Mechanism of Fold Formation

Every geologist mapping or describing folds in the field probably has the same question in mind: how did these structures actually form?

As geologists we tend to look for a simple history or mechanism that can explain our observations reasonably well.

In general three types of folding may be recognized,

but there are actually ideal limiting cases and transition and combinations are common.

بصورة عامة، ثلاثة اساليب من الطيّ مسؤولة عن تكون الطيات في القشرة الارضية. وأن هذه اساليب هي مثالية

وممكن أن نشاهد بالحقل طية مطوية بطريقة مركبة من أسلوبين أو انتقالية بين أسلوبين.

The types are

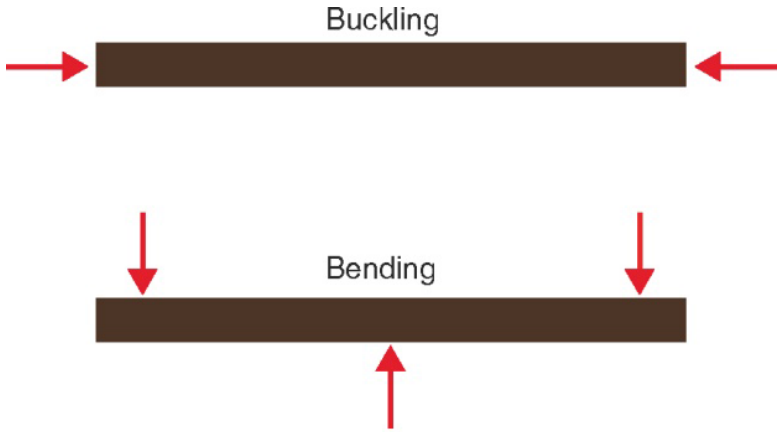
وهذه الأساليب هي :

1- Flexure Folding.(true folding) الطي بالانثناء → By

- **Buckling** - Forces are applied parallel to the layer
- **Bending** – forces are applied across the layer.

2- Shear Folding. الطي القصّي

3- Flow Folding. الطي الانسيابي

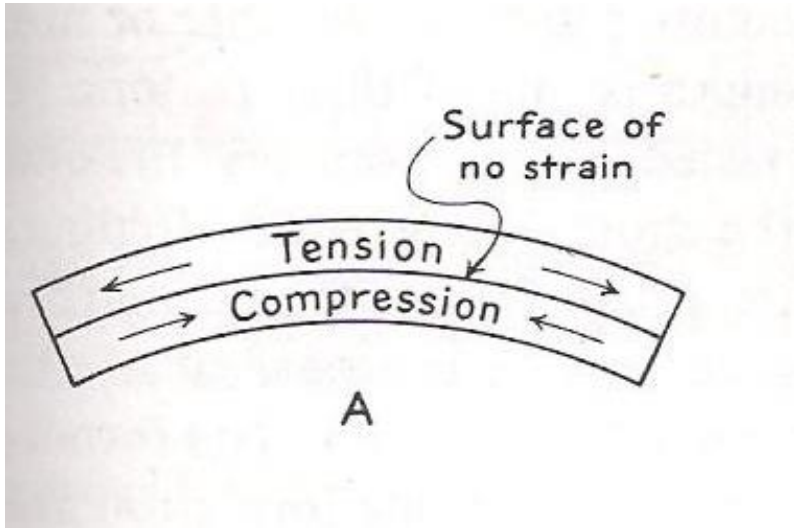


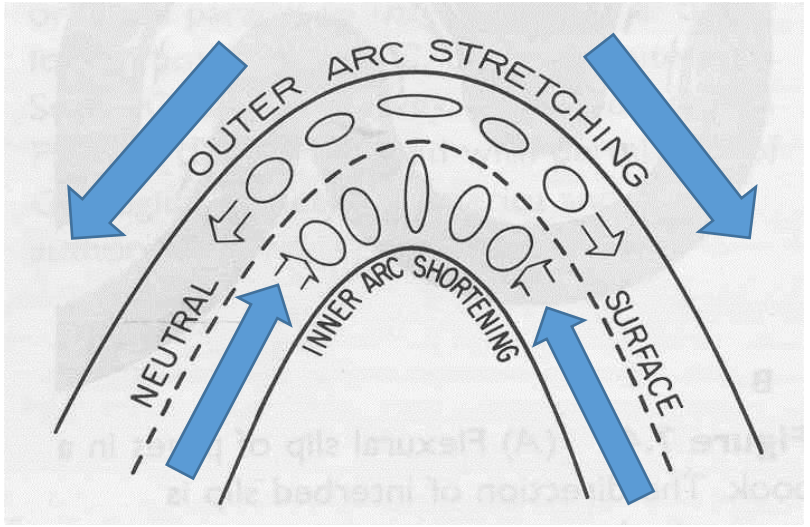
1- الطي بالانثناء Flexure folding

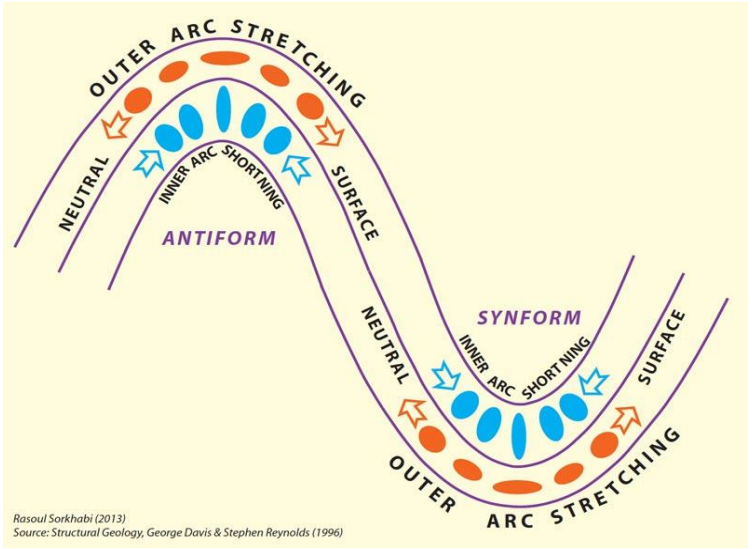
يحدث هذا الأسلوب من الطي عند تعرض طبقات افقية إلى إجهادات موازية لسطح الطبقة فانها تؤدي إلى ثني هذه الطبقة.

أثناء عملية الطي تتحلل الاجهادات الأفقية إلى اجهادات شديه Tension stress عاملة في الجزء العلوي (القوس الخارجي) من الطبقة وإلى اجهادات انضغاطية Compression stress عاملة في الجزء السفلي(القوس الداخلي) من الطبقة.وينشأ بينهما بالتزامن مع ذلك سطح يدعى بسطح اللاتشوه surface of no strain.

The outer part of the competent layer is ***stretched*** due subject to the tension stress while the inner part is ***shortened*** due subject to the compression stress. The two parts are typically separated by a ***neutral surface*** (Surface of no strain).



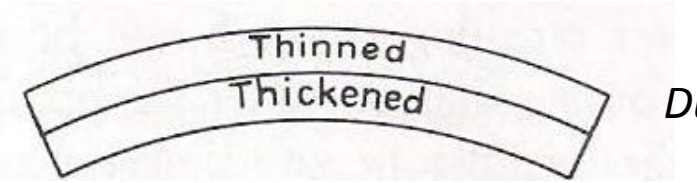




Behavior of rock beds:- :The response of rocks to stresses is in two forms:-

First , if the rocks are sufficiently plastic so that rupture does not occur,
The convex side will lengthen and the thin ,whereas the concave side will shorten and thicken.

أما استجابة او سلوك الطبقات تحت هذه الاجهادات الثانوية فتكون في شكلين، **الأول** عندما تكون الطبقات لدنة Ductile لدرجة كافية بحيث لا يحدث تكسر فإن الجزء العلوي (المحدب) سوف يستطيل وينحف Thinning. في حين الجزء الأسفل (المقعر) سوف يقصر ويسمك (يتثخن Thickened).



Ductile deformation

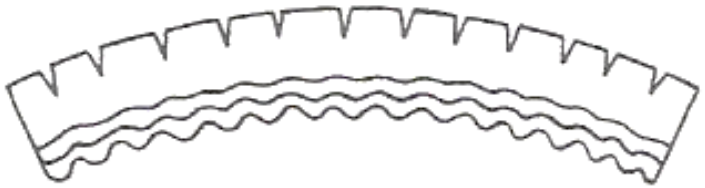
The Second ,is that if the rocks are brittle, they will be broken in a way that compensates for elongation at the outer arc and for the compression in the inner arc. So *either* the normal faults &tension joints in the outer arc, and reverse ,thrust faults in the inner arc. *Or* Accompany of ruptures in outer are and crumpling in inner arc.

أما **الثاني** : اذا كانت الطبقات قصفة(هشة) Brittle فسوف تتكسر بأسلوب يعوض عن الاستطالة في الجزء العلوي وعن الانضغاط في الجزء الأسفل , فأما ان تنشأ فوالق اعتيادية في القوس الخارجي وفوالق معكوسة اوزاحفة في القوس الداخلي. او تصاحب من التكسر rupture في القوس الخارجي وتجعد crumpling في القوس الداخلي.

