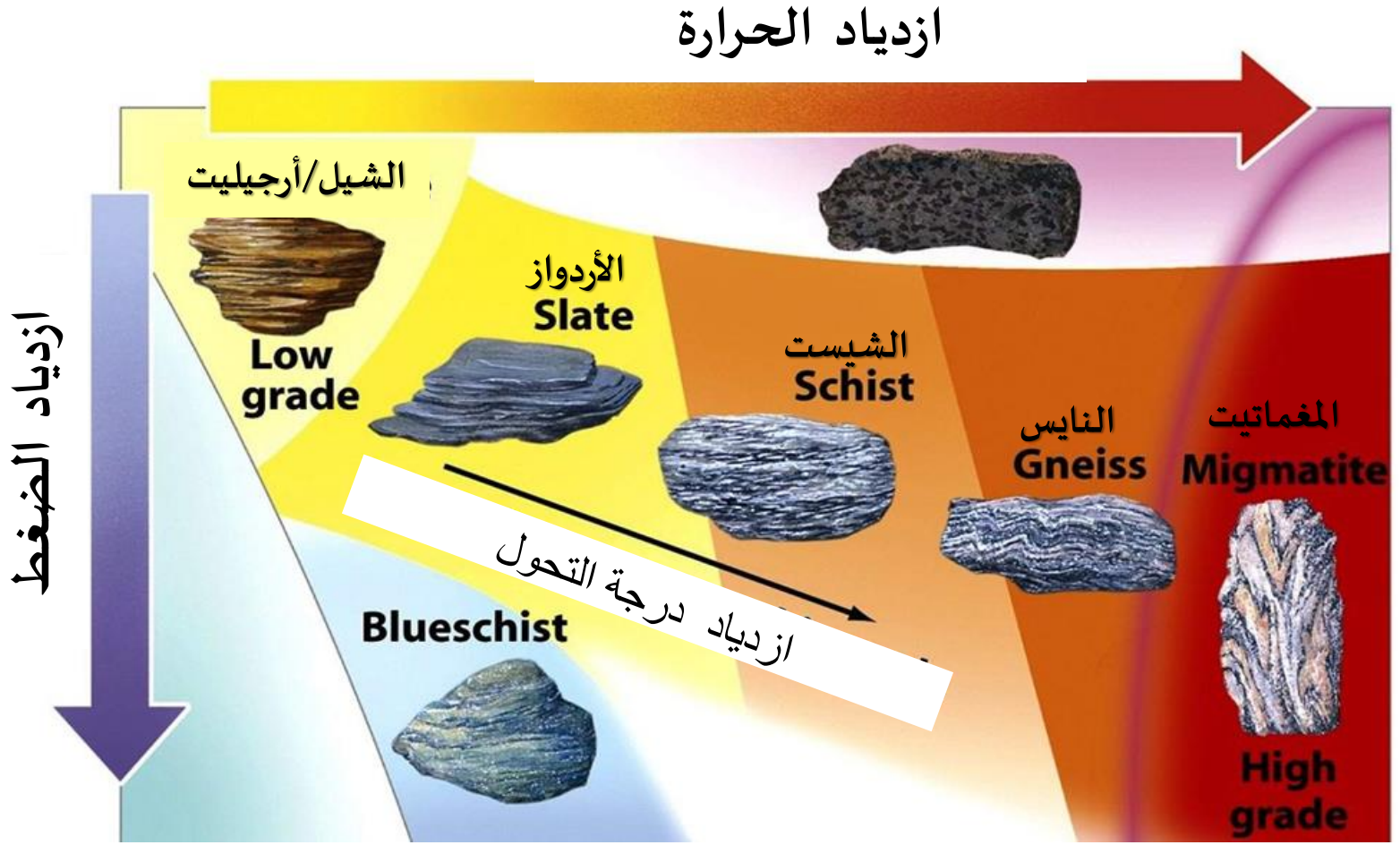
عندما يتعرض الغضار أو السيلت أو الطين (رسوبيات ناعمة) إلى عملية الدياجنيز (انضغاط و تماسك) يتصخر و يصبح صخر غضاري أو سيلتي أو طيني(Claystone, Siltstone, Mudstone) وهي صخور رسوبية عند تعرضها لعملية التحول تتحول إلى:

