



Figure 1

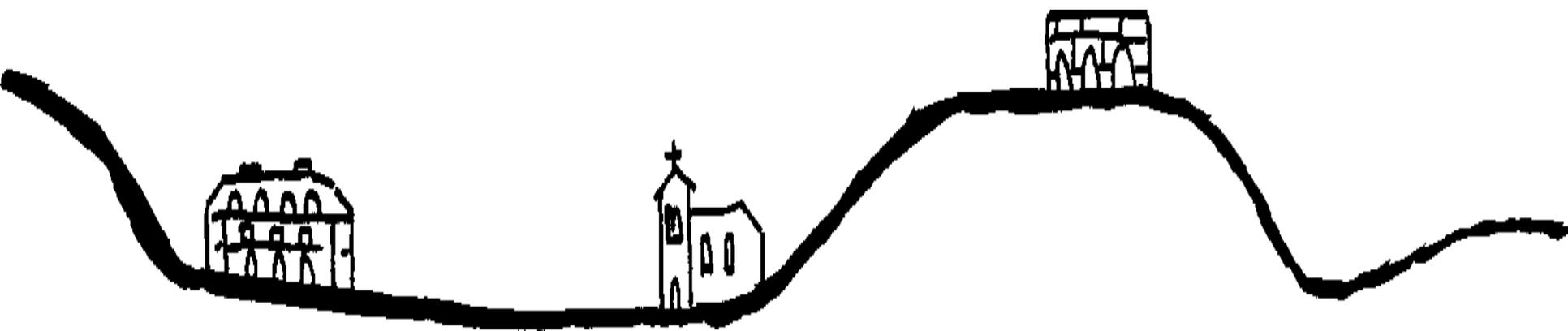


Figure 2

Figure 3

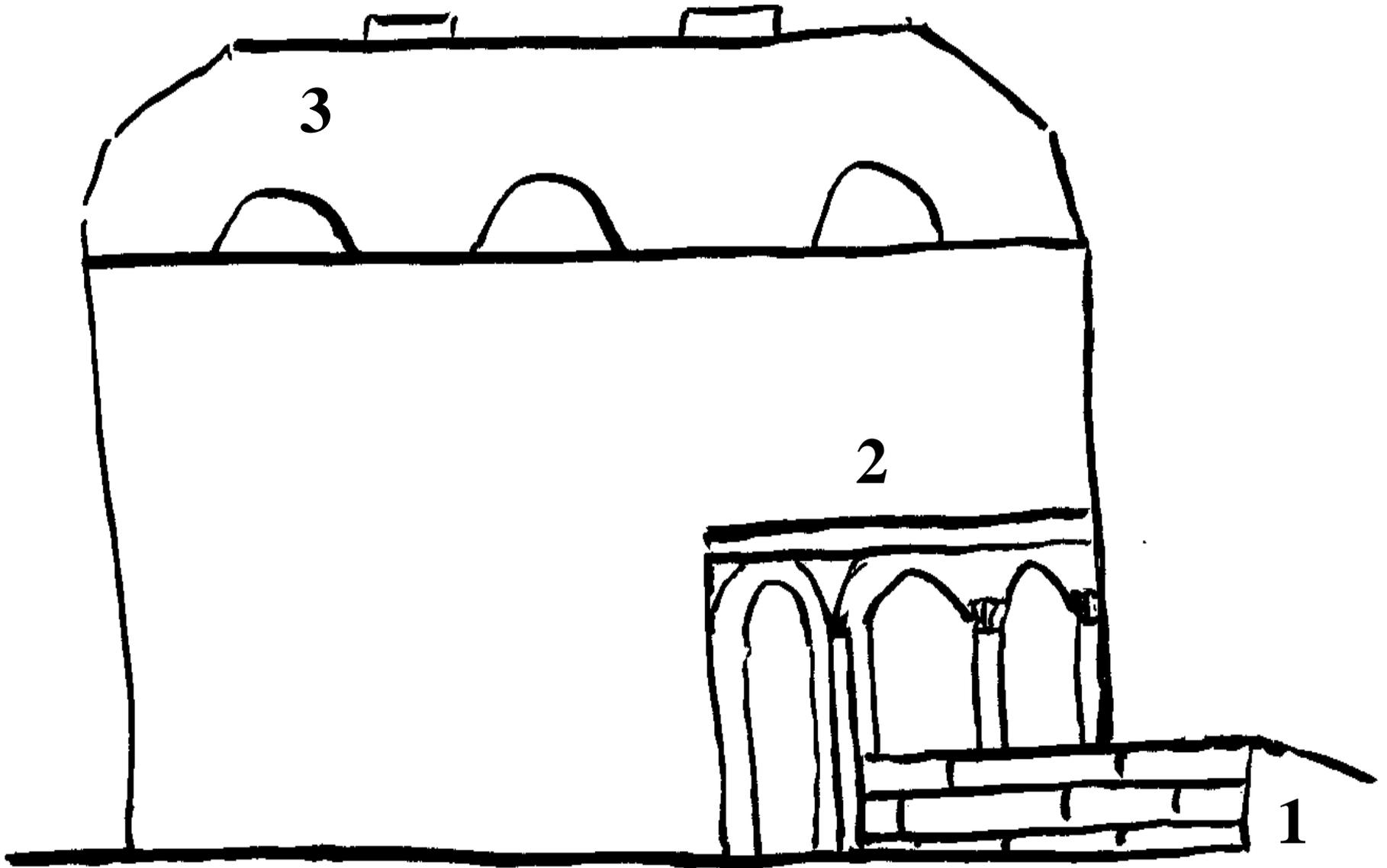
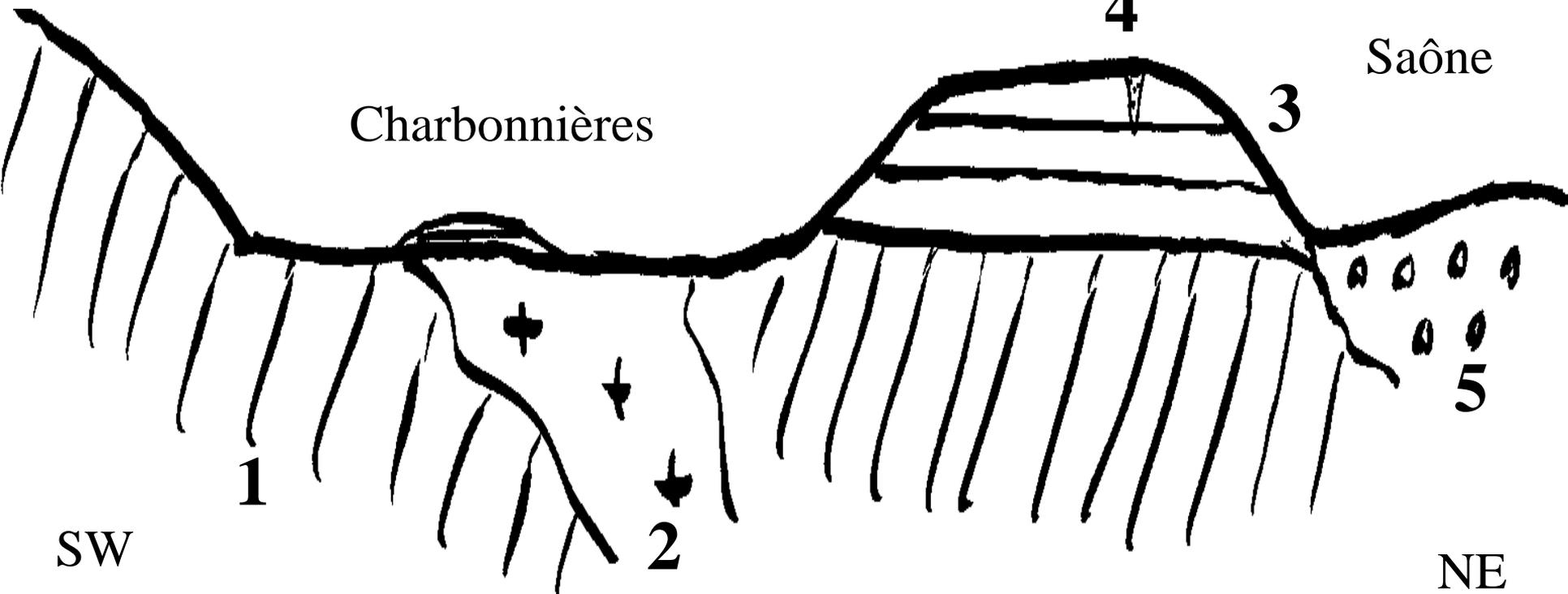


Figure 4

Monts du Lyonnais

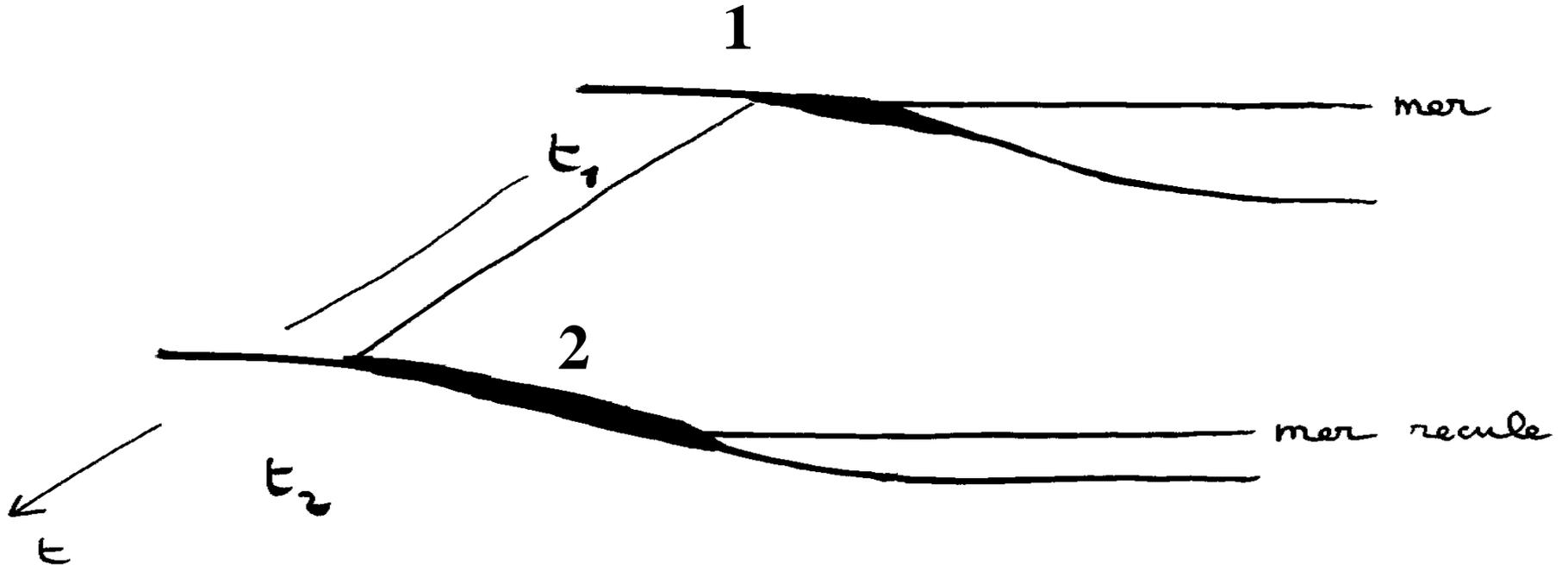


# Chronologies relatives:

Figure 5

- superpositions de strates
- déformations successives
- intrusions de corps éruptifs
- déformations/ érosion / nouveaux dépôts
- transformations d 'une roche par  
recristallisation