Normal faults

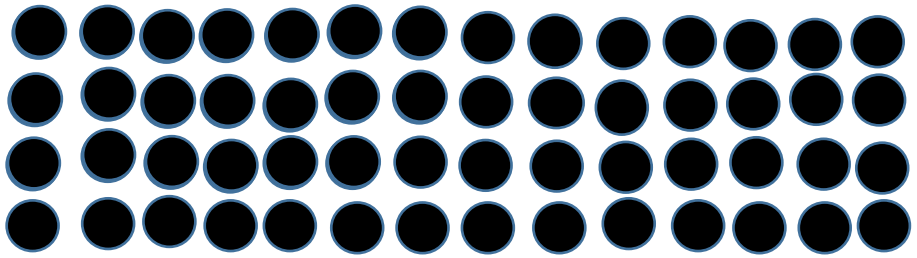
Reverse &Thrust faults

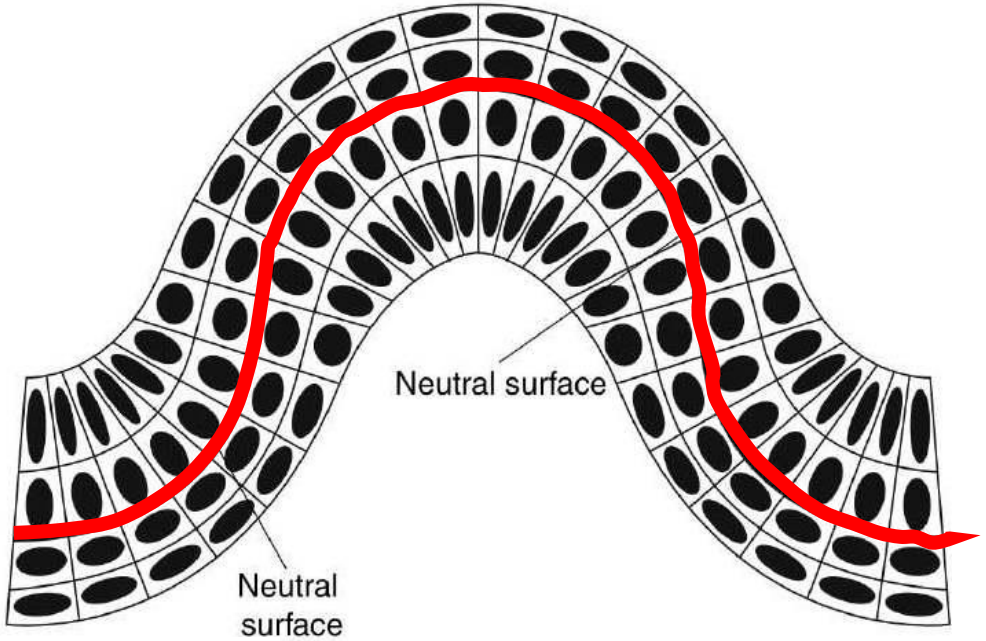
Brittle deformation



Combined ductile &brittle

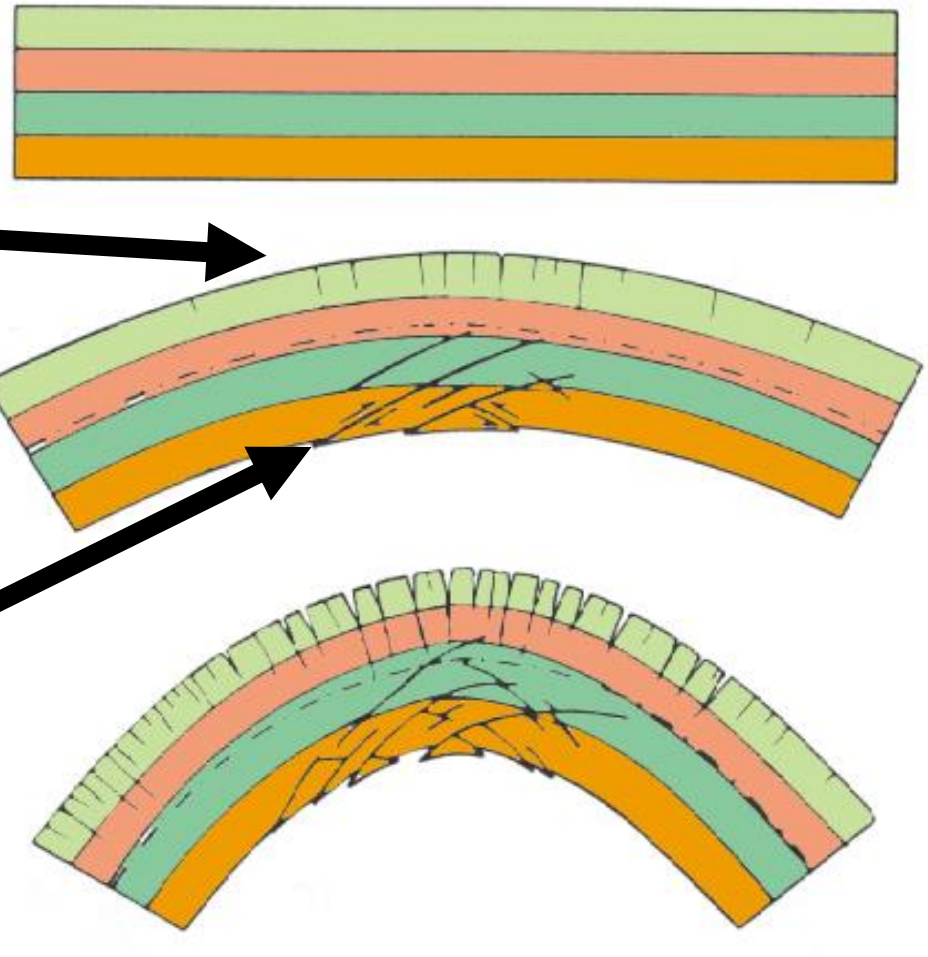
Ductile beds





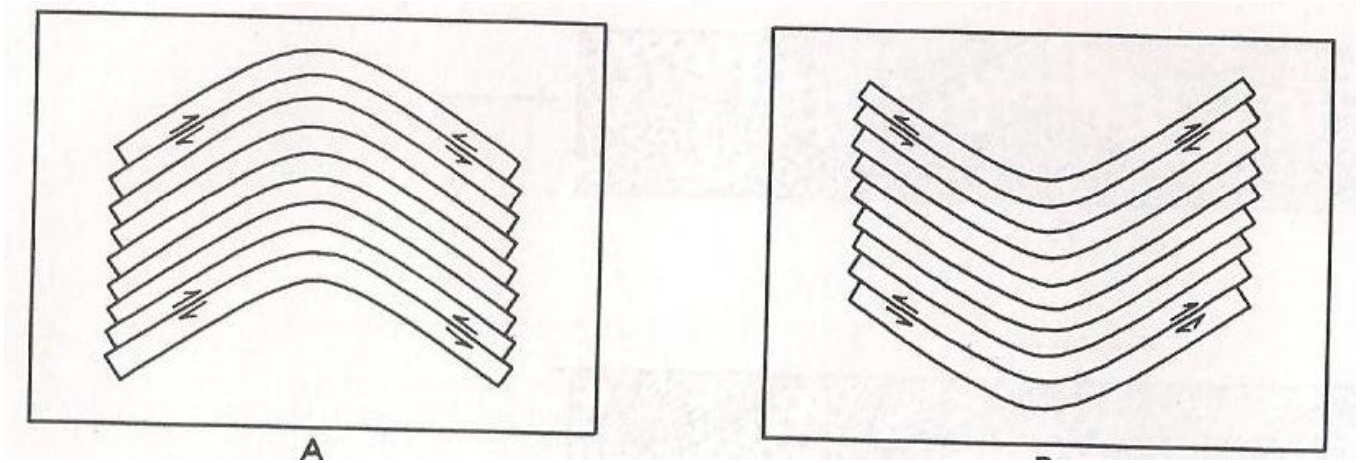
The strain pattern of neutral-surface folding in the fold profile plane.

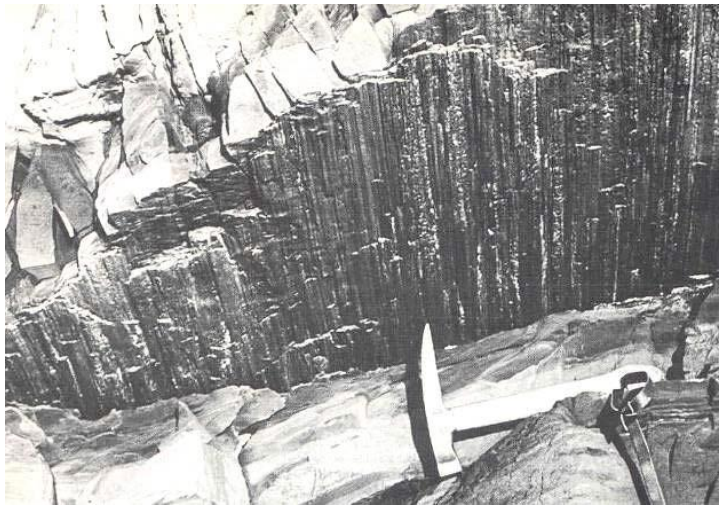
Brittle beds



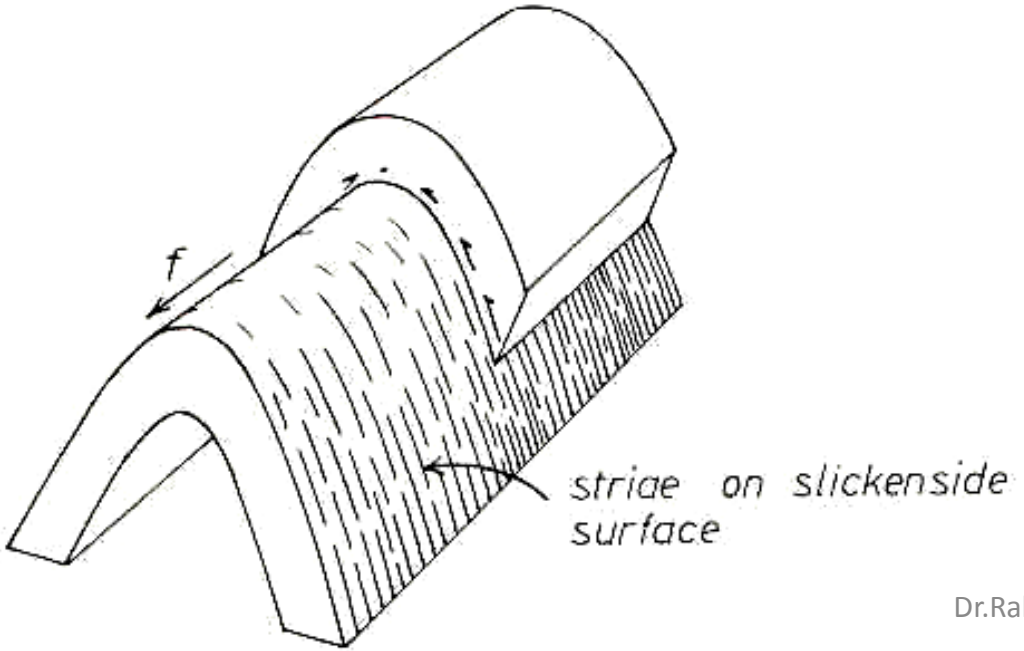
The unique feature of sedimentary rock is presence of bedding planes , therefore, the folding analogous the bedding of a thick packages of paper ,and a very important factor is the sliding of beds past another.

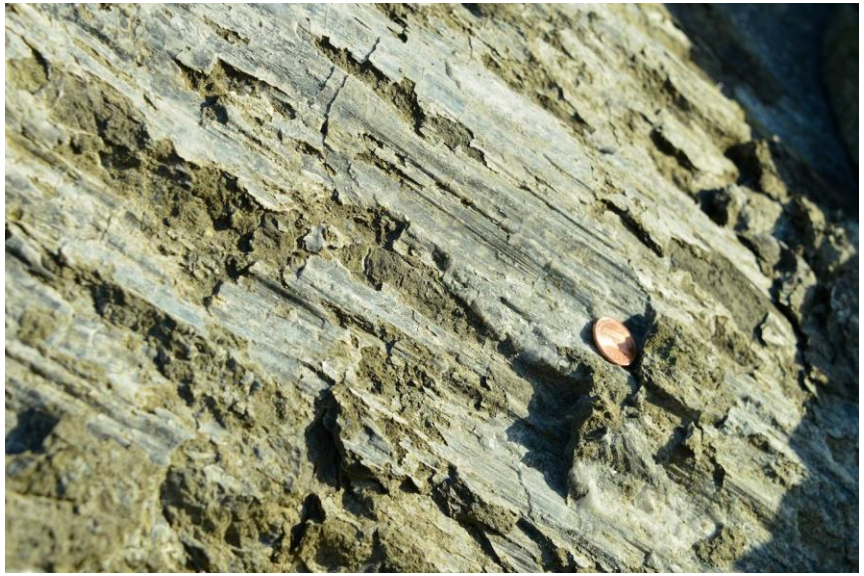
ويمكن لمجموعة من الطبقات الصلدة Competent layers أن تنثني بأسلوب الانثناء الانزلاقي Flexural-slip folding. وفي هذا الأسلوب تنزلق الطبقات العليا فوق الطبقات السفلى باتجاه المفصل مكونةً حزوز Slickenside وخطوط(slikenlines) تمتد باتجاه ميل الطبقة وهذا النوع من الطي متواجد بكثرة في نطاق الطيات في شمال العراق.