Shale	Slate	Phyllite	Schist	Gneiss
الشيل	أردواز	فيليت	شيست	النايس



مراحل تحول الصخر الغضاري

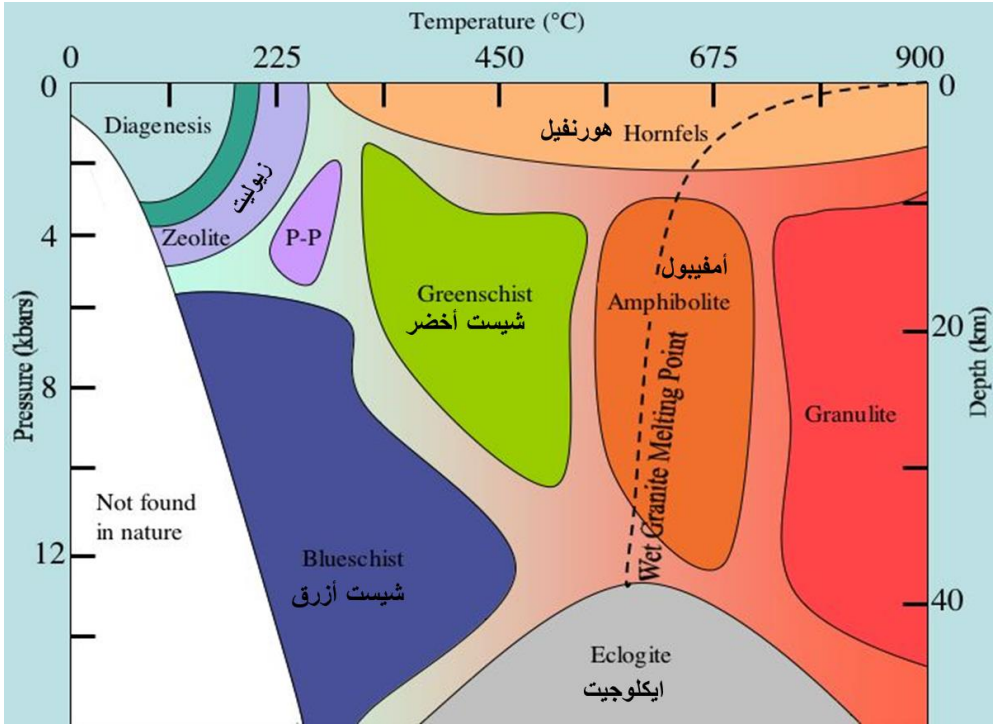
المراحل	نوع الصخر	درجة التحول	الوصف
الصخر الغضاري/ الشيل	رسوبي	–	صخور رسوبية حطامية مكون من حبيبات بأقطار أقل من 0.002 mm
أرجيليت	استحالي	منخفضة جداً	مرحلة انتقالية بين الشيل والأردواز
أردواز (سجيل)	استحالي	منخفضة	حبيبات ناعمة جداً مع قابلية للانفصام ضمن سطوح محددة لونه غامق غالباً أسود أو حسب الأكاسيد الداخلة
الفيليت	استحالي	منخفضة (لكن أعلى نسبياً من السابقة)	بريق شمعي مع بلورات صغيرة غير مرئية
الشيست	استحالي	متوسطة	حبيبات متوسطة ترى بالعين المجردة مع قابلية للانفصام ضمن سطوح محددة
النايس	استحالي	عالية	بلورات أكبر من الشيست وحبيبات خشنة. التناوب بأشرطة متغيرة الألوان من الغامق للفاتح