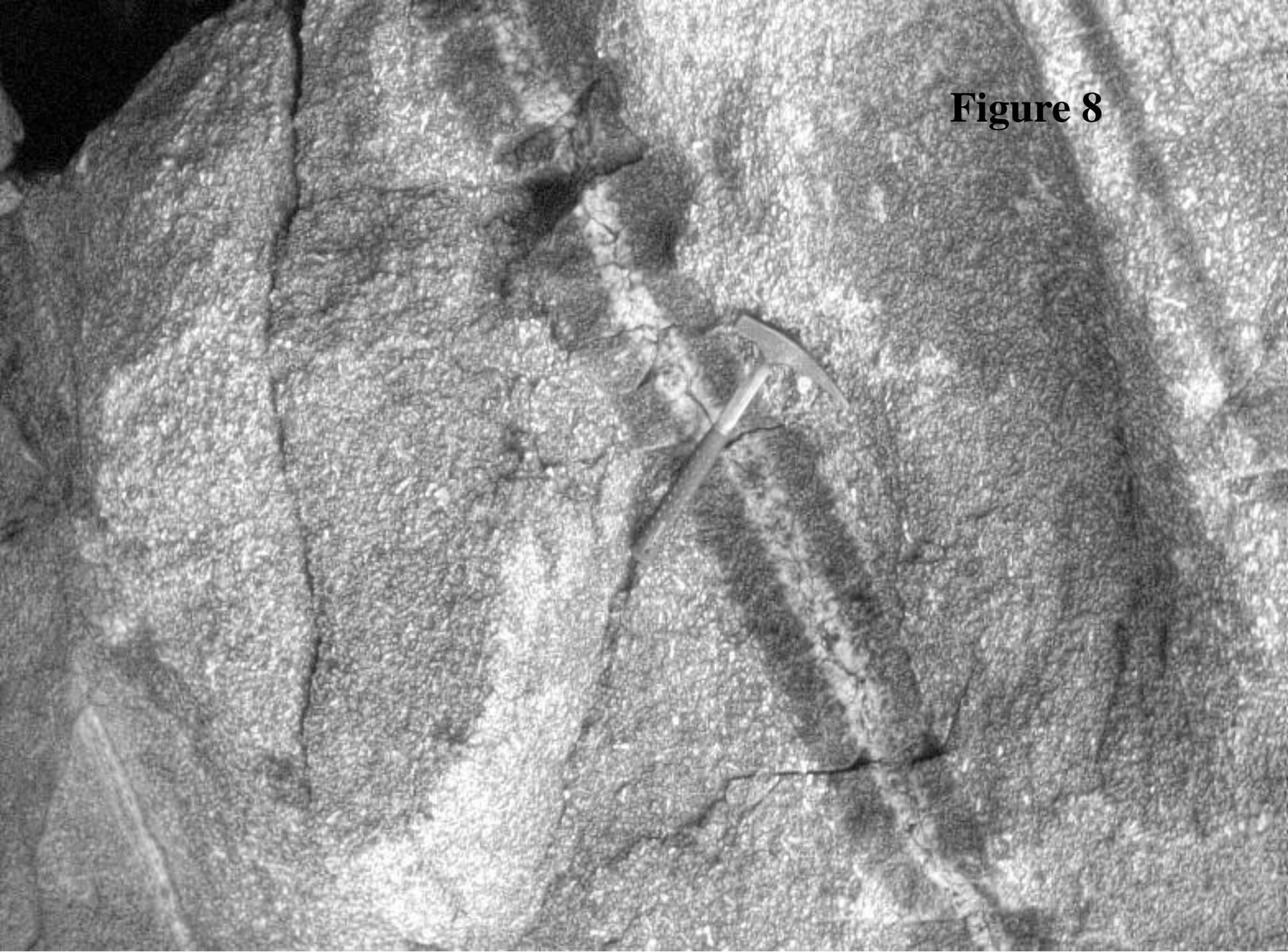
Figure 6





**Figure 7**

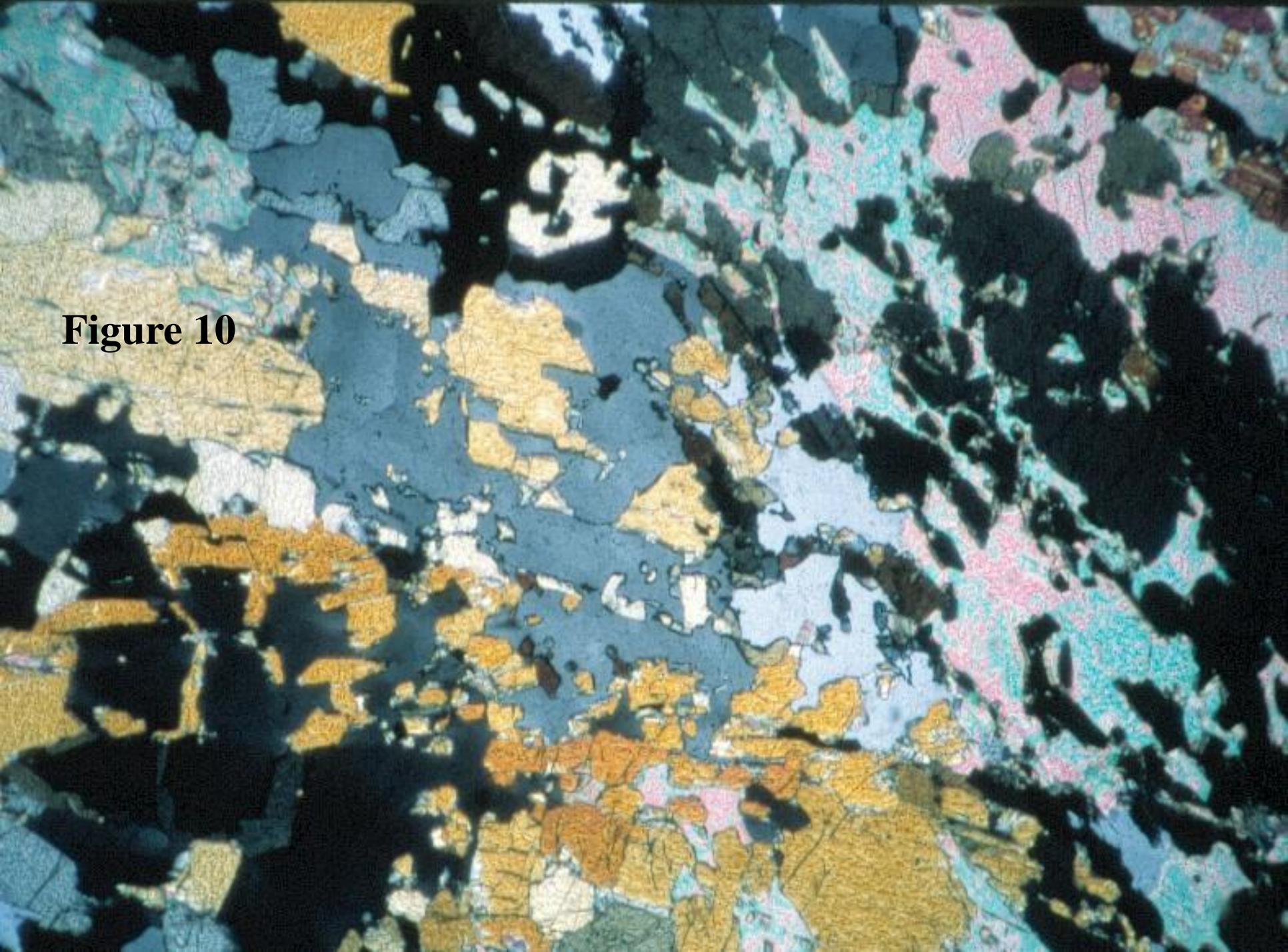
**Figure 8**



**Figure 9**



**Figure 10**





**Figure 11**

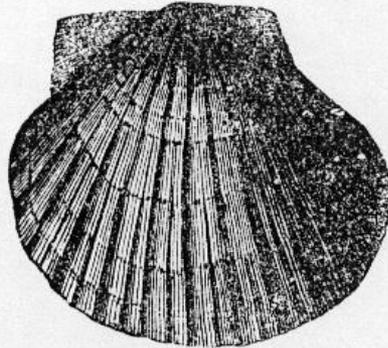
**Figure 12**





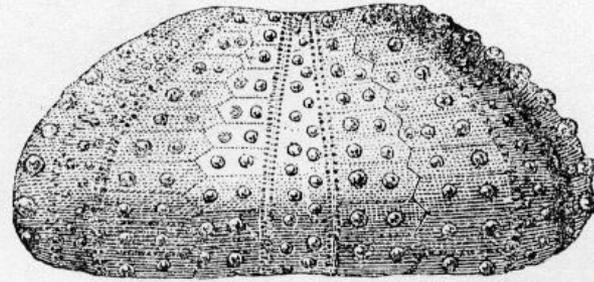
**Figure 13**

Fig. 241.



*Pecten lugdunensis.*

Fig. 242.



*Diadem i seriale.*

Les assises moyennes, ou le lias proprement dit, se distinguent surtout par la *gryphée arquée* (fig. 243), qui est souvent très-abondante, puis l'*ammonite de Buckland* (fig. 244), la *plicatule épineuse* (fig. 245), le *spirifère de Walcot* (fig. 246), par lequel la race s'éteint ;

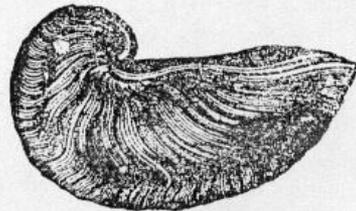


Fig. 243. *Gryphæa arcuata.*

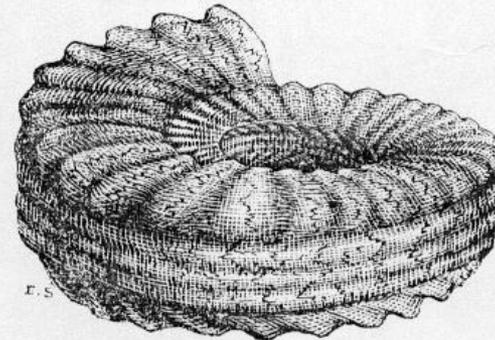


Fig. 244. *Ammonites Bucklandi.*

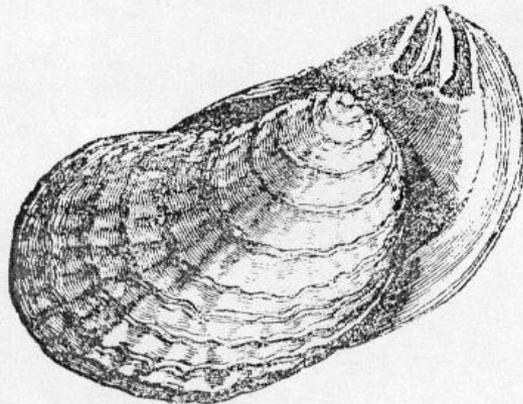


Fig. 245. *Plicatula spinosa*

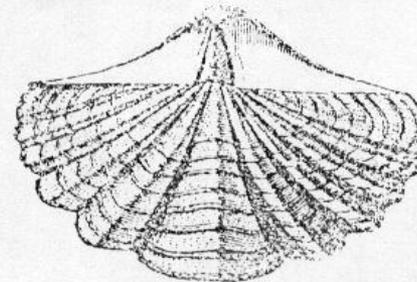


Fig. 246. *Spirifer Walcoti*

# Exemple du couple Rubidium / Strontium



Figure 15

(neutron  $\rightarrow$  proton + électron)