Flexural slip Folding in which there is slip along the contacts between parallel layers

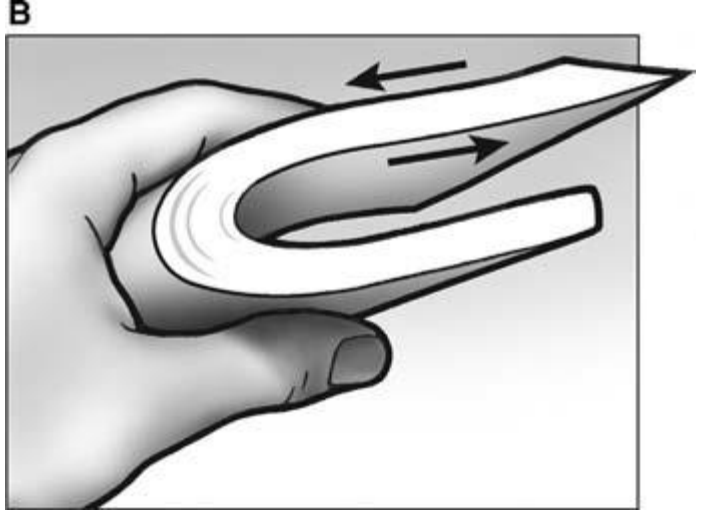




Flexural Folding

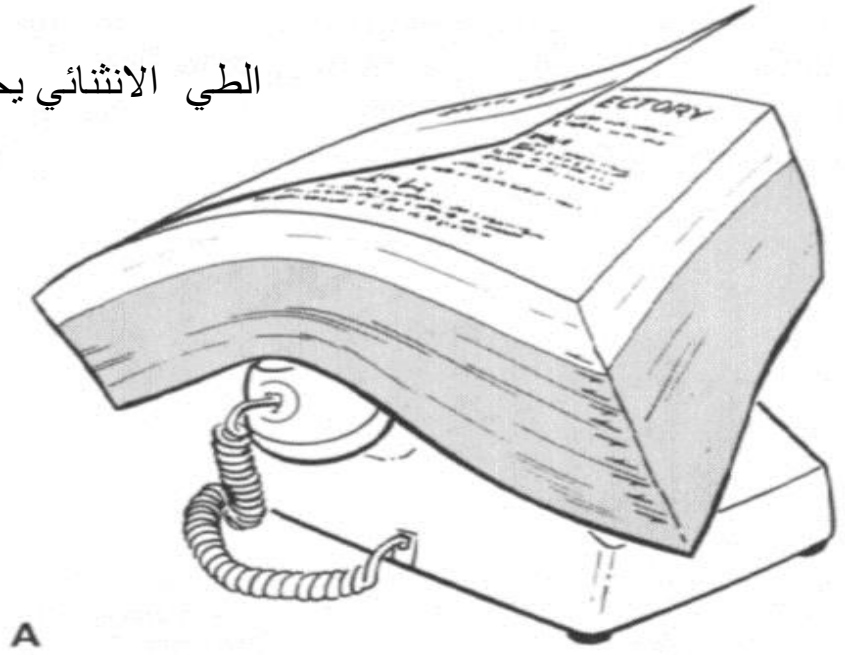
Flexural folding occurs where there is significant mechanical influence of layering in the rock.

الطي الانثنائي يحدث عندما يوجد هناك اختلاف واضحة في الخواص الميكانيكة للطبقات الصخرية



Flexural-slip folding accommodates buckling by layer-parallel slip between layers.

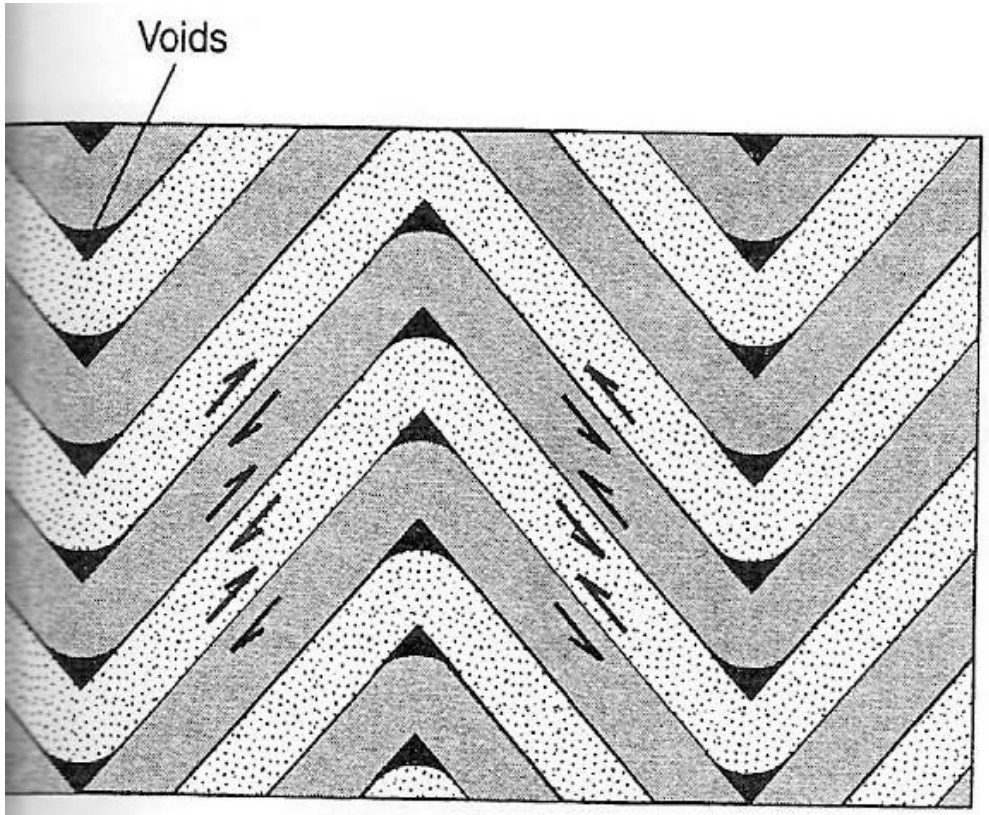
يتم التكيف مع الاجهادات من خلال الانزلاق المتوازي بين الطبقات



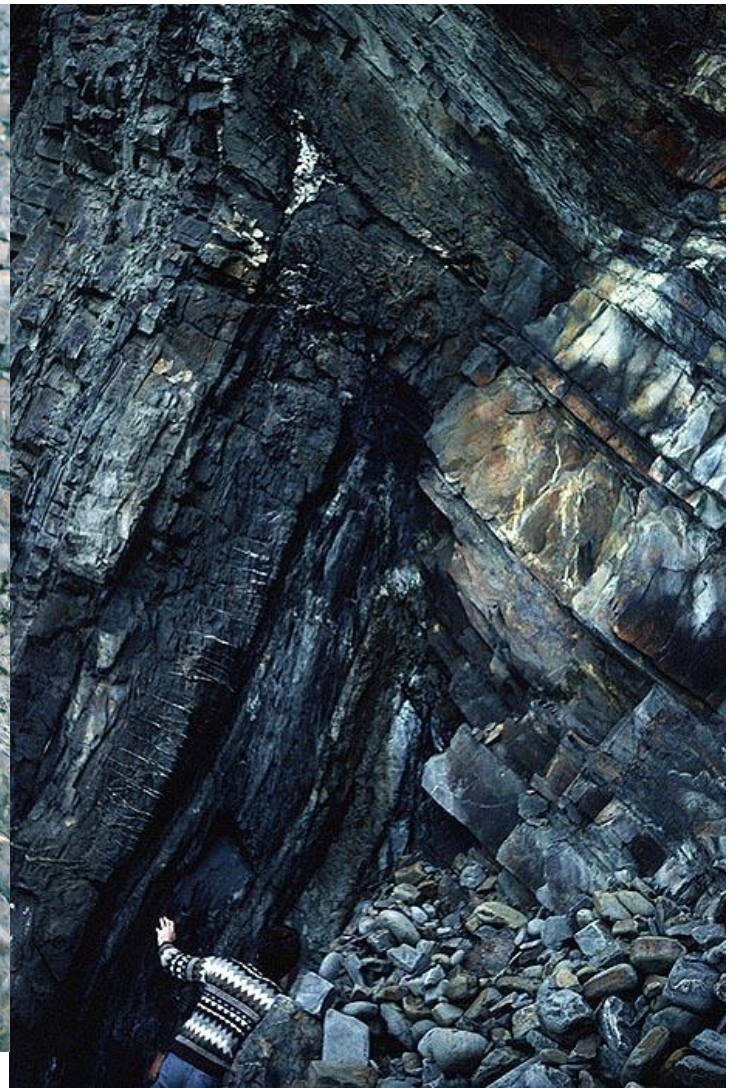
you can think of this type of deformation as "Telephone book "deformation
Pages past each one another but individual pages don't change dimension

If the competent beds are separated by thin incompetent layers , voids initiated in the hinge zone,
may be place of valuable deposits such as gold, this structure called saddle reef

اذا كانت الطبقات البينية interface بين الطبقات الصلبة ذات سمك قليل جدا فان الانزلاق على سطح التماس بين الطبقات الصلبة يؤدي الى حصول فراغ في المنطقة المفصلية وعندما تملئ فيما بعد بالراسب الثانوية يطلق عليها Saddle Reef



Chevron folding of layers of finite thickness
flexural slip mechanism introduces voids in the hinge
black areas).