ازدياد الحرارة
ازدياد الضغط
الشيل/أرجيليت
Low grade
الأردواز
Slate
الشيست
Schist
النايس
Gneiss
المغماتيت
Migmatite
High grade
Blueschist
ازدياد درجة التحول

مراحل تحول الصخر البازلتي

قاع المحيط مكون من طبقات من البازلت يعلوها طبقات من الرسوبيات الغضارية. عندما تتحرك الصفائح التكتونية نحو منطقة الغوص تتعرض هذه الصخور لظروف مختلفة من الضغط و الحرارة ينتج عنها استحالة اقليمية على مراحل مختلفة حسب شدة التحول:

البازلت و هو صخر مغماتي بركاني يتحول حسب بيئة التحول (من الضغط و الحرارة) حسب عدة مراحل هي :



الزيوليت

الشيست الأخضر

الشيست الأزرق

النايس البازلتي

مراحل تحول الصخر البازلتي

اسم الصخر		درجة التحول	الوصف
البازلت		صخر بركاني قاعدي	ذو حبيبات ناعمة جداً لا تميز بالعين المجردة، لونه قاتم مائل للأسود/ الرمادي
الزيوليت		منخفضة جداً	تظهر بداية كمواد ملء للفراغات الموجودة في الصخر البازلتي
شيست أخضر	شيست أزرق	منخفضة	الشيست الأخضر يوافق (حرارة وضغط منخفضين) الشيست الأزرق يوافق (حرارة منخفضة وضغط أعلى)
أمفيبوليت	إيكلوغيت	متوسطة	الأمفيبوليت يوافق (حرارة وضغط متوسطين) إيكلوغيت يوافق (حرارة متوسطة وضغط عال)
النايس البازلتي		متوسطة	حبيبات متوسطة ترى بالعين المجردة مع قابلية للانفصام ضمن سطوح محددة

يتم تصنيف الصخور المتحولة حسب نسيجها: يمكن التمييز بين نوعين أساسيين من النسيج :

- **النسيج غير المتورق أو اللا صفائحي (Nonfoliated Texture):**

يكون النسيج حبيبي لا تظهر فيه أي سطوح انفصام أو توضع متوجه للمنيرالات والحبيبات أو خطوط منحنية مثل (الرخام، الكوارتزيت) و هي بيئة تحول تماسية تحت تأثير ضغط منخفض و حرارة متغيرة، ومع زيادة درجة الحرارة يزداد حجم البلورات أو الحبيبات المنيرالية عند الرخام و الكوارتزيت و يكون لهما نسيج متبلور حبيبي من ناعم حتى خشن. و من أمثلة الصخور ذات النسيج اللا صفائحي (السربنتينيت و حجر الصابون والرخام والكوارتزيت)

غير متورق/ لاصفائحي

السربنتينيت

الرخام

الكوارتزيت

- **النسيج المتورق أو الصفائحي (Foliated Texture):**

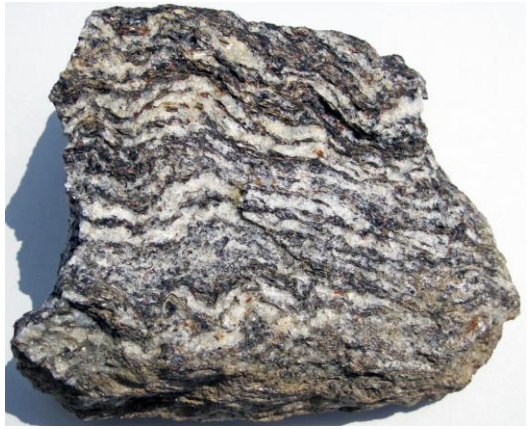
- يكون النسيج بشكل صفائح أو ورقيات تظهر فيه سطوح انفصام مستوية متوازية (بيئة تحول ضغط منخفض جداً إلى منخفض إلى متوسط) مثل (أرجيليت-الاردواز) و عندما تصبح سطوح الانفصام غير مستوية تماماً بل توجد فيها تعرجات خفيفة جداً مثل (الفيليت) تكون الحبيبات ناعمة جداً غير مرئية بالعين المجردة.