atomes pères (P)  ${}^{87}\text{Rb}$ , atomes fils (F)  ${}^{87}\text{Sr}$

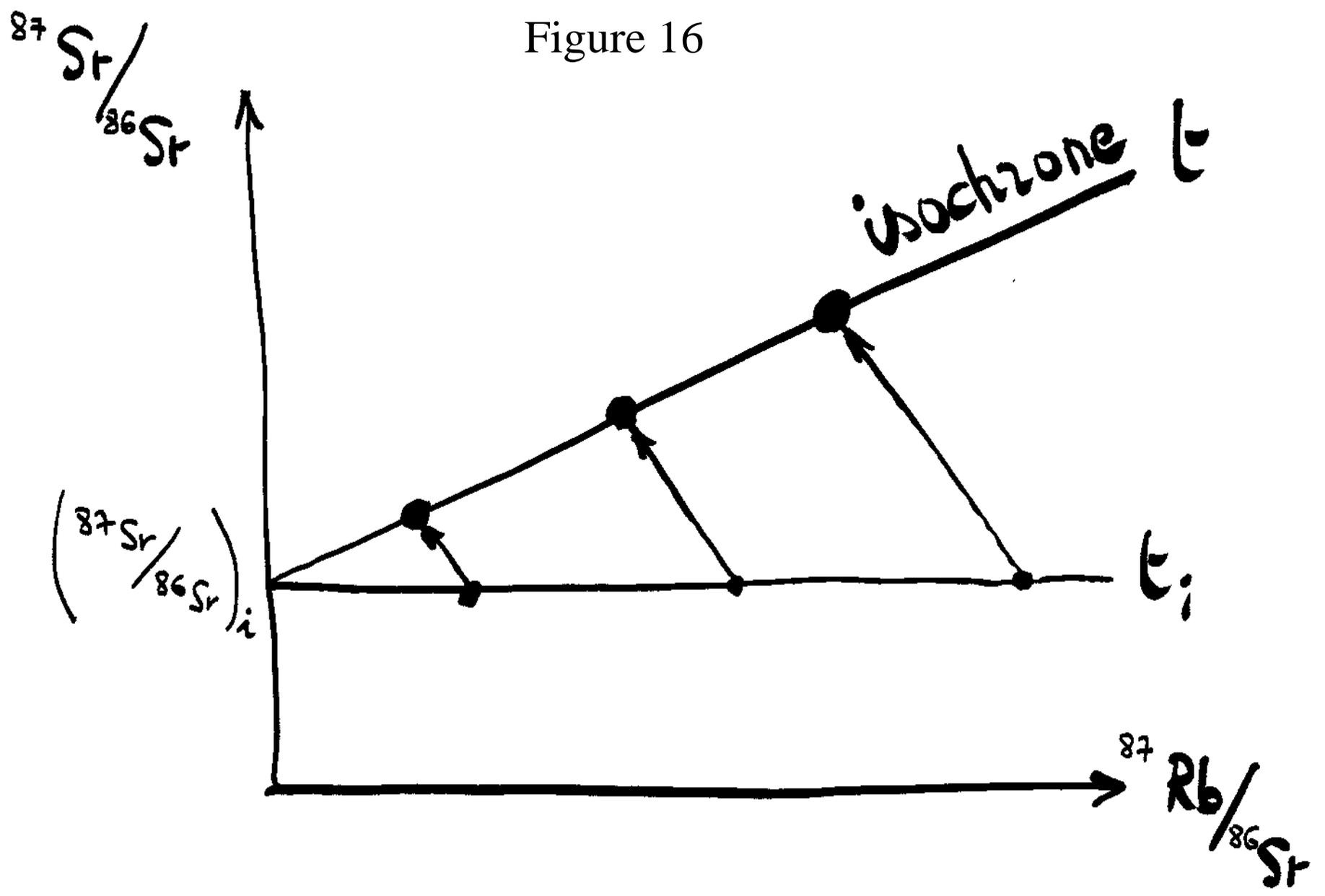
$$dF/dt = - dP/dt = \lambda P$$

$${}^{87}\text{Sr} = {}^{87}\text{Sr}^0 + {}^{87}\text{Rb}(e^{-\lambda t} - 1)$$

$${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr} = ({}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr})^0 + ({}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr})(e^{-\lambda t} - 1)$$

à t donné, relation linéaire entre  ${}^{87}\text{Sr}/{}^{86}\text{Sr}$  (mesuré, relatif au fils) et  ${}^{87}\text{Rb}/{}^{86}\text{Sr}$  (mesuré, relatif au père, incorporé en quantités variables dans différents minéraux; Rb et Sr ont des comportements différents)  $\rightarrow$  tracé d'une **isochrone**

Figure 16



méthode	réactions	T (années) demi-vie	matériel	remarques
U, Th / Pb	$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ $^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$ $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$	$4.51.10^9$ $7.13.10^8$ $1.39.10^{10}$	Zircon, sphène, apatite;  granites	la méthode donne 4 âges dont 3 indépendants $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ : âge > 500 Ma autres > 25 Ma
K/Ar	$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$	$1.31.10^9$	micas, feldspaths, roche totale; roches éruptives	âge > $10^5$ a attention à pertes d'A
Rb/Sr	$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$	$4.70.10^{10}$	micas, feldspaths, amphib, px, roche totale; r. éruptives et métamorph.	âge > 10 Ma
$^{14}\text{C}$	$^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N}$	$5.75.10^3$	restes organiques avec C	âge < $4.10^4$ a

**Figure 17**

# Evaluation de l'âge de la terre

Figure 18

Utilisation simultanée des deux couples

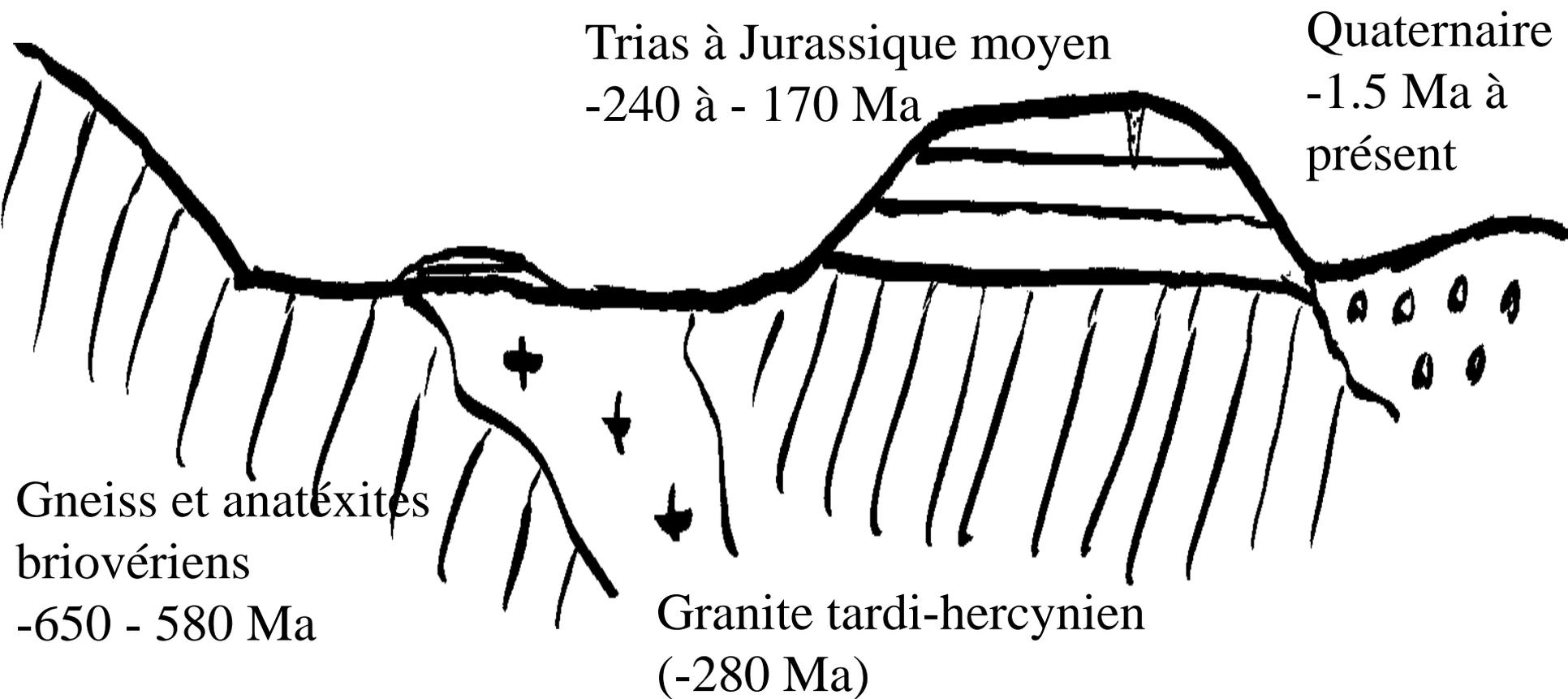


$$\left[ \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} - \left( \frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)^0 \right] / \left[ \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} - \left( \frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)^0 \right]$$

$$= \left( \frac{^{235}\text{U}}{^{238}\text{U}} \right)^0 \left[ \frac{(e^{-\lambda_{235}t} - 1)}{(e^{-\lambda_{238}t} - 1)} \right]$$

tracé d'une isochrone (Patterson) avec cinq météorites et une roche terrestre (sédiments océaniques): 4.55 milliards d'années

**Figure 19**



# Fonctionnement de la terre

## Histoire minérale

### **Etape 0:**

du Big Bang à la formation du système solaire

(-15 (?) à - 4,6 milliards d'années)

### **Etape 1:**

accrétion, fusion, début du dégazage

liquide interne/ mince croûte / gaz

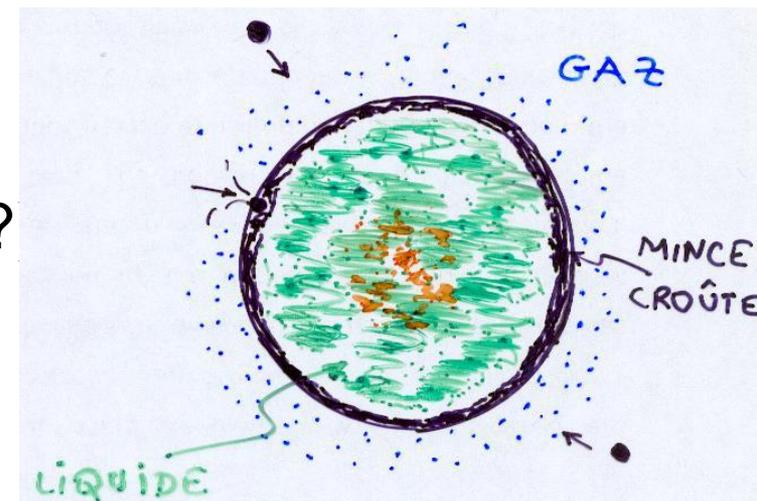
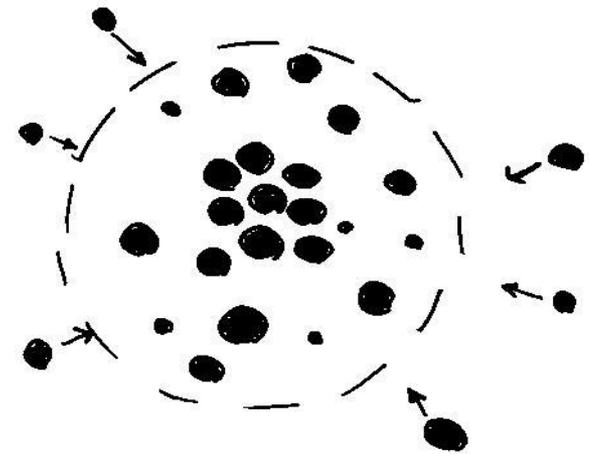
première différenciation interne

noyau fer liquide (champ magnétique?)

manteau (convection)

(durée: 50 millions d'années env.)

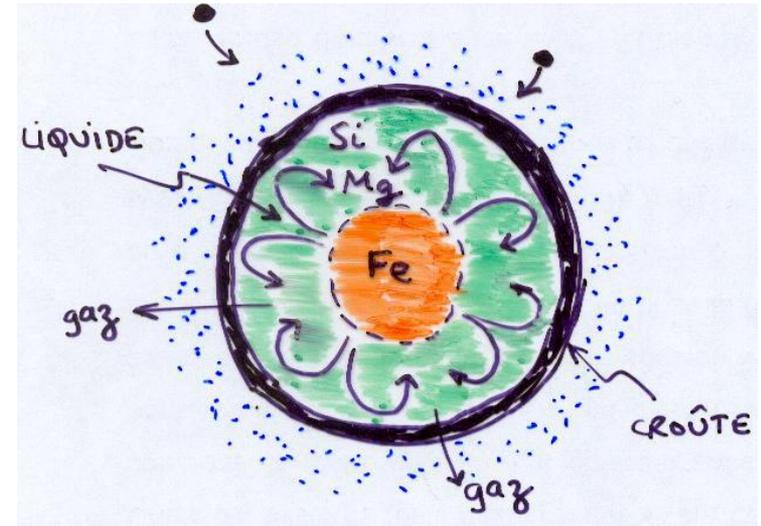
**Figure 20**



## **Etape 2:**

solidification de la graine  
épaississement de la croûte  
condensation de l'eau (pluie): océan primordial  
atmosphère primitive:  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ ,  
( $CH_4$ ,  $NH_3$ )  
poursuite du bombardement météoritique  
(durée: 50 millions d'années env.)