2- الطي القصّي Shear folding

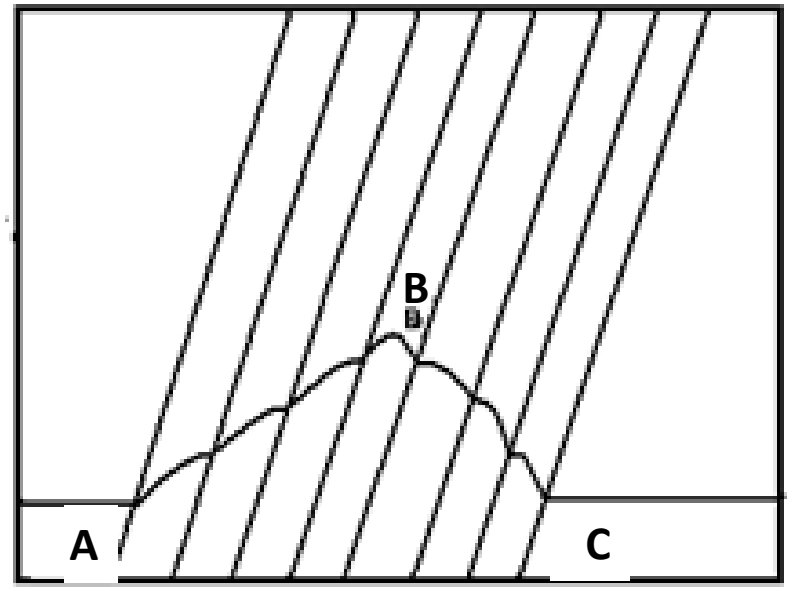
وهي ميكانيكية الطي عندما تكون القوة مائلة على مستويات التطبق

وهو الطي الناتج عن ازاحات دقيقة لطبقة ما حول كسور متوازية ومتقاربة. وأن الطبقة الأفقية تنكسر إلى عدة بلوكات صغيرة وتزاح بواسطة هذه الكسور. هذا الأسلوب من الطي يجب أن يترافق مع تواجد الكسور ، عادةً مستويات تشقق (Cleavages) . واحياناً هذه الكسور تتلاشى بسبب اعادة تبلور الصخور. ومن المثبت أن الطي القصي يحدث فيه ترقق ولا يمكن أن يحدث فيه تثخن، وممكن حساب طول الطبقة قبل الطي وبعده على نفس المكشف الصخري

In a **shear fold** several planes can be identified within a folded structure. This happens when the original horizontal strata are broken into several blocks and the blocks move upward or downward. They form a fold when the central block shows maximum displacement, with a gradually diminishing amount of movement towards the bordering blocks.

.

Such shear folds should always be accompanied by visible fractures, usually cleavage.

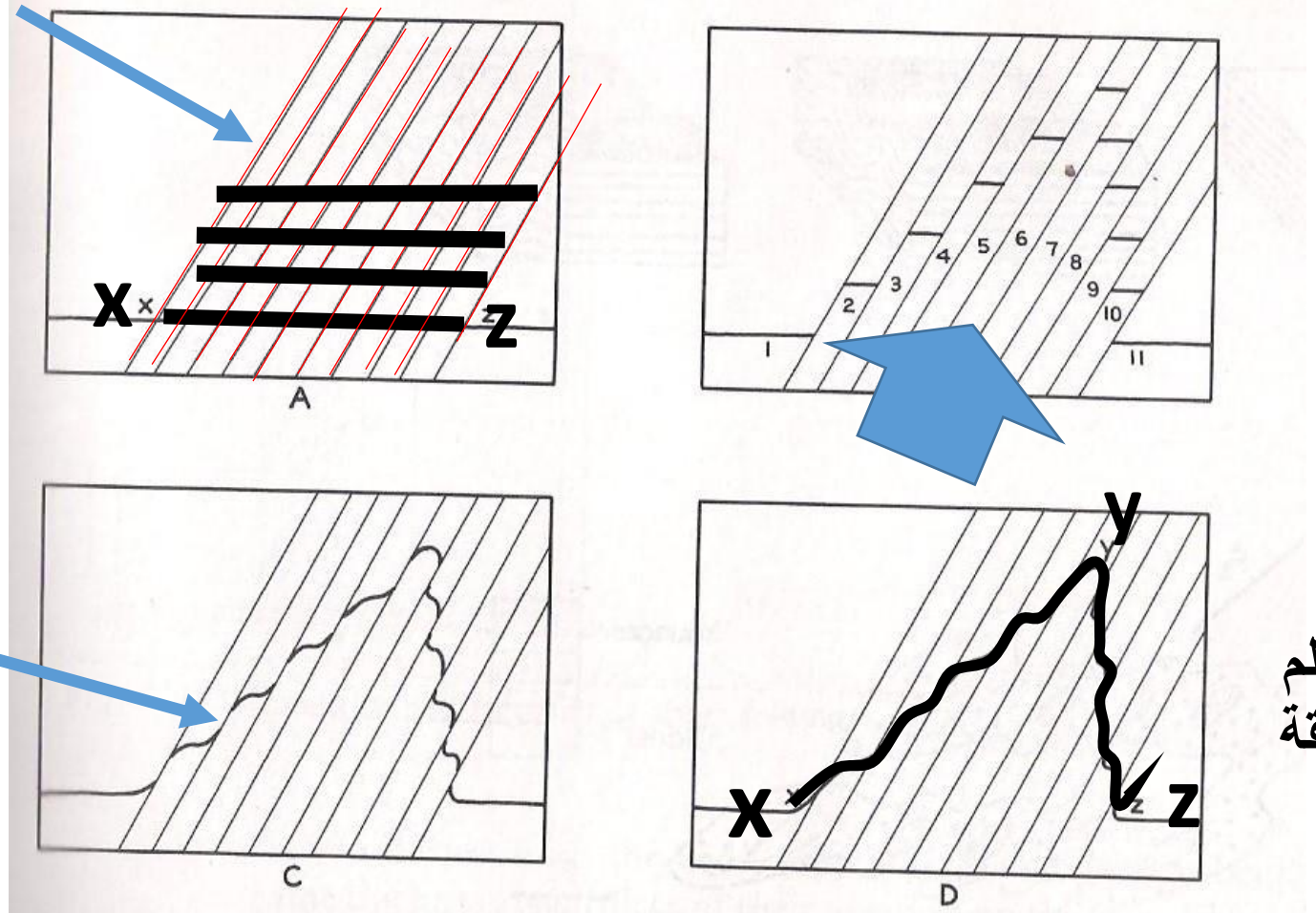


Maximum upward movement in block **B**, movement diminishing towards both **A** and **C**

طبقة افقية تحوي كسور مائلة (مثلا)مستويات تشقق(cleavage

قبل الإزاحة

مستوي تطبق



بعد الإزاحة

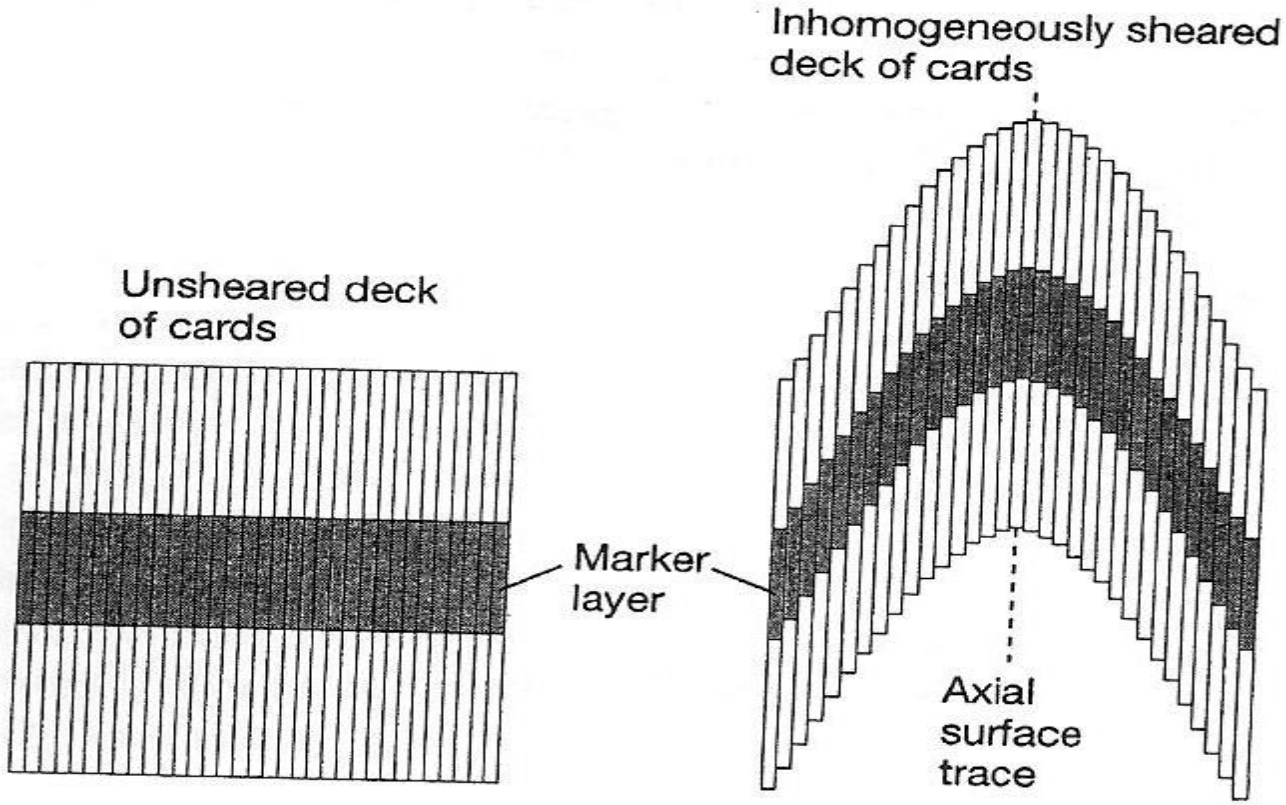
بسبب الاحتكاك فان الطبقات تتوازى مع الكسور

تتشكل الطية اذا لم يحصل قطع للطبقة

Fig. 6-4. Cross sections illustrating shear folding. Heavy black line, *xz*, is a bedding plane. Inclined light lines are fractures. (A) Before displacement on fractures. (B) After displacement. (C) Because of friction, beds tend to parallel the fractures. (D) Fold results if bed maintains continuity.

The beds that originally had a length xz have been stretched so that they now have a length of xyz.