- مع زيادة الضغط نحصل على نسيج متورق أو صفائحي حبيبي (حبيبات مرئية بالعين المجردة من ناعمة حتى متوسطة) تتوضع فيه المنيرالات والحبيبات المنيرالية بشكل متجه نحو اتجاه مفضل يكون عمودي على اتجاه الضغط (مثل الشيست) و يدعى نسيج شيستي .

- مع زيادة الضغط يمكن أن نحصل على نسيج متورق حبيبي (حبيبات متوسطة حتى خشنة) بشكل مخطط أو نسيج شريطي بشكل خطوط منحنية عند زيادة الحرارة و الضغط مثل (النايس) و يدعى بالنسيج النايسي.

فيليت

شيست

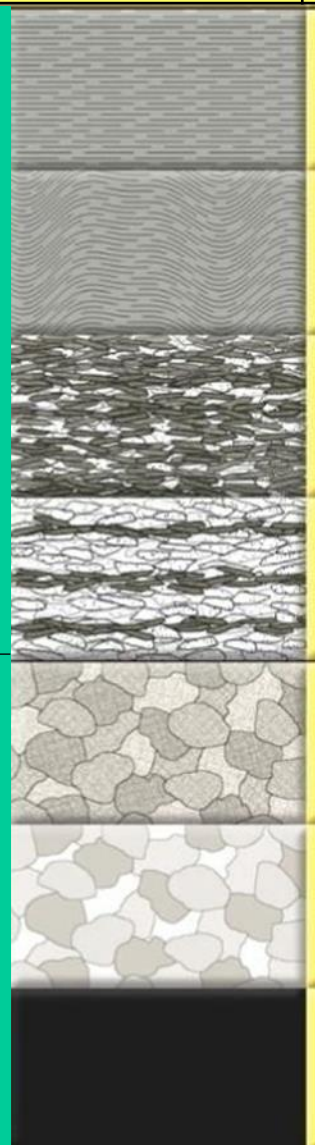


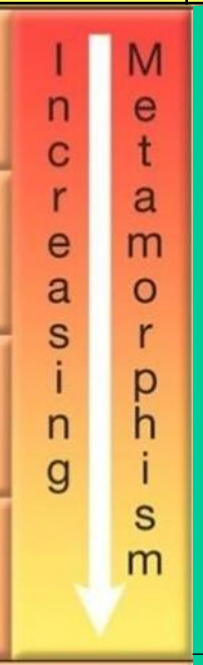
النايس

متورق/ صفائحي

أهم الصخور المتحولة:

الصخر الأب	حجم الحبيبات	النسيج	اسم الصخر المتحول
الشيل، الصخر الغضاري	ناعم جداً	نسيج متورق صفائحي	الأردواز
الأردواز	ناعم		فيليت
فيليت	ناعم إلى متوسط		الشيست
الشيست	متوسط إلى خشن		النايس
الصخر الكلسي، الدولوميتي	متوسط إلى خشن	نسيج غير متورق لاصفائحي	الرخام
صخر رملي كوارتزي	متوسط إلى خشن		الكوارتزيت
فحم بيتوميني	ناعم		الانتراسيت