## **Figure 21**



## **Etape 3:**

tectonique des plaques, cycle des roches  
(-4 milliards d'années jusqu'à aujourd'hui)  
formation de la croûte importante jusqu'à -  
1000 millions d'années  
âge des plus anciennes roches: - 3.6 milliards

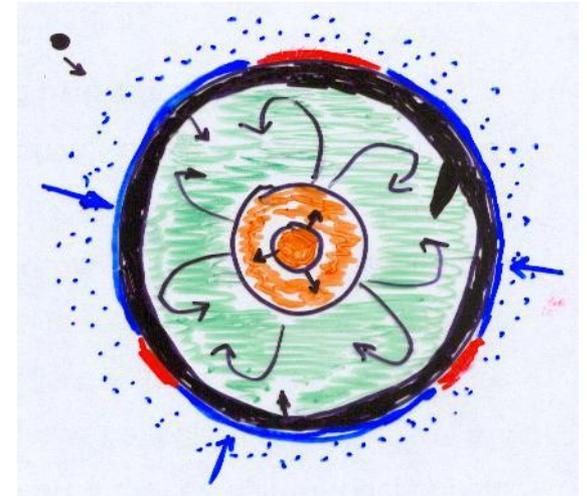
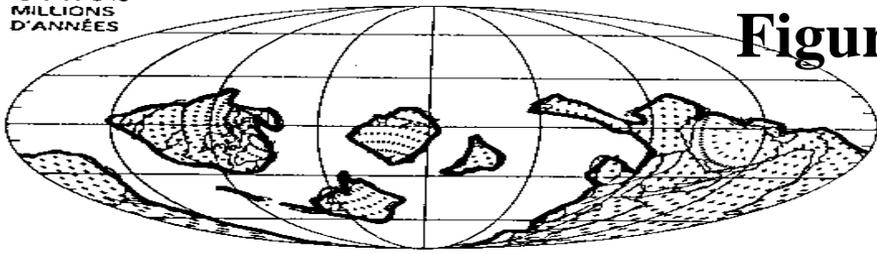
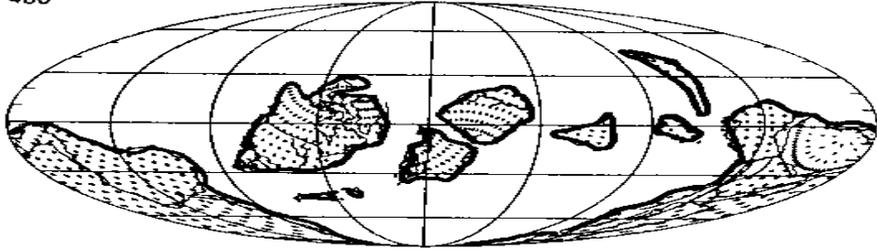


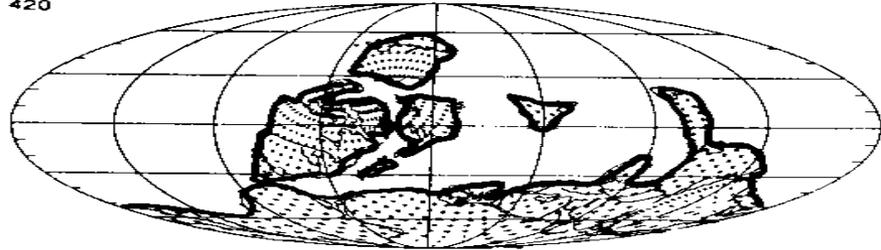
Figure 22



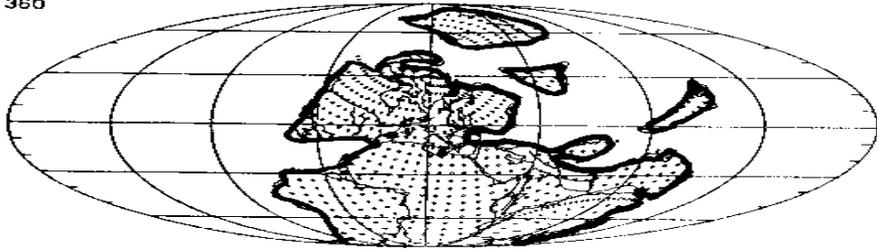
480



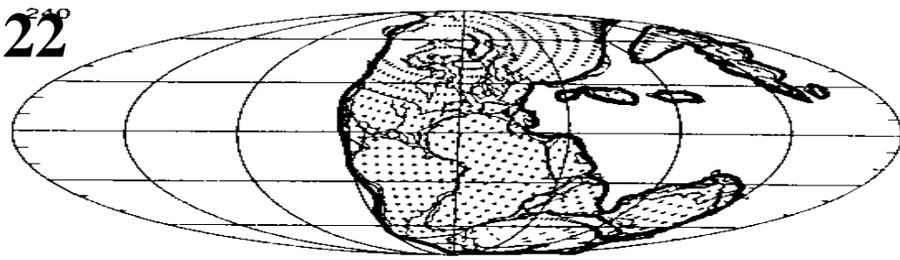
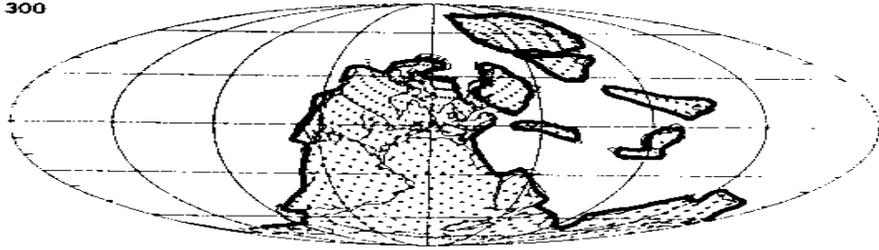
420



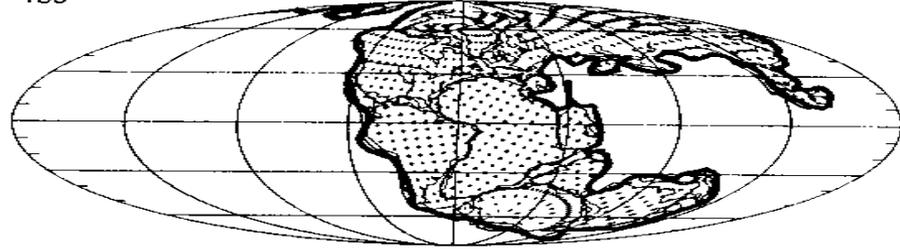
360



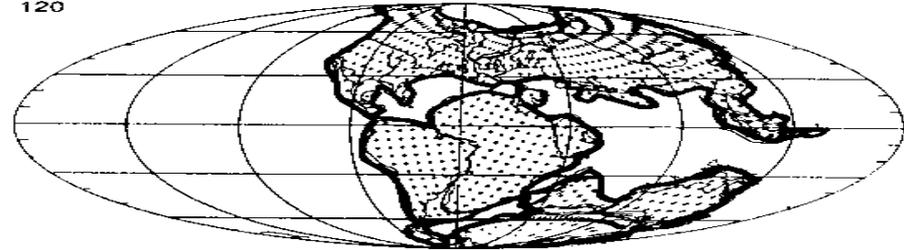
300



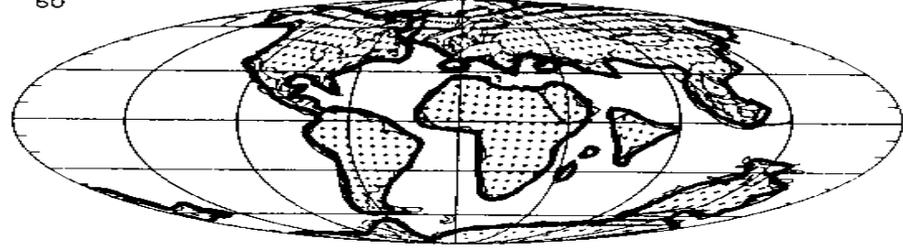
180



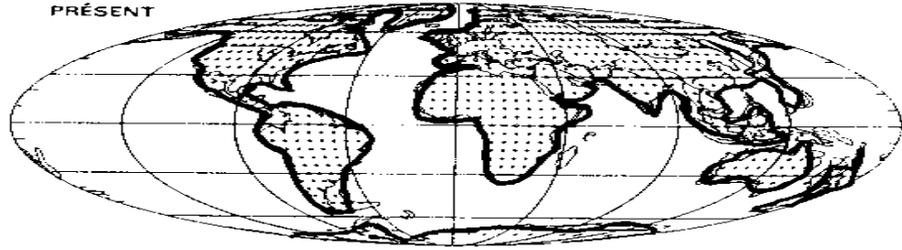
120

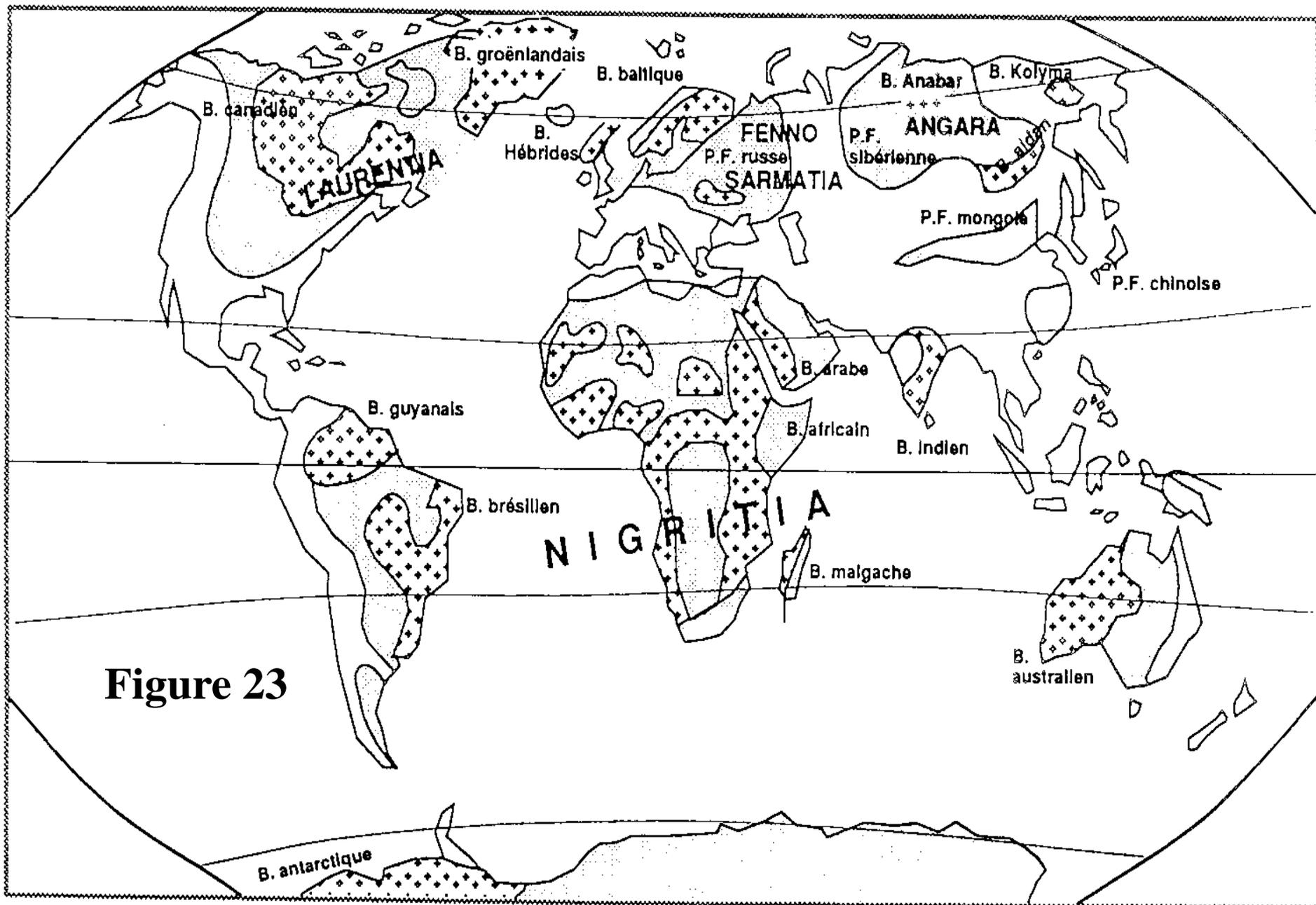


60



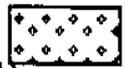
PRÉSENT



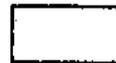


**Figure 23**

boucliers et plates-formes  
précambriens (Auboin, 1967)