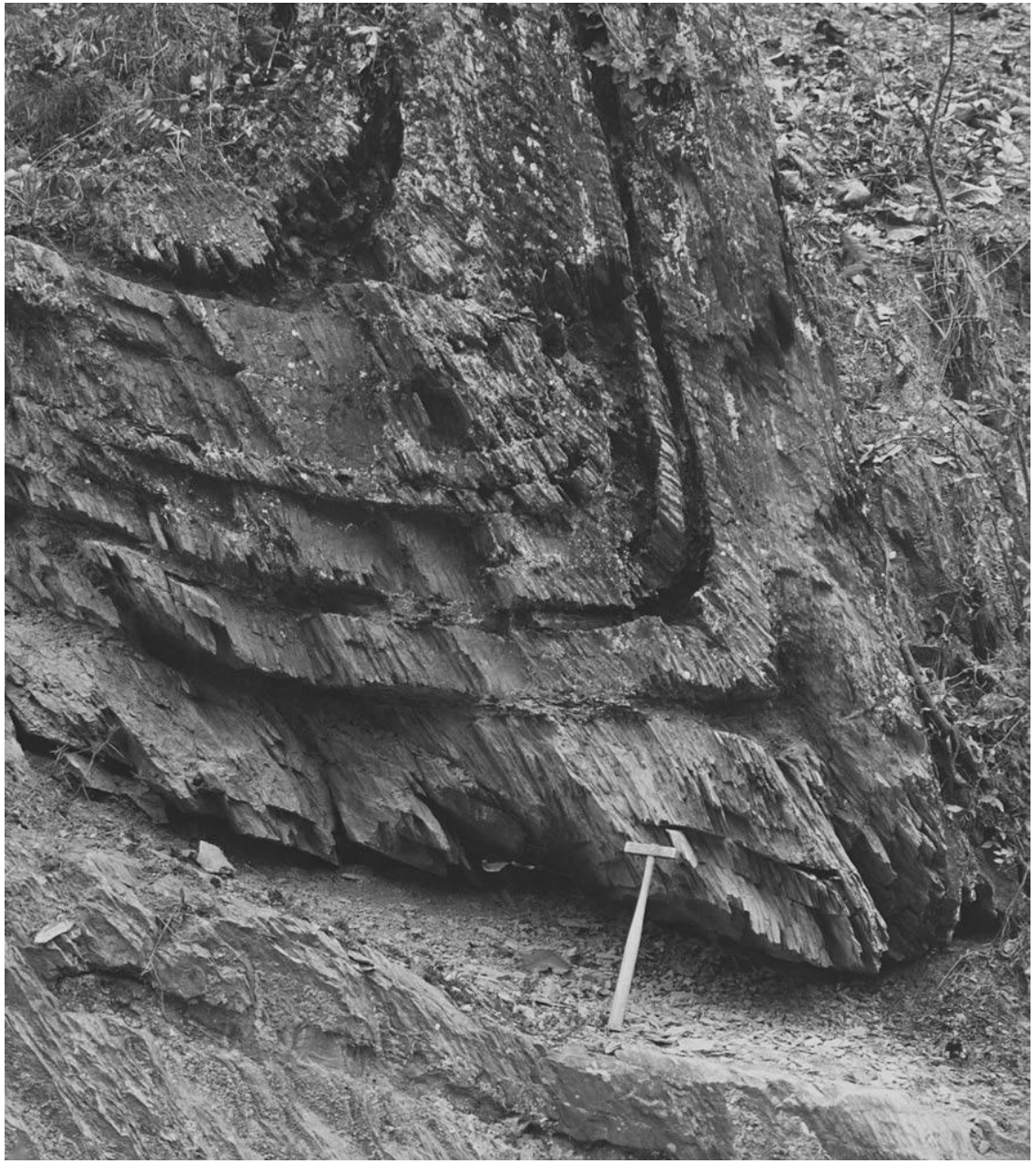
Shear folding: Rocks are sheared unevenly like a deck of cards.



ان السطح المحوري موازي لمستويات القص (أي المستويات التي حدثت عليها الحركة)

like A Similar Fold

Passive shear folding. *A*. A block of material, including a marker layer (shaded black), cut by a set of shear planes perpendicular to the layer. *B*. Folding by inhomogeneous simple shear is approximated by "deck-of-cards" shear. The axial surface of the fold is parallel to the shear planes. The thickness of the layer parallel to the shear planes is constant. The shape of the fold is exactly the same on the convex and the concave sides of the folded layer.



Cleavage:

A secondary fabric element, formed under low-temperature conditions, that imparts to the rock a tendency to split along planes.

تركيب نسيجي مستو (planner) ثانوي يتشكل تحت ظروف الحرارة الواطئة وهذة التراكيبِ تحفز الصخور للانفصال على طول هذة المستويات(التراكيب)

3- الطي الانسيابي Flow folding:

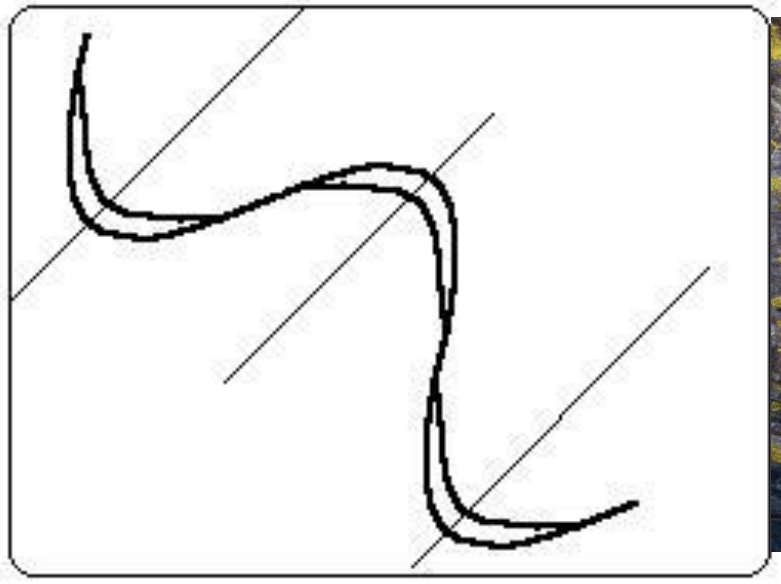
When rock behaves as a fluid, as in the case of very weak rock such as **rock salt**, or any rock that is buried deeply enough, it typically shows *flow folding* (also called *passive folding*, because little resistance is offered): the strata appear shifted undistorted, assuming any shape impressed upon them by surrounding more rigid rocks.. Such folding is also a feature of many igneous intrusions and glacier ice

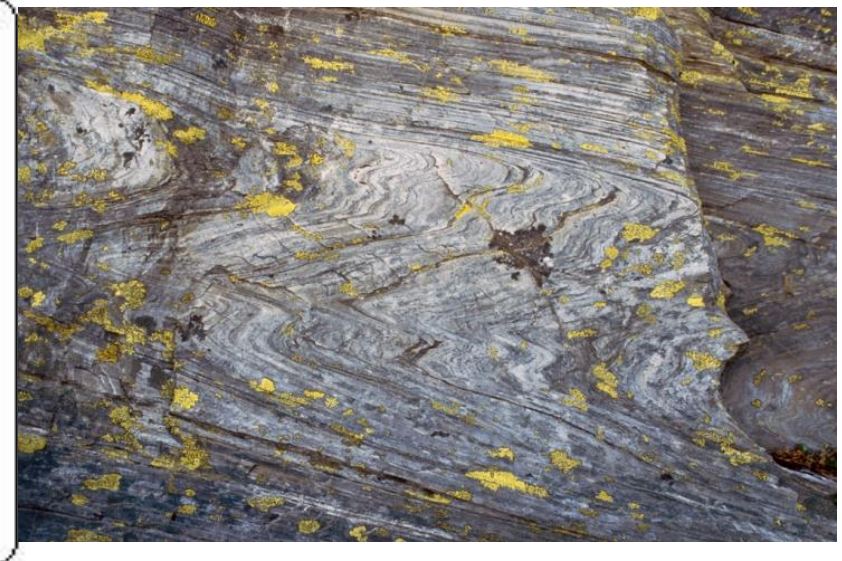
هذا النوع يشبه إلى حد كبير الطي القصي ويختلف عنه بعدم وجود الكسور التي تحدث عليها الازاحة، وتحدث الازاحة بالانسياب الذي يشبه انسياب السوائل ,حيث تعاني الطبقات اللدنة (ductile) من الانسياب في حين تعاني الطبقات الصلبة من الانثناء(اغلب الجيولوجيين يعتبرون ان الطيات من صنف class2 and class3 متكونة بهذه الميكانيكية).

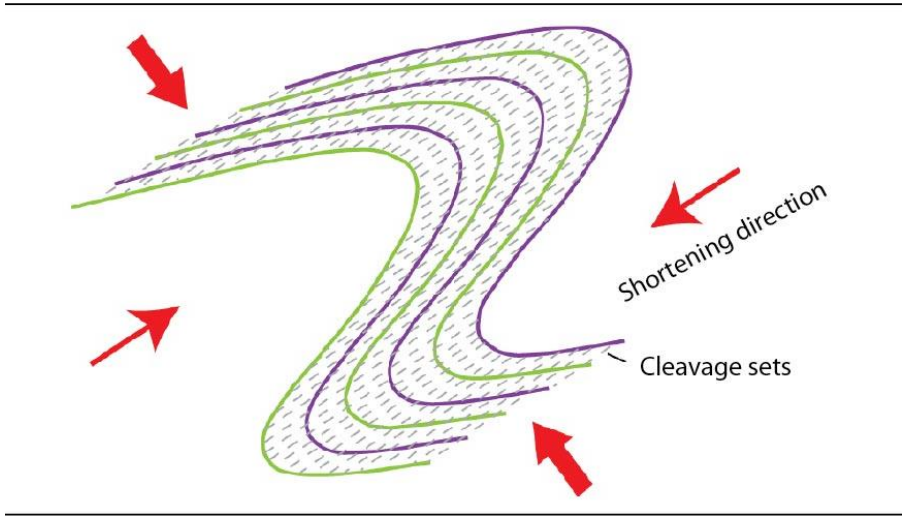
Flow Folding: typically occurs in layers of low competence

The maximum thickness of the bed is at the hinge: the thickness is greatly reduced on the limbs.

السمك الاعظم للطبقة عند المفصل ويتناقص كثيرا عند الاطراف.







مقارنة الانواع الثلاثة

- تحافظ الطبقات الصلدة في **طيات الانثناء** على سمكها الثابت بغض النظر عن موقعها في الطية ,في حين ان الطبقات غير صلبة قد تتنحف في الاطراف وتسمك في المفصل . أما الاحافير والتراكيب الرسوبية فلا تتشوه وتحافظ على شكلها الاصلي. تتميز بنشوء اثار الخدوش(slikensides) على سطوح الطبقات.
- في أبسط حالات **الطي القصي** تتواجد مع الطية تلك المستويات التي حدثت عليها الازاحة. وتحافظ الطبقة المطوية بهذا الاسلوب على سمكها في البلوكات المزاحة، وتحدث ترقق فقط قرب مستويات الازاحة بسبب عملية السحب والاستطالة.

- ان السطح المحوري يكون موازي لمستويات القص (أي المستويات التي حدثت عليها الحركة) في الطي القصي اما الطي بأسلوب الانثناء الانزلاقي يكون المستوي المحوري متعامد(غالبا) مع مستويات القص.
- يتميز **الطي الانسيابي** عن بقية الانواع باختلاف شديد في السمك بين الاجنحة والمفصل. أي تثخن في المنطقة المفصلية وترقق في منطقة الاجنحة

Distinguishing between three types of mechanism

Flexure, shear, and flow folds may be distinguished from one another by various criteria, recognizing of course, the combinations may occur.

- In **flexure folds** the beds, especially the competent beds tend to be the same thickness regardless of their position on fold .
- The incompetent beds may thin at the limbs and thicken at the hinges. Moreover , fossils and sedimentary structural feature tend to be undistorted and maintain their original shape .
- In the simplest cases of ***shear folding*** the slip planes are generally visible and the displaced beds have a uniform thickness in all the blocks. But because of drag the beds may be stretched and become thinner near the shear planes.