جَامعة
المَنارة
MANARA UNIVERSITY

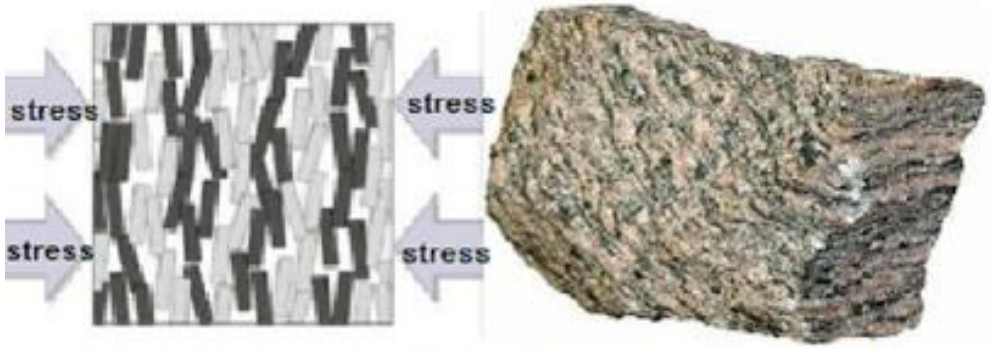
نهاية المحاضرة

جَامعة
المَنارة

مقالع رخام

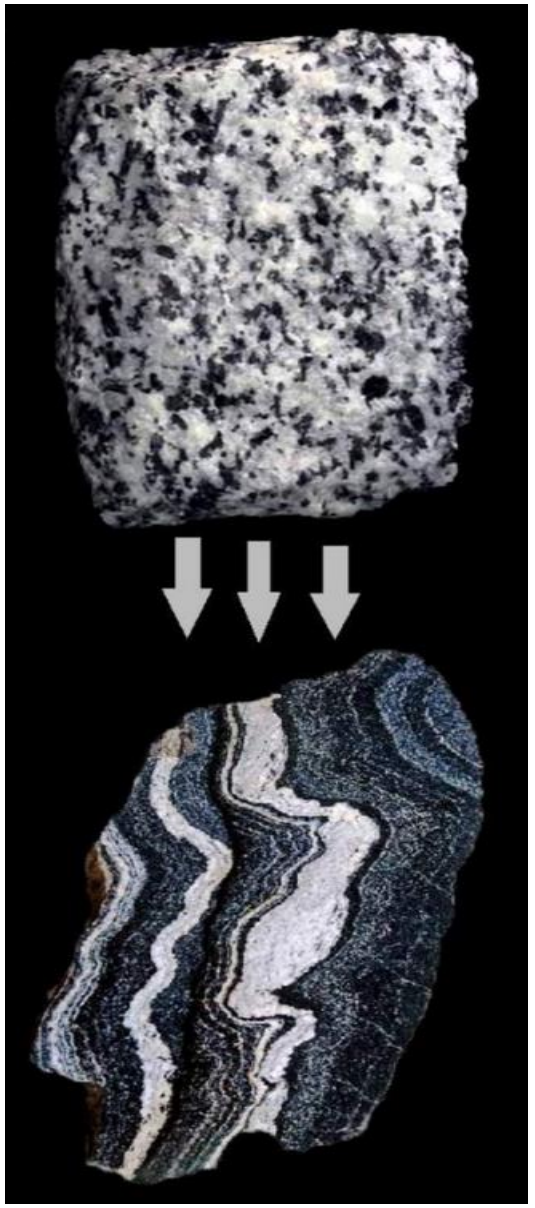
غير متورق/
لاصفائحي

Non- foliated rocks (non- layered) metamorphic rocks - Mainly due to heat from contact metamorphism.



متورق/
صفائحي

Foliated (layered) metamorphic rocks - mainly due to pressure from regional metamorphism.



في ظروف محددة من الحرارة والضغط العاليين يتحول الغرافيت إلى...؟			
بيوتيت	فحم حجري	أوبسيديان	ليس مما سبق
نسيج صخر الرخام هو نسيج...؟			
زجاجي	غير متورق	بغماتي	حطامي
أي من الصخور الآتية هو صخر رسوبي؟			
نايس	السربنتين	الشيل	الفيليت
يمكن أن ينتج صخر النايس عن تحول صخر...؟			
الغرانيت	الرخام	السكوريا	الصخر الرملي