Boucliers



Plates-formes

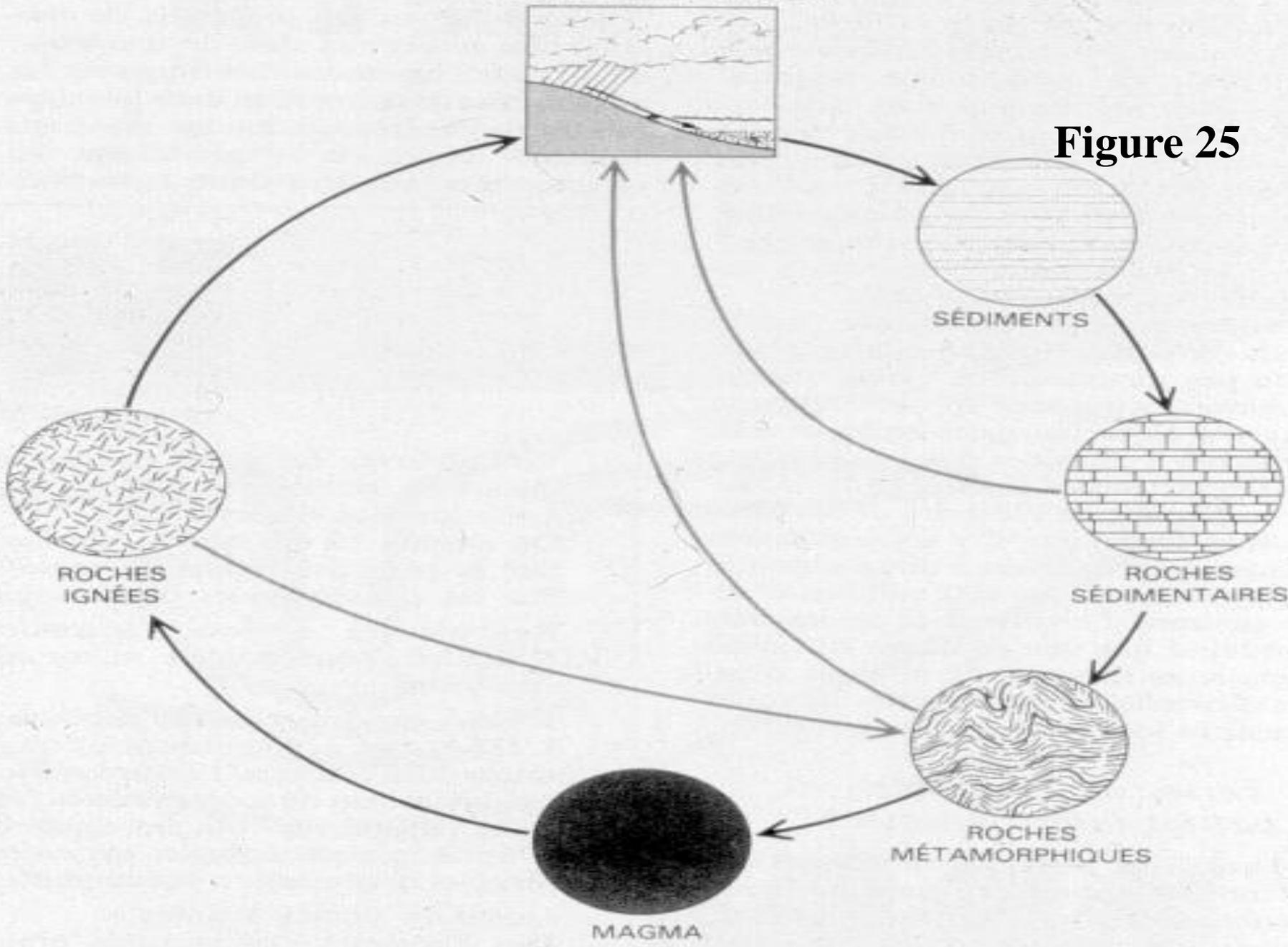
# Cycle des roches

- altération
- érosion
- sédimentation
- enfouissement
- métamorphisme
- magmatisme
- surrection