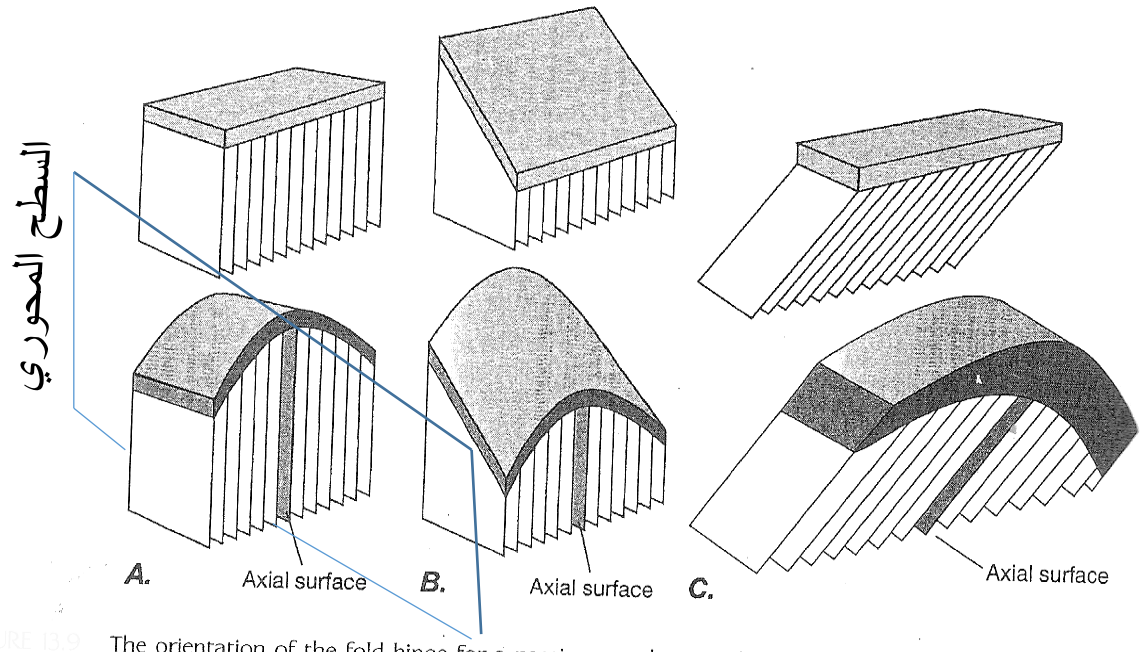
-The axial surface of fold is **orthogonal** with shear plane in flexural folds.
The axial surface of fold is **parallel** to the shear plane in shear folds.

- **Flow folding** may usually be distinguished from flexure and shear folding because the thickness of each bed is not constant.

The maximum thickness of the bed is at the hinge: the thickness is greatly reduced on the limbs.

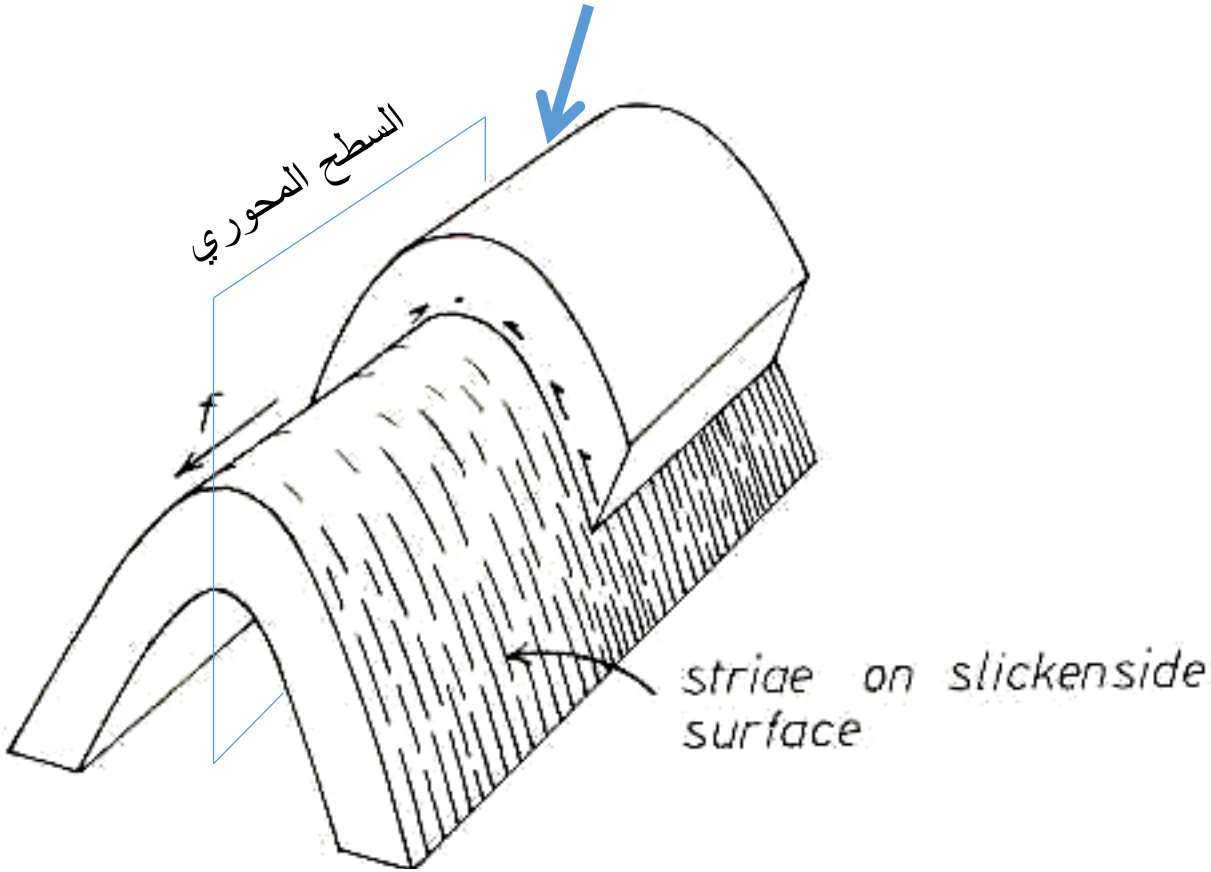
-The axial surface of fold is almost **orthogonal** with shear plane in flexural folds.
The axial surface of fold is **parallel** to the shear plane in shear folds.

ان السطح المحوري يكون موازي لمستويات القص (أي المستويات التي حدثت عليها الحركة) في الطي القصي اما الطي بأسلوب **الانثناء الانزلاقي** يكون السطح المحوري متعامد(غالبا) مع مستويات القص.



The orientation of the fold hinge for a passive shear fold is determined by the intersection of the shear planes with the original orientation of the layer to be folded. In A–C, the top diagram shows the relationship between the shear planes and the original orientation of the layer; the bottom diagram shows the layer after folding. The directions could have any orientation in the shear except parallel to the surface being folded. The orie the fold hinge does not indicate the direction of sh

Shear folding



Flexural slip folding

Origin of folds

تصنف الطيات حسب منشأها إلى طيات تكتونية Tectonic folds وطيات غير تكتونية Nontectonic folds . وتعرف الأولى بأن لها علاقة مباشرة مع الاجهادات العاملة على سطح القشرة الارضية. أما الثانية فتعرف بأن ليس لها علاقة مباشرة مع اجهادات القشرة الارضية وفي أغلب الاحيان تكون مصاحبة للعمليات الرسوبية.

الطيات التكتونية Tectonic folds جميع الطيات التي درست في هذا الفصل هي تكتونية المنشأ.

والمنشأ التكتوني يقسم إلى قسمين:

الاجهادات الأفقية التي تؤثر بشكل موازٍ لسطح الطبقة وتعمل على طي الطبقات كما في اساليب الطي الثلاثة المشروحة سابقاً.

الاجهادات العمودية بعض الطيات تتكون كنتيجة مباشرة للإجهادات أو الحركات العمودية وبعضها تتكون بعلاقة غير مباشرة.

Origin of Folds

Folds may be classified as tectonic or nontectonic.

those of tectonic origin result more or less directly from forces operating within the earth.

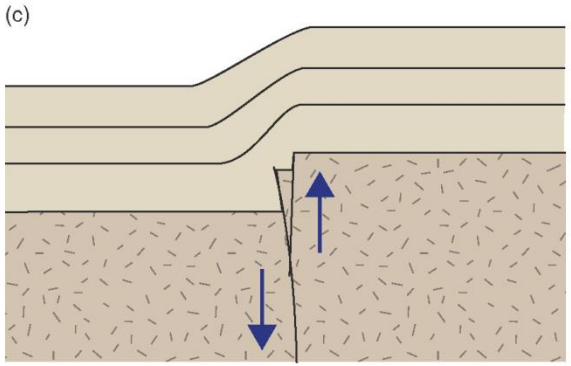
those of nontectonic origin are largely the result of superficial processes, often associated with erosion or deposition.

Tectonic origin

All previous studied folds are tectonic origin

They result from either:- ***Horizontal Compression*** ,we mean compressive force acting parallel to surface of the earth. In other word ,the great principle stress axis is horizontal. As the most previous folding mechanism.

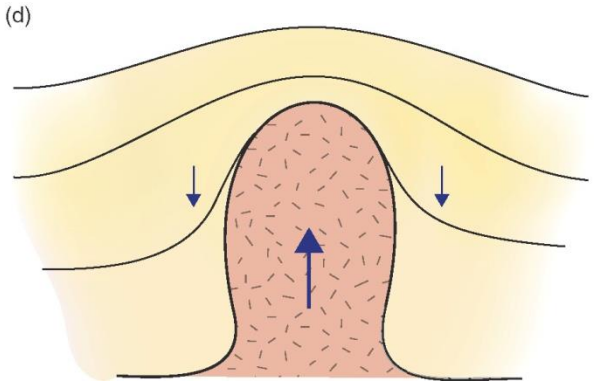
Or Vertical Movement some folds are the direct result of vertical movement , other are an indirect product.



Two main situation where folds merge due to vertical movement

Above reactivated faults

The displacement is forced upon the sediments by fault movement on a preexisting basement fault, and the sediments are soft enough to respond by monoclinal folding



Above shallow intrusions or salt diapirs

Forceful intrusion of shallow magma or salt diapirs can also bend roof layers

الطيات غير التكتونية nontectonic folds

- وهي التي ليس لها علاقة مباشرة مع الاجهادات العاملة في القشرة الارضية.ومن هذه التراكيب:
- **1- زحف جوانب التلال Hillside creep**
- **2- تركيب الانهيار Collapse structure**
- **3- الثلاجات Glacial ice**
- **4-المحاليل Solution**
- **5- التراص التفاضلي للرسوبيات Differential Compaction of sediments**
- **6-الطيات المتزامنة مع الترسيب Synsedimentary Folds**

Nontectonic folds

Processes operating at or near surface of the earth , especially in relation to erosion , may cause deformation.

the resulting structural features are not only of interest in themselves,

but may confused by the unwary with tectonic features.