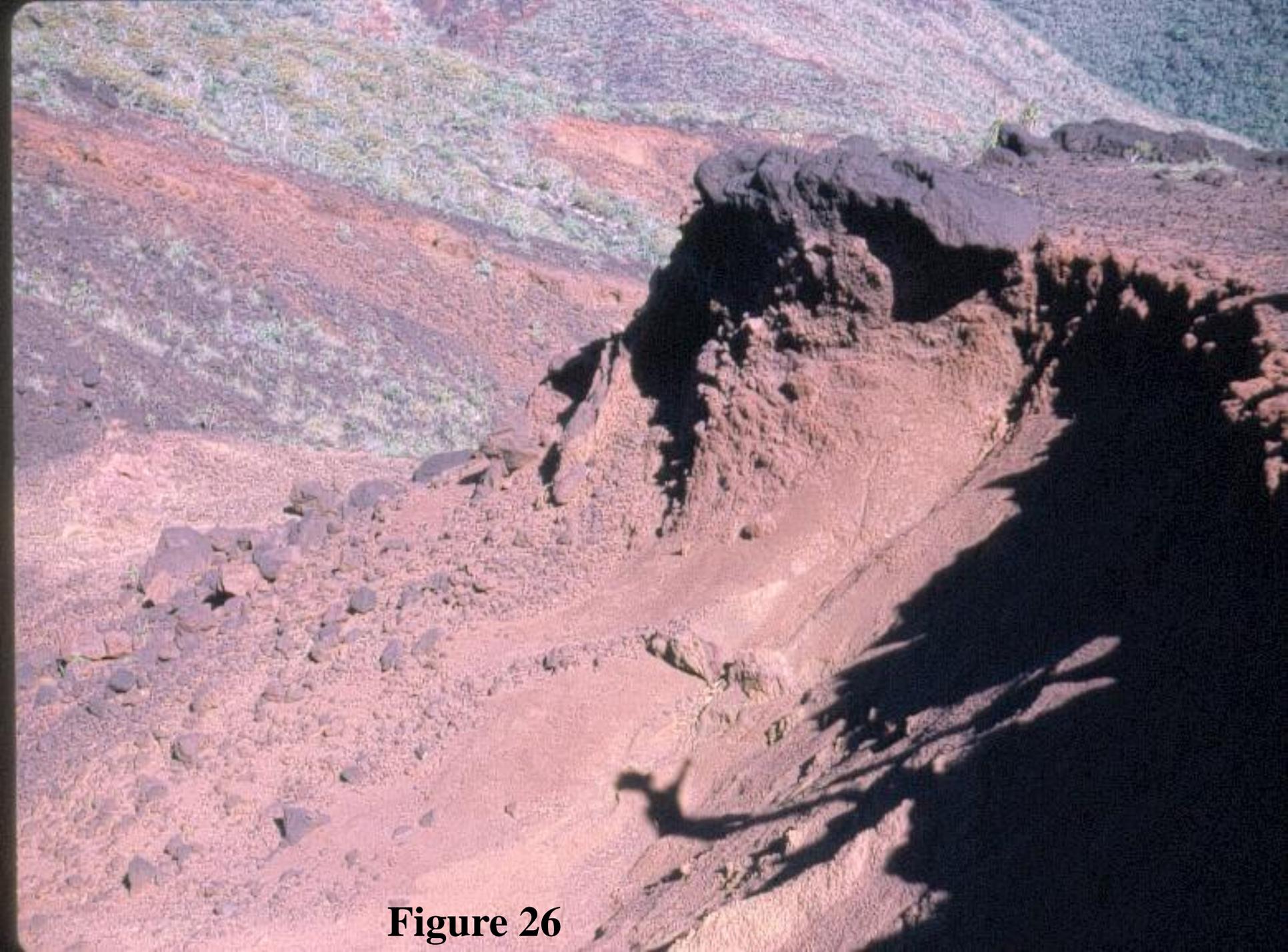
**Figure 24**

ALTÉRATION ET ÉROSION

Figure 25



← PLUS FORTES TEMPÉRATURE ET PRESSION

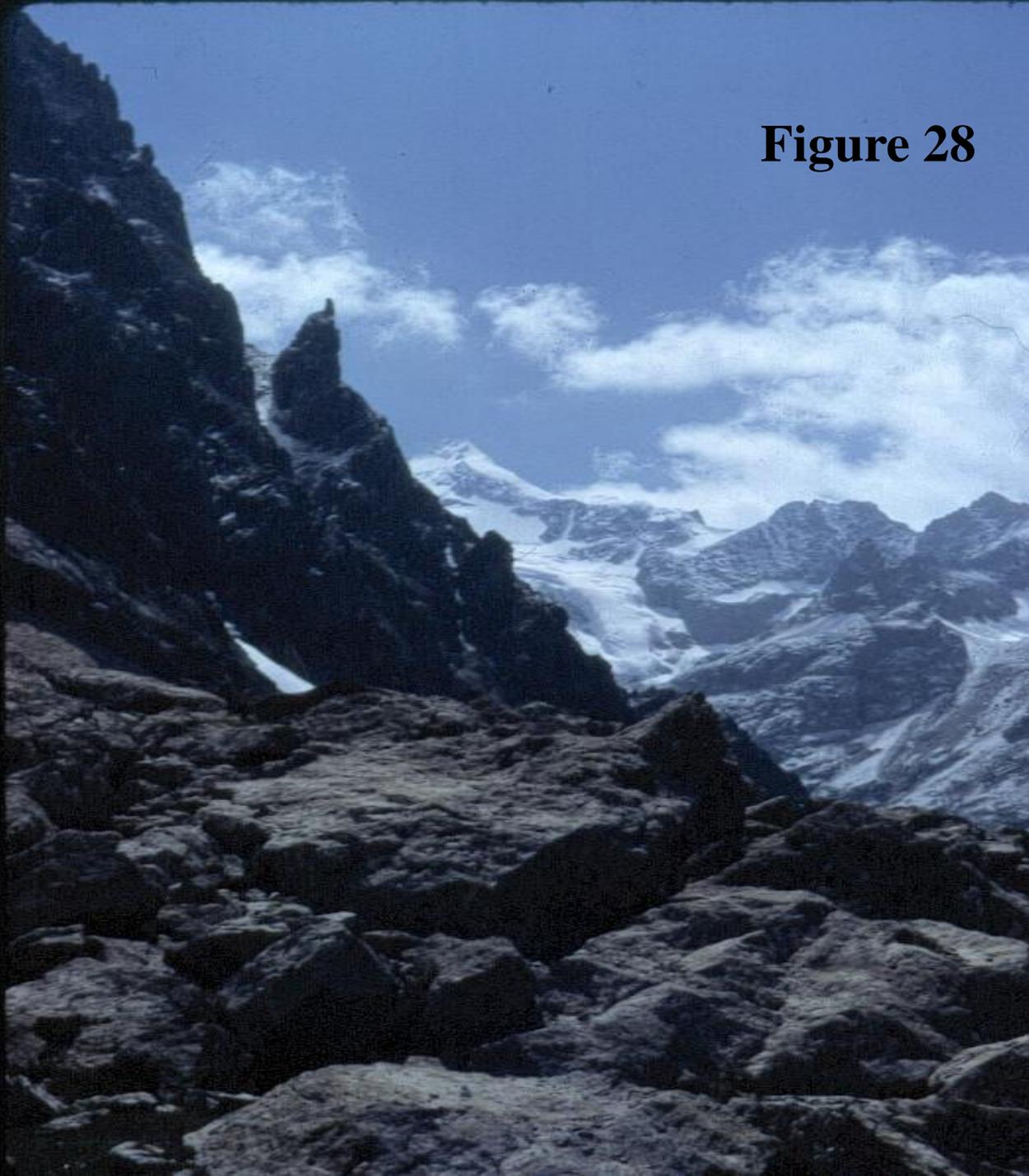


**Figure 26**

**Figure 27**



**Figure 28**

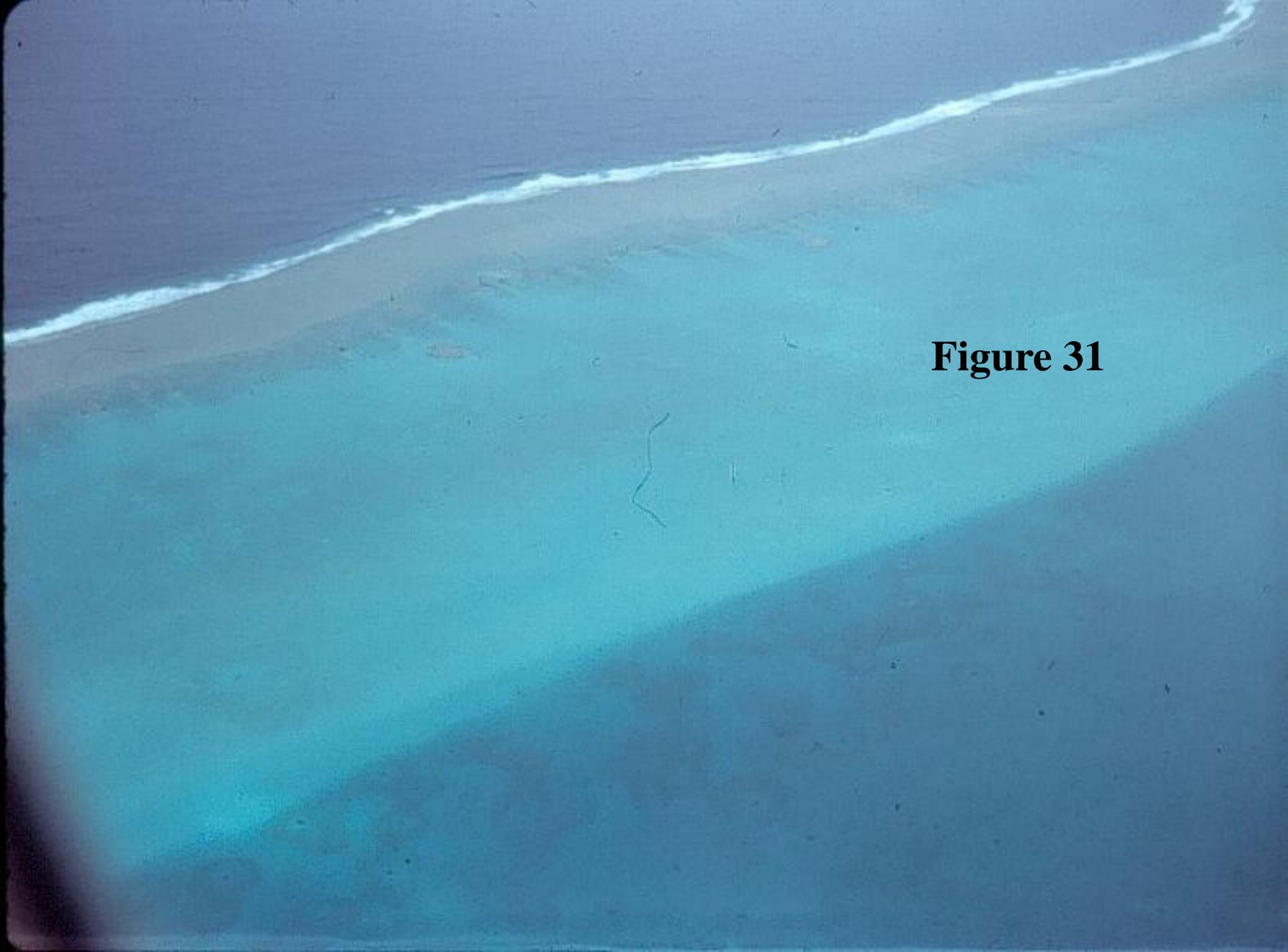




**Figure 29**



**Figure 30**



**Figure 31**

**Figure 32**



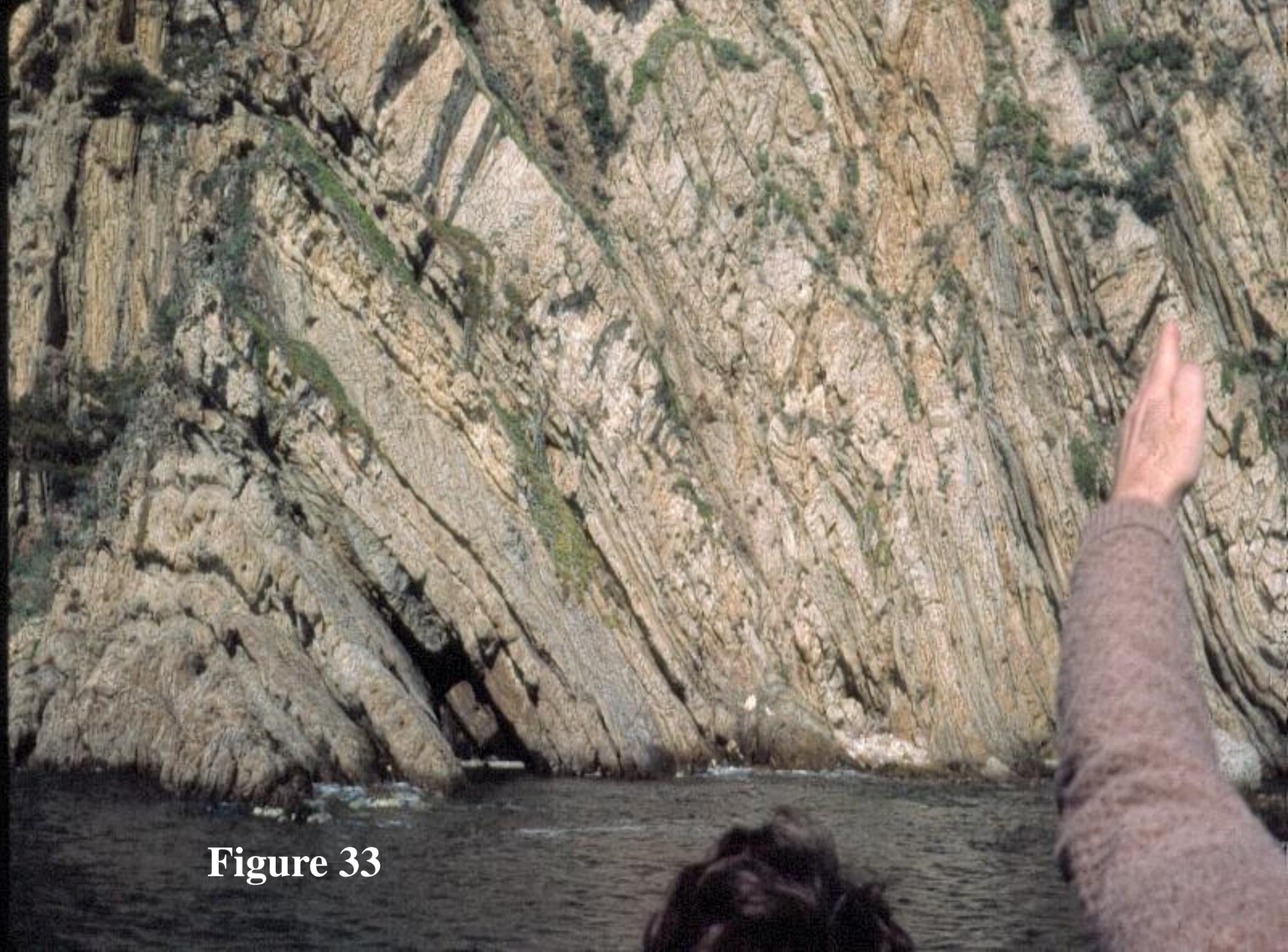
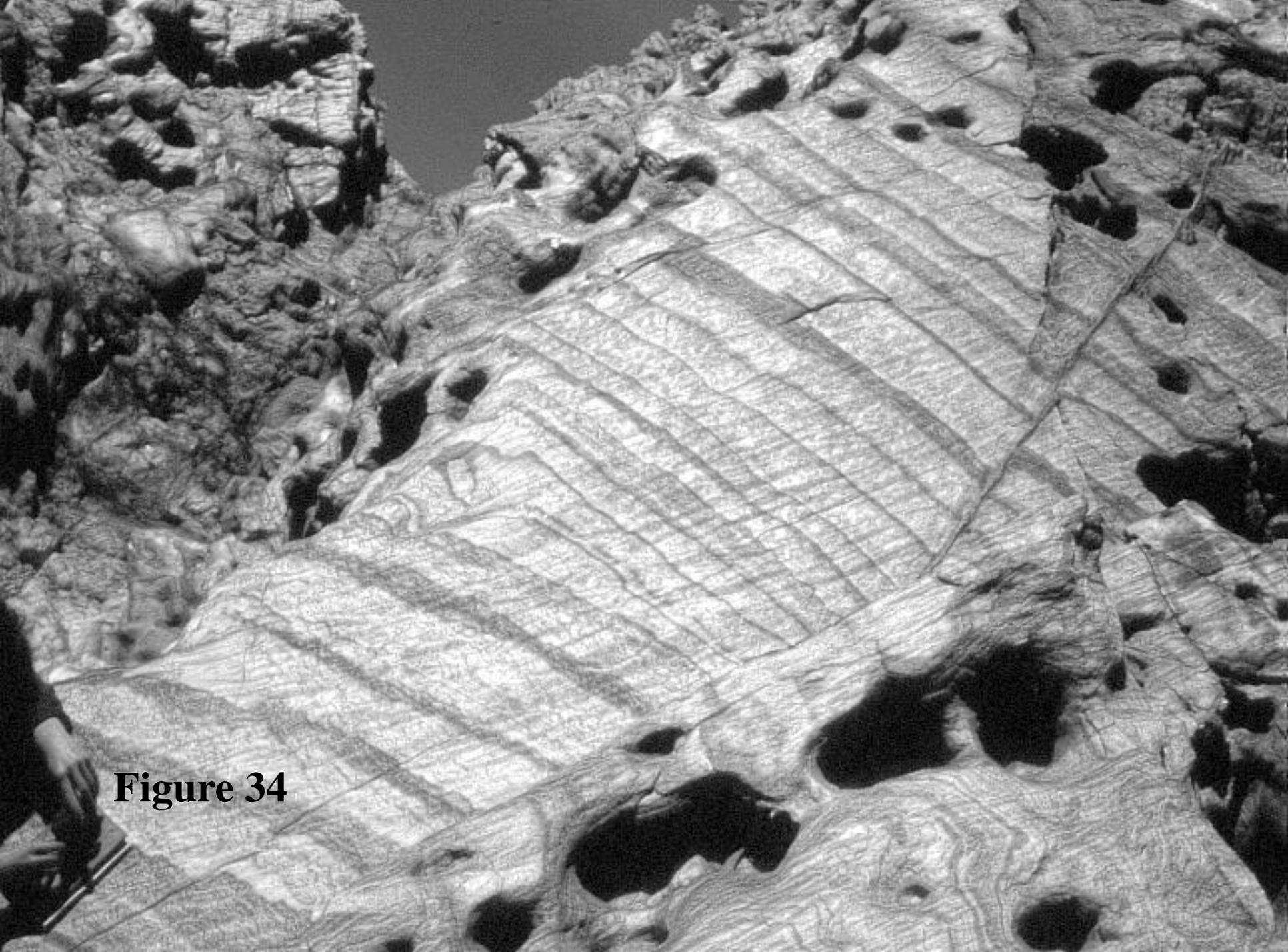


Figure 33



**Figure 34**



**Figure 35**



**Figure 36**



**Figure 37**



**Figure 38**



**Figure 39**



**Figure 40**



**Figure 41**

# Histoire biologique connue par la géologie

Figure 42

## **Vie végétale**

- molécules organiques formées dans conditions réductrices (milieu interstellaire? Sources hydrothermales sous-marines?)
- polymérisation: chaînes (rôle des argiles?)
- globules, gouttes de vie

*vie développée dans les océans: dégazage de la terre, baisse de T et formation d'eau liquide*

**-3800:** les premières cellules (procaryotes)  
algues bleues, stromatolites

- **1800**: algues vertes (photosynthèse)

- **1400**: cellules à noyau (eucaryotes)  
unicellulaires

- **1300**: “ champignons ”

**Figure 43**

- **430** (Silurien): végétaux hors de l'eau: psilopsidés  
plantes vasculaires

- **360** (Carbonifère): gymnospermes (conifères)

- **100** (Crétacé moyen): angiospermes plantes à  
fleurs

# Vie animale

- **700**: métazoaires (multicellulaires)  
invertébrés: mollusques, poissons

## la vie sur terre

**Figure 44**

- **450**: insectes (premiers animaux hors de l'eau), Ordovicien
- **400**: batraciens  
(premiers vertébrés terrestres)  
Dévonien et ère primaire
- **300**: reptiles, ère secondaire

- **65**: mammifères

ère tertiaire (apparus au Permien)

depuis quelques millions d'années: humanidés et homme, quaternaire

**Figure 45**

## **Couplage vie végétale vie animale**

- photosynthèse (vie végétale) -> O<sub>2</sub> ->  
vie animale (hémoglobine)

- chaîne alimentaire (exemples)

psilopsidés -> batraciens (30 millions  
d'a. après)

gymnospermes -> reptiles

plantes à fleurs -> mammifères



**Figure 46**

Fig. 1

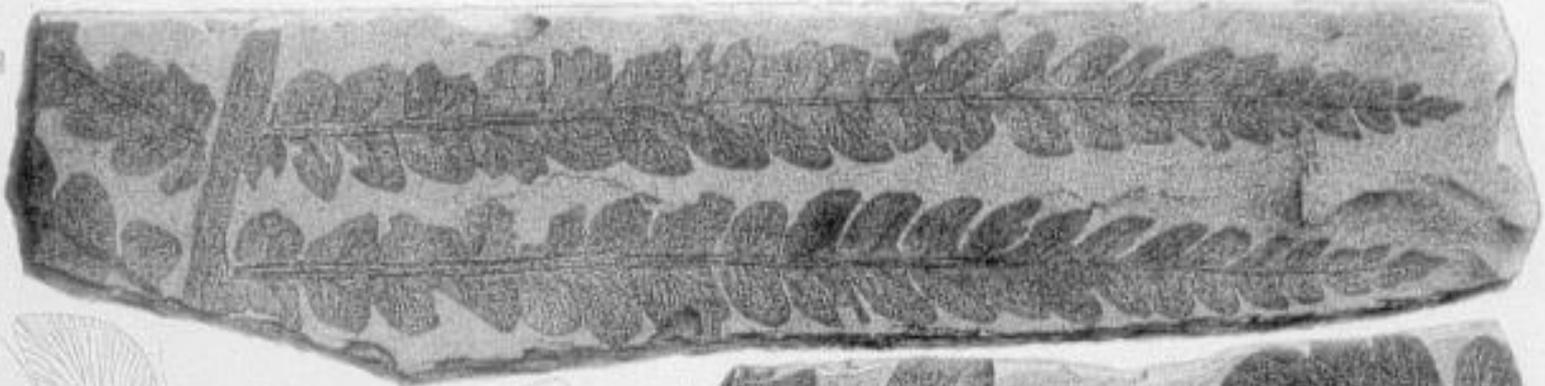


Fig. 14



Fig. 15

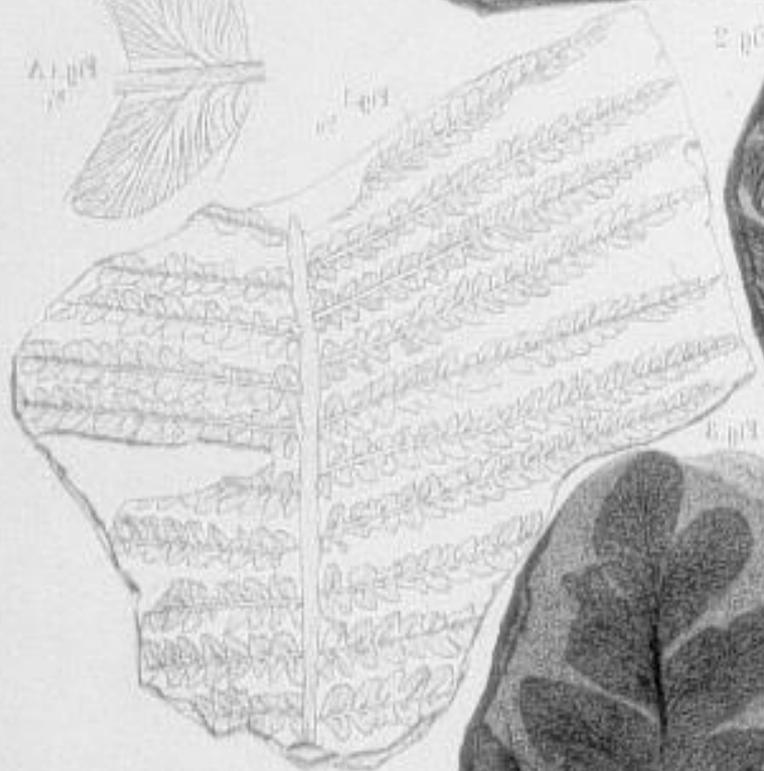


Fig. 2

Fig. 3

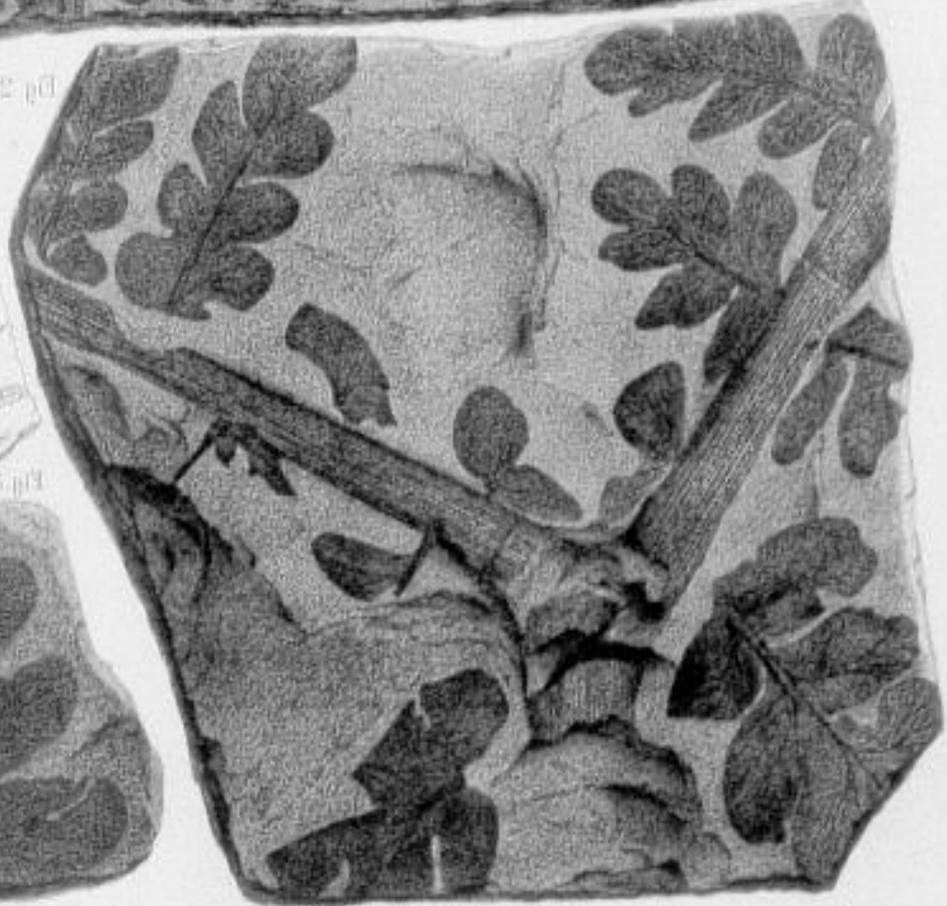
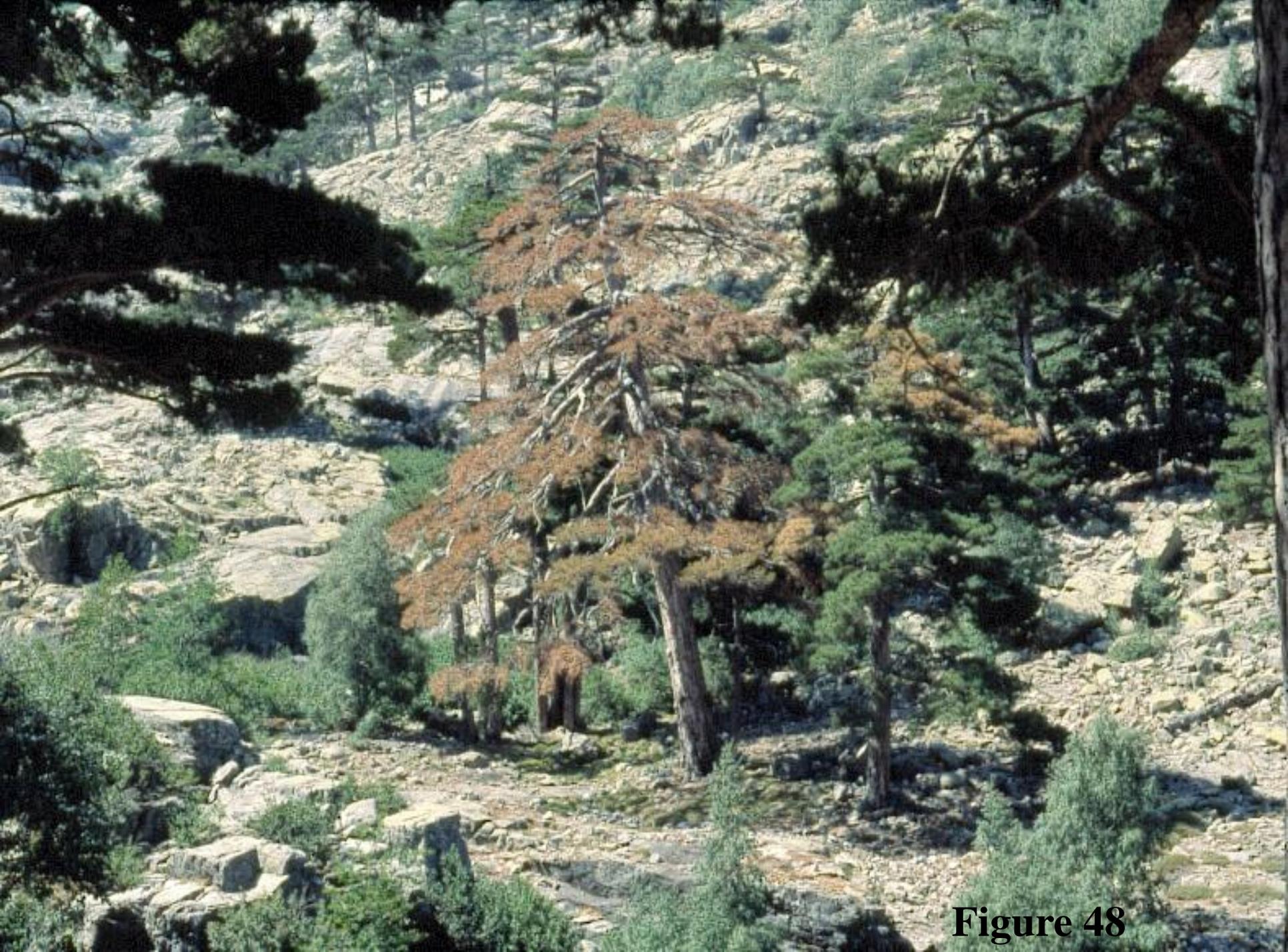


Figure 47

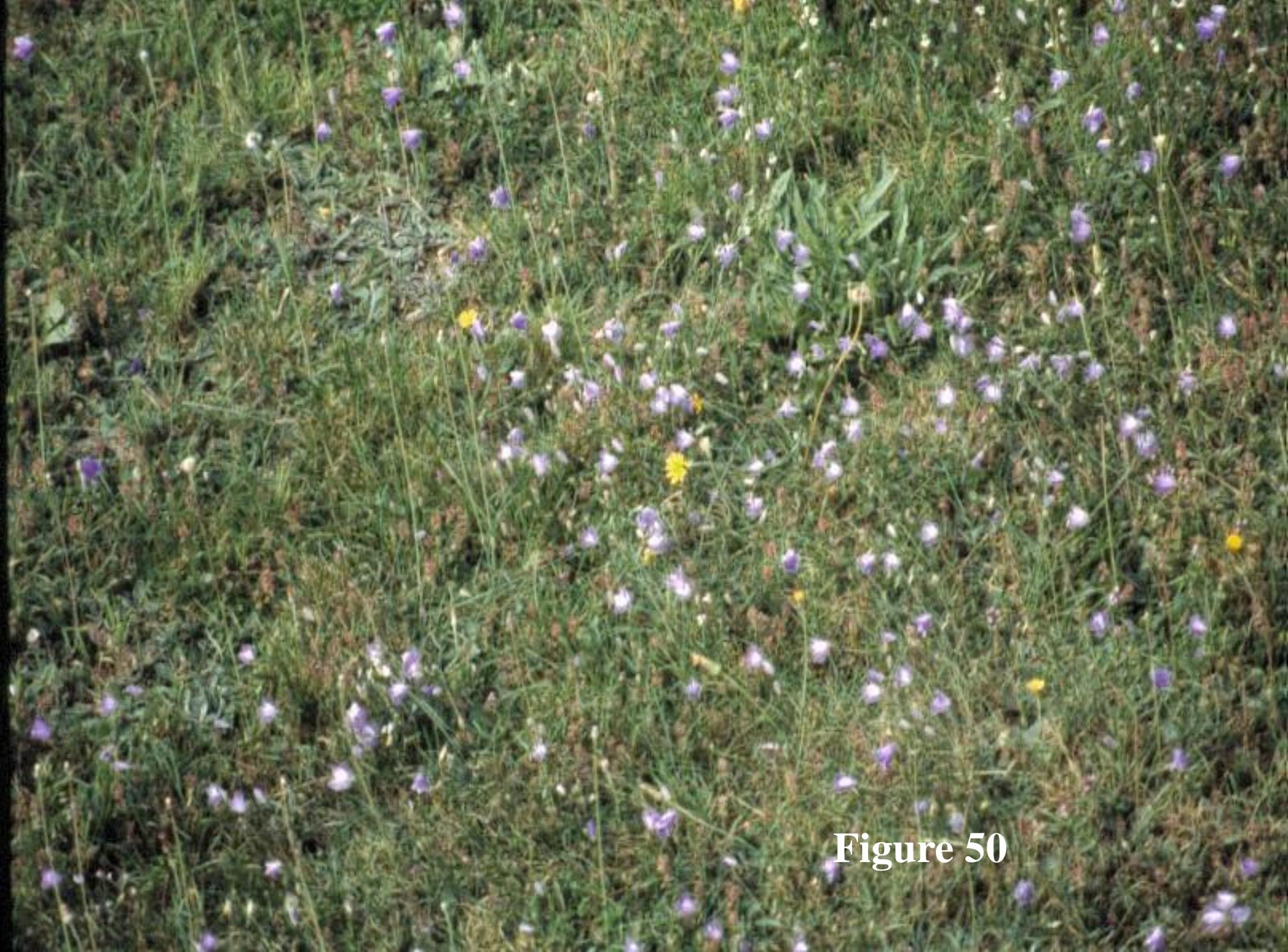


**Figure 48**



Rosa orientalis  
Eggenstein bei W.  
Franken  
Juni 1876  
E. S. V. ...