- **Hillside creep زحف جوانب التلال**
- **Garvty sliding-Collapse structure تركيب الانـهيار -**
- **Glacial ice الثلاجات -**
- **Solution -المحاليل**
- **Differential compaction of sediments التراص التفاضلي للرسوبيات -**
- **Synsedimentary folds الطيات المتزامنة مع الترسيب-**

Hillside creep زحف جوانب التلال

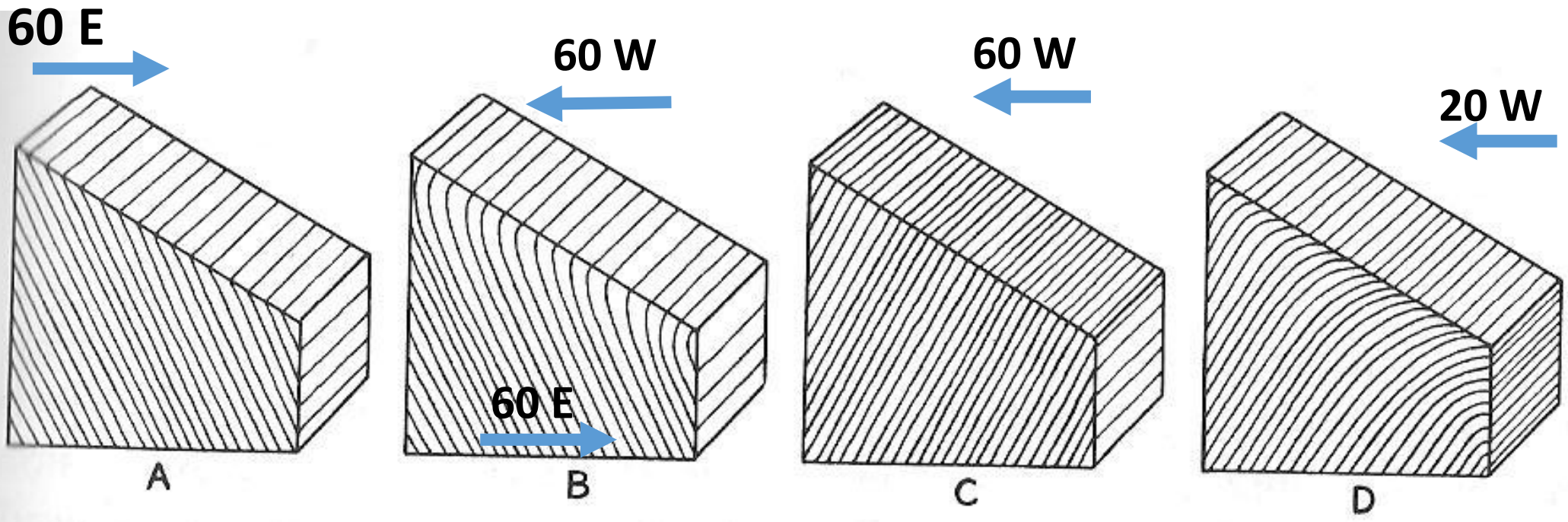


Fig. 6-14. Hillside creep, looking north. (A) True attitude of strata before hillside creep. (B) Same area as (A) after hillside creep. (C) True attitude of strata before hillside creep. (D) Same area as (C) after hillside creep.

May Greatly Modify The Attitude of Strata so that incompetent rocks such as shale dip into the hillside

In such area it may be necessary to have exposures five or ten feet because data obtained at the surface may be very misleading

Folding by Gravity Sliding طي بالانزلاق الجذبي

Sediment may slide for a number of reason:

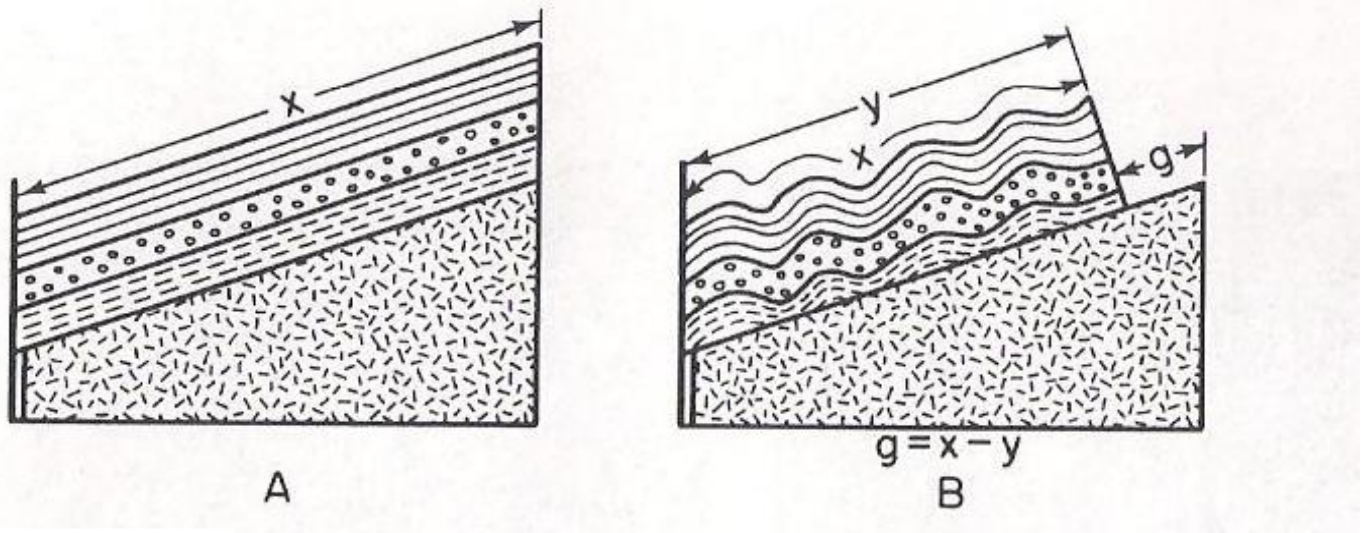
-The slop on which deposition take place may be inclined.

-Slight tilting ,excessive local deposition.

-Earthquake may set masses of mud or ooze into motion.

-local subaqueous erosion may leave the beds with inadequate support.

-large slide may even be related to contemporaneous faulting.

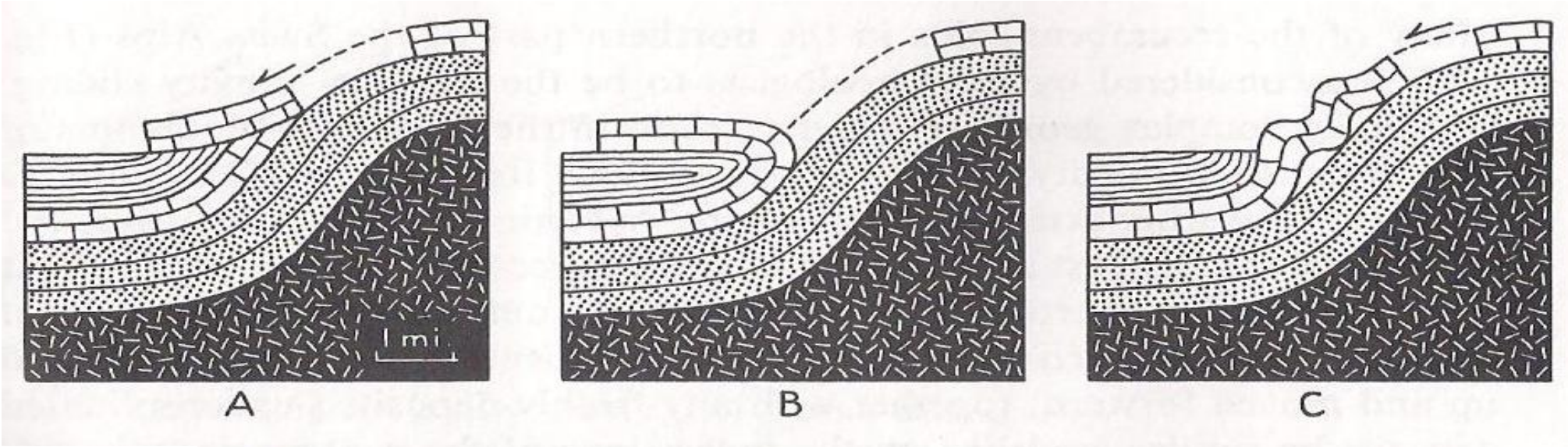


Folding by gravity sliding. (A) Before sliding. (B) After sliding. *x*, width of strata before folding. *y*, width of folded belt after sliding. *g*, gap left at upper end after sliding of block.

Collapse structure تركيب الانـهيار

Collapse Structures are type of gravity sliding

ان تراكيب الانهيار هي احد أنواع الانزلاق الجذبي gravity sliding



Collapse structures. (A) Landslide simulating klippe. (B) Recumbent fold. (C) Folds caused by gravity sliding.

(Klippe): An erosional remnant of a thrust nappe.

B.Simulate a recumbent fold formed under true tectonic condition.

التراص التفاضلي للرسوبيات
Differential compaction of sediments

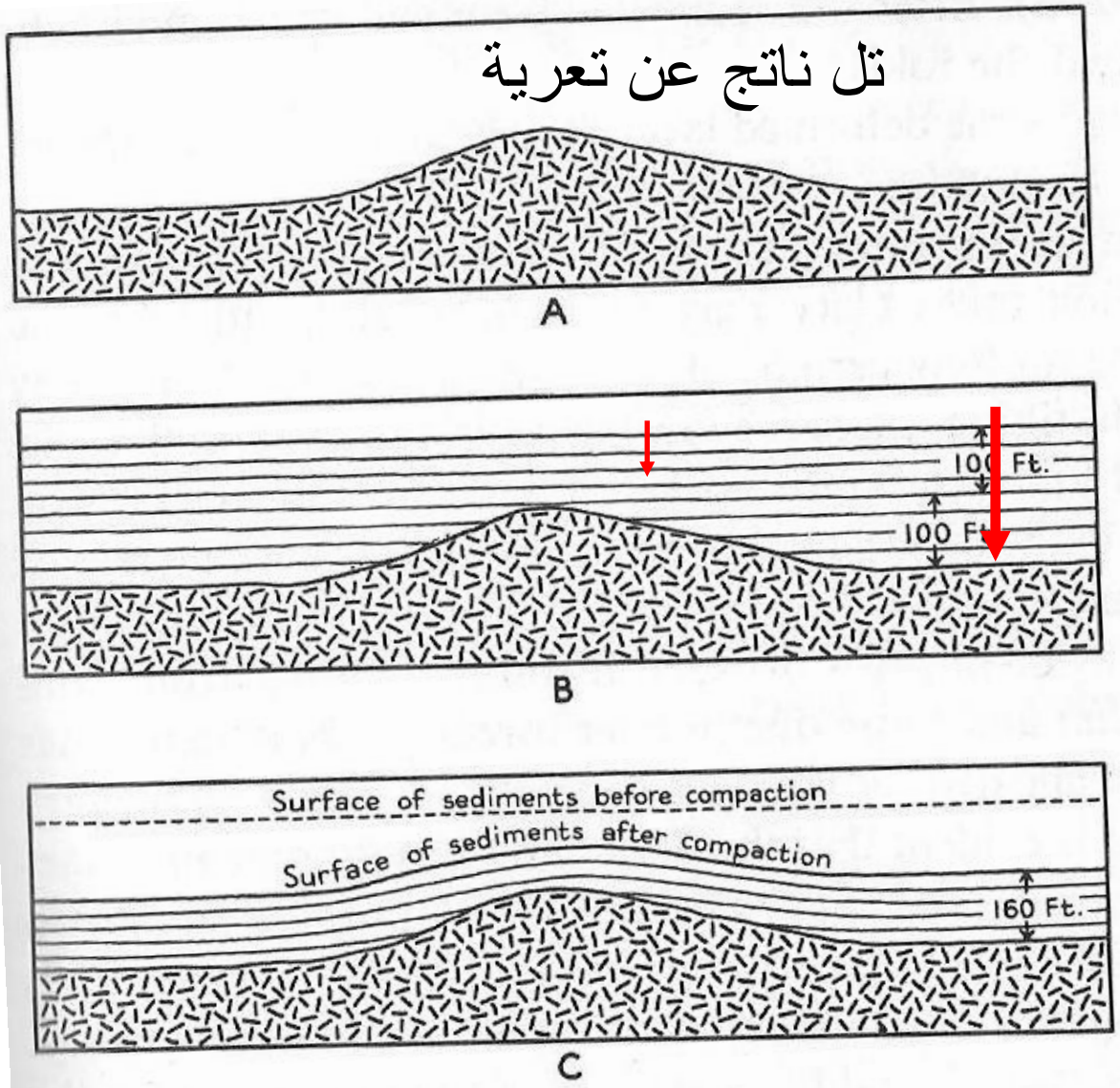


Fig. 6-19. Folds resulting from differential compaction of sediments. (A) Ridge left by erosion. (B) Same ridge covered by mud, but before compaction of mud. (C) Same ridge, but after compaction of mud.