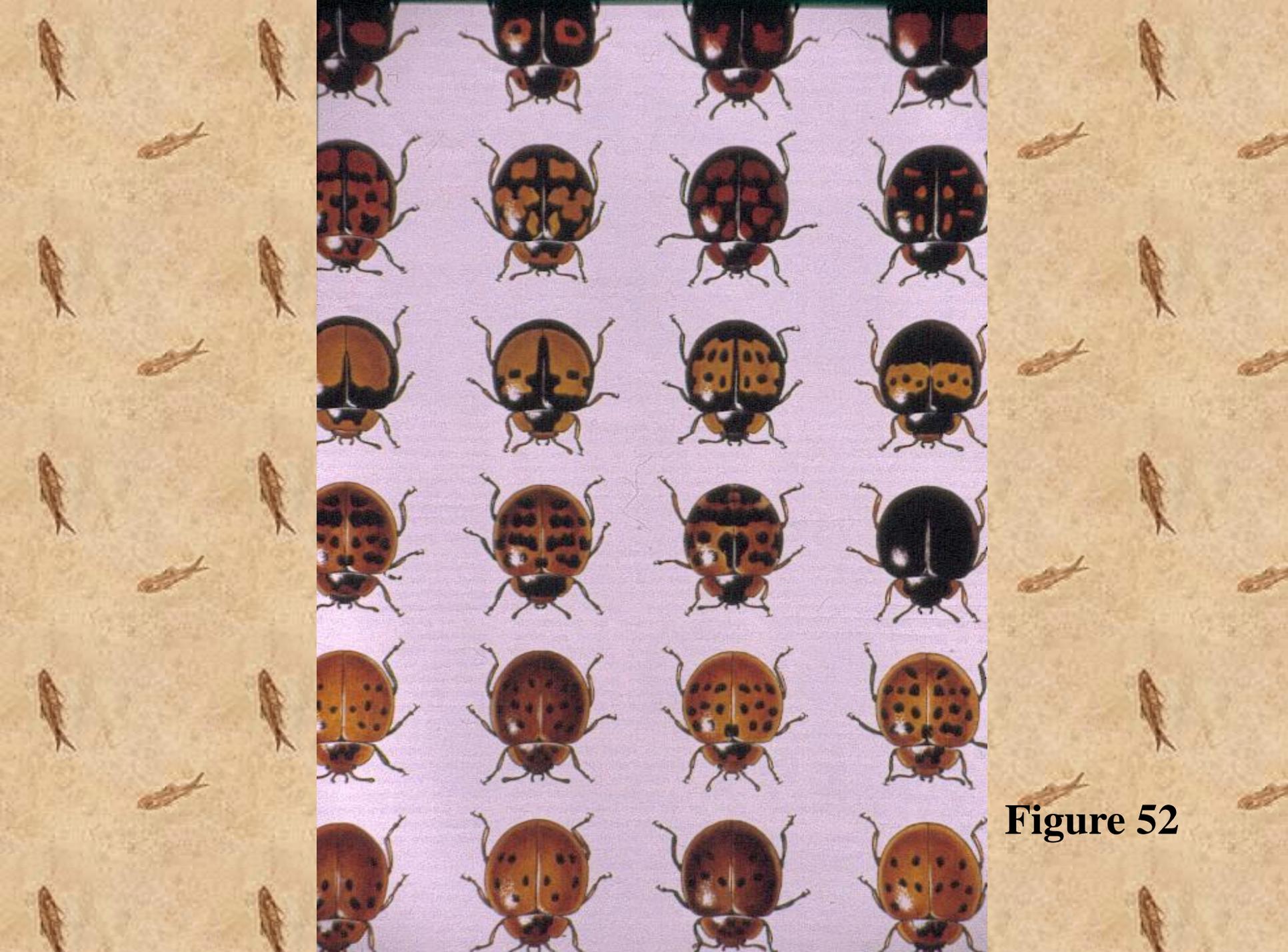
**Figure 49**



**Figure 50**



**Figure 51**



**Figure 52**

# ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES

## ÉVOLUTION DES VERTÉBRÉS

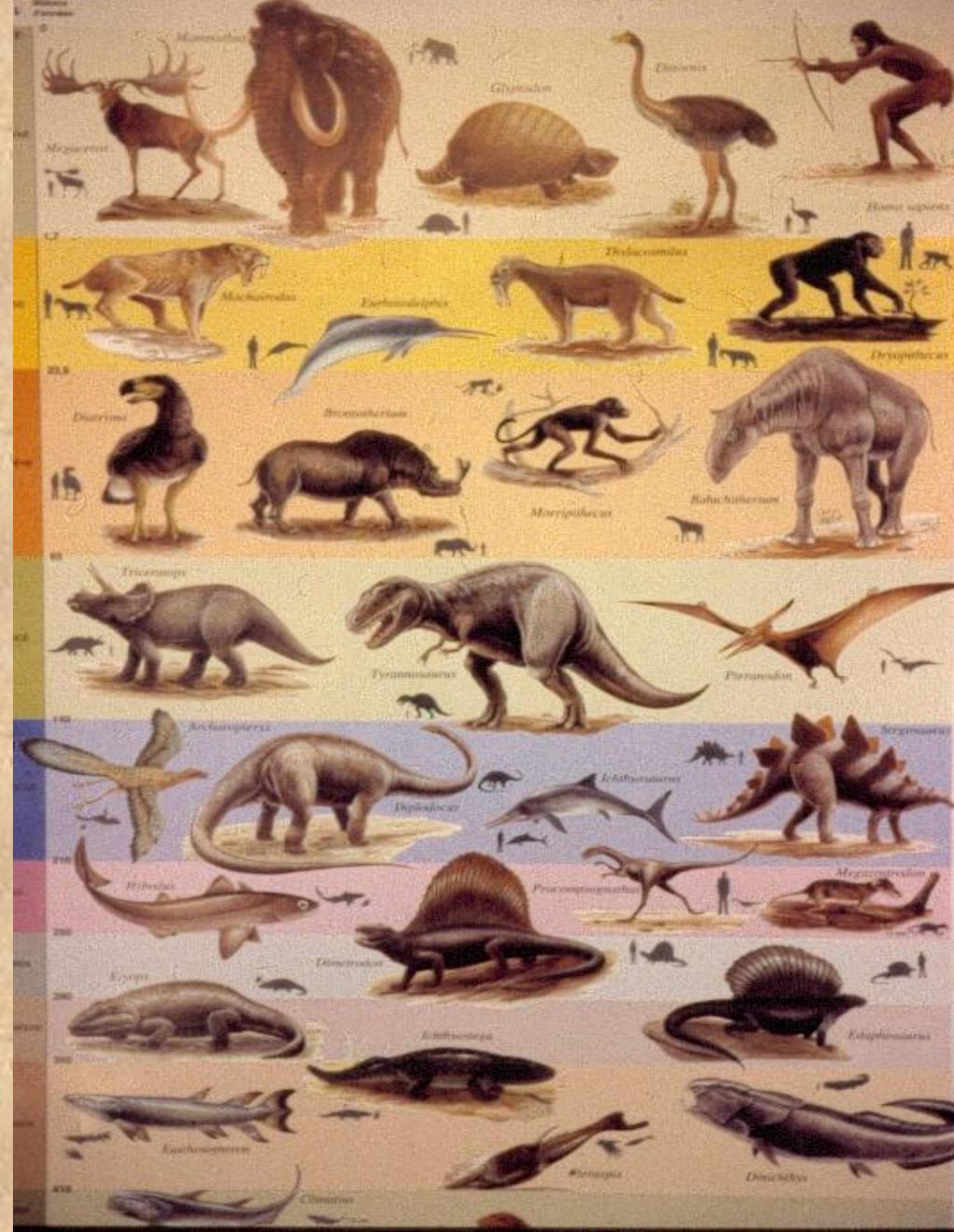


Figure 53

**Figure 54**



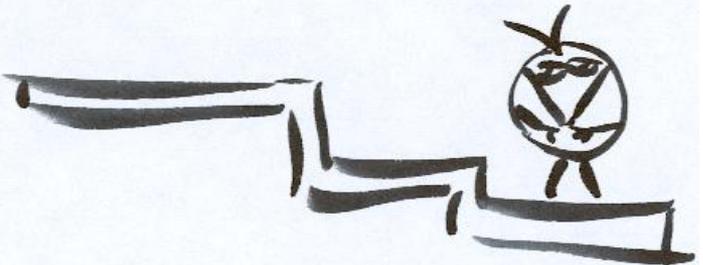
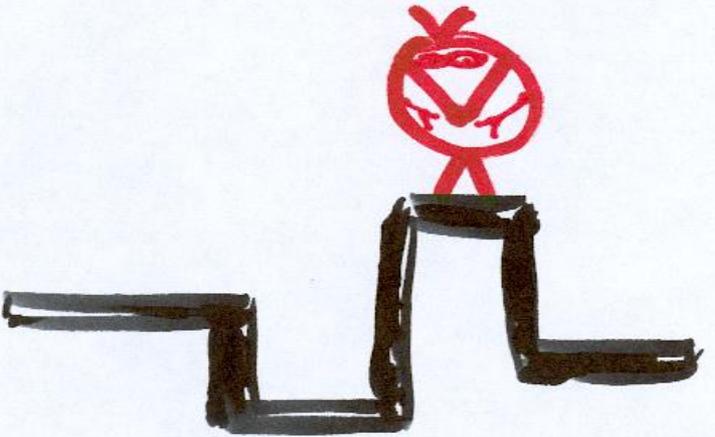
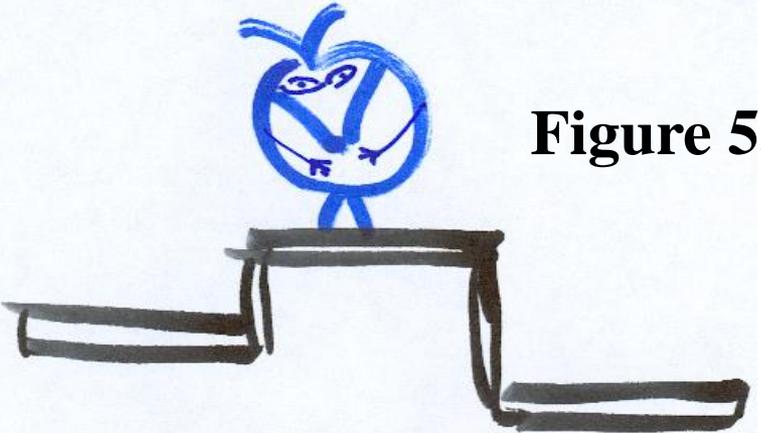
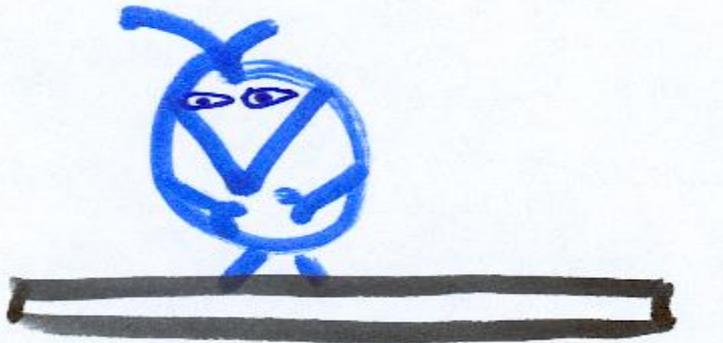