تغطية التل بالطين .لاحظ الفرق في سمك الغطاء بين فوق التل والمنطقة المنبسطة

التل وتأثيره بعد كبس الطين يعطي مظهر طية محدبة (غير تكتونية) بفعل التراص التفاضلي بين التل والمناطق المنبسطة

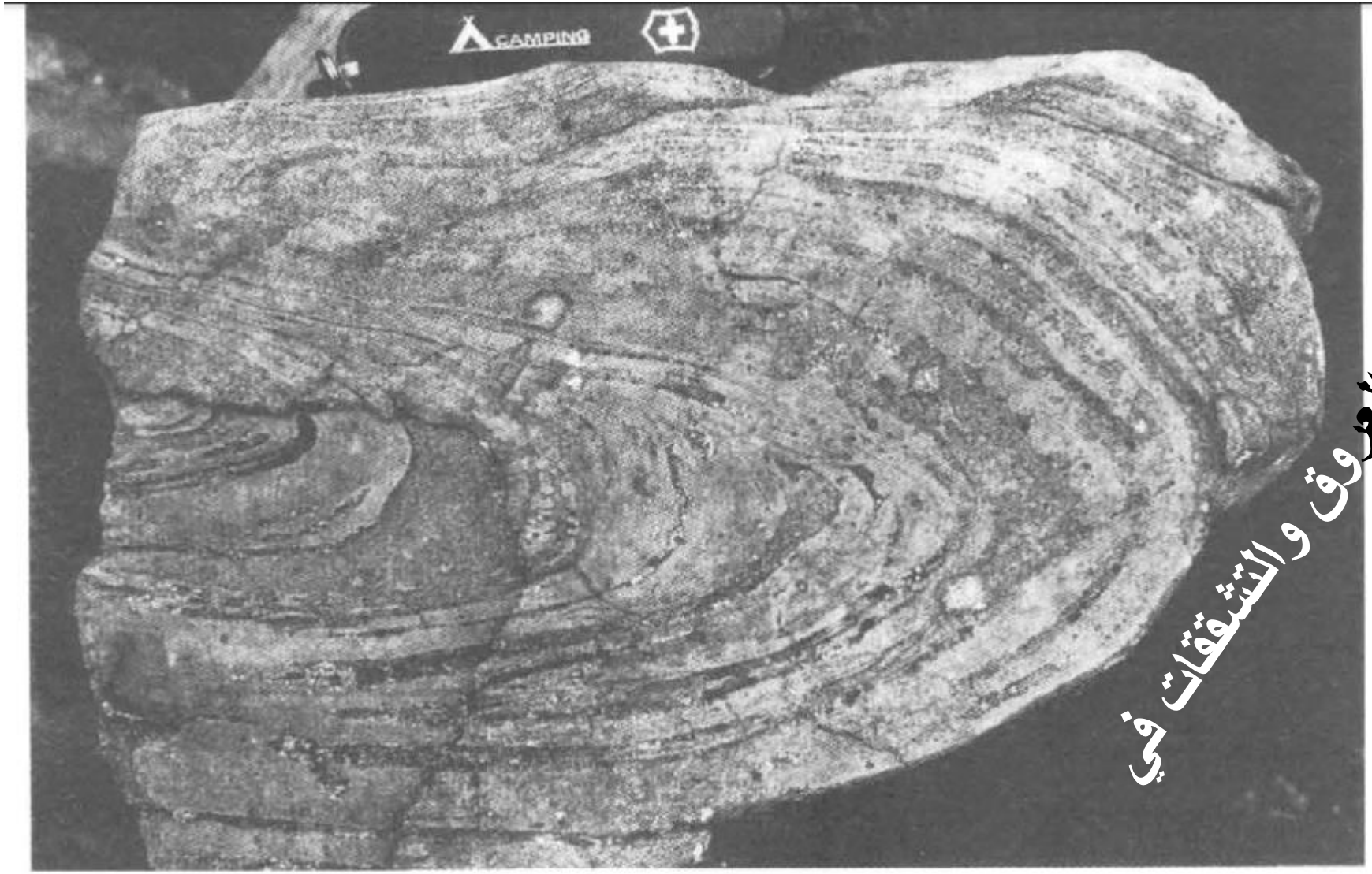
Dr.Rabeea Znad

Solution المحاليل

Solution of a chemically deposit formation may produce large structural features.
Calcium sulfate is most commonly precipitated from evaporating water as anhydrite .($CaSo_4$)
water subsequently added to convert the anhydrite into gypsum ($CaSo_4.2H_2o$)
and the increase volume is approximately 40 percent.
if the beds are flat –lying and if all the expansion takes place upward,
the beds thicken , but no folds develop . if, however , much of the expansion is horizontal,
compressive forces are set up and folding ensues.
the resulting folds are small , with a height of only a fraction of an inch, or at the most a few feet.

من امثلها تحول الانهايدرايت الى جبس بعد اكتسابه جزيئتان ماء يرافقه زيادة في الحجم 40 بالمئة تقريبا
فاذا كان التمدد حرا لا يحصل طي ولكن عندما يكون التمدد افقيا حتما سيعقب ذلك طيات ولكنها صغيرة
وذات ارتفاع ضئيل يبلغ جزء من الانج

Synsedimentary folds الطيات المتزامنة مع الترسيب-

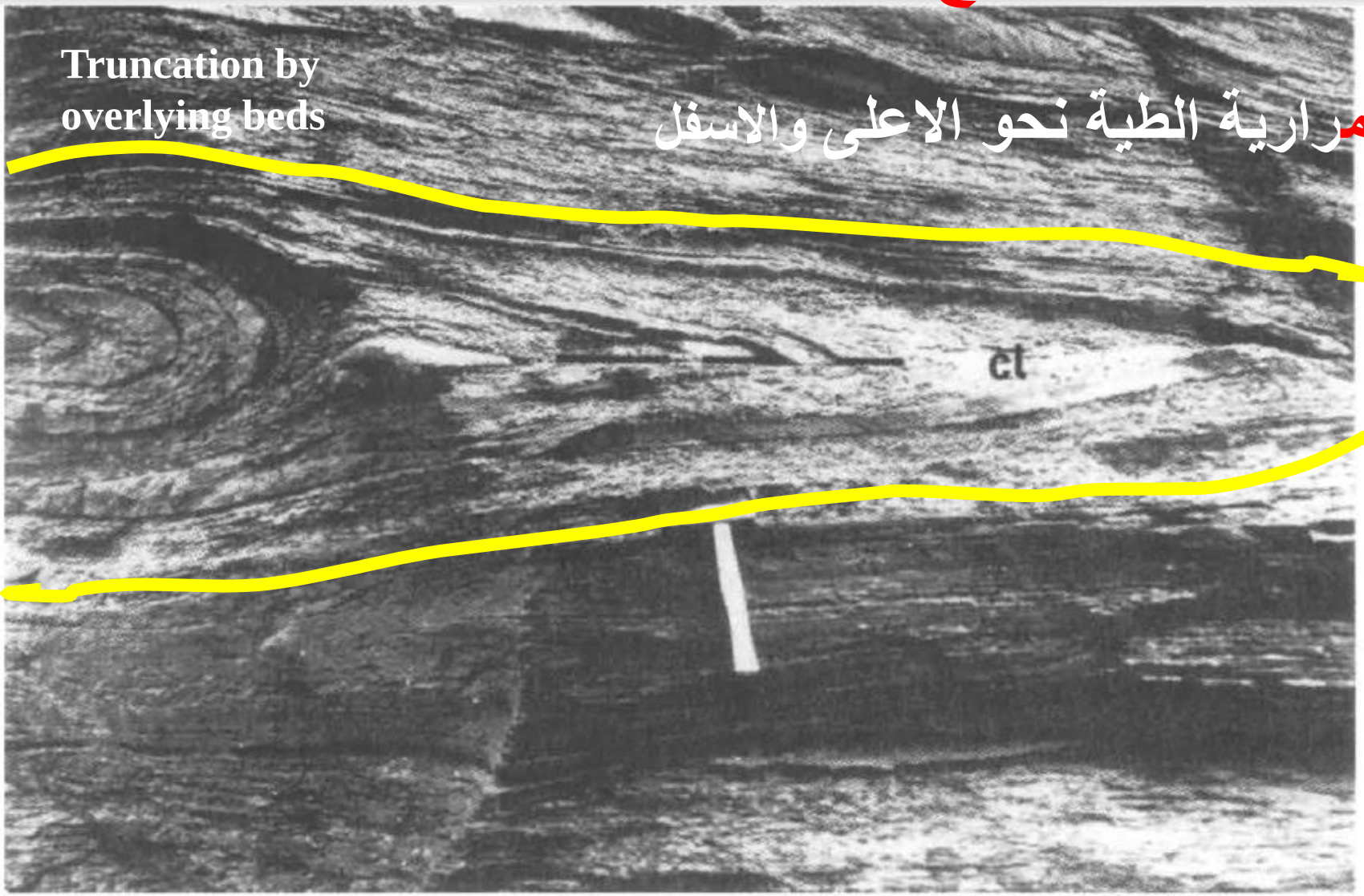


غياب الكسور والعروق والتشققات في المنطقة المفصلية

Fig. 1.2a Synsedimentary (Slump) fold in sandstone. Note the absence of fractures, veins, and cleavage.

Synsedimentary folds الطيات المتزامنة مع الترسيب-

طية مضطجعة متزامنة مع الترسيب



لاحظ عدم استمرارية الطية نحو الاعلى والاسفل

Fig. 1.2c Recumbent Synsedimentary (Slump) fold in siltstones with the development of a weak flat-lying cleavage (cl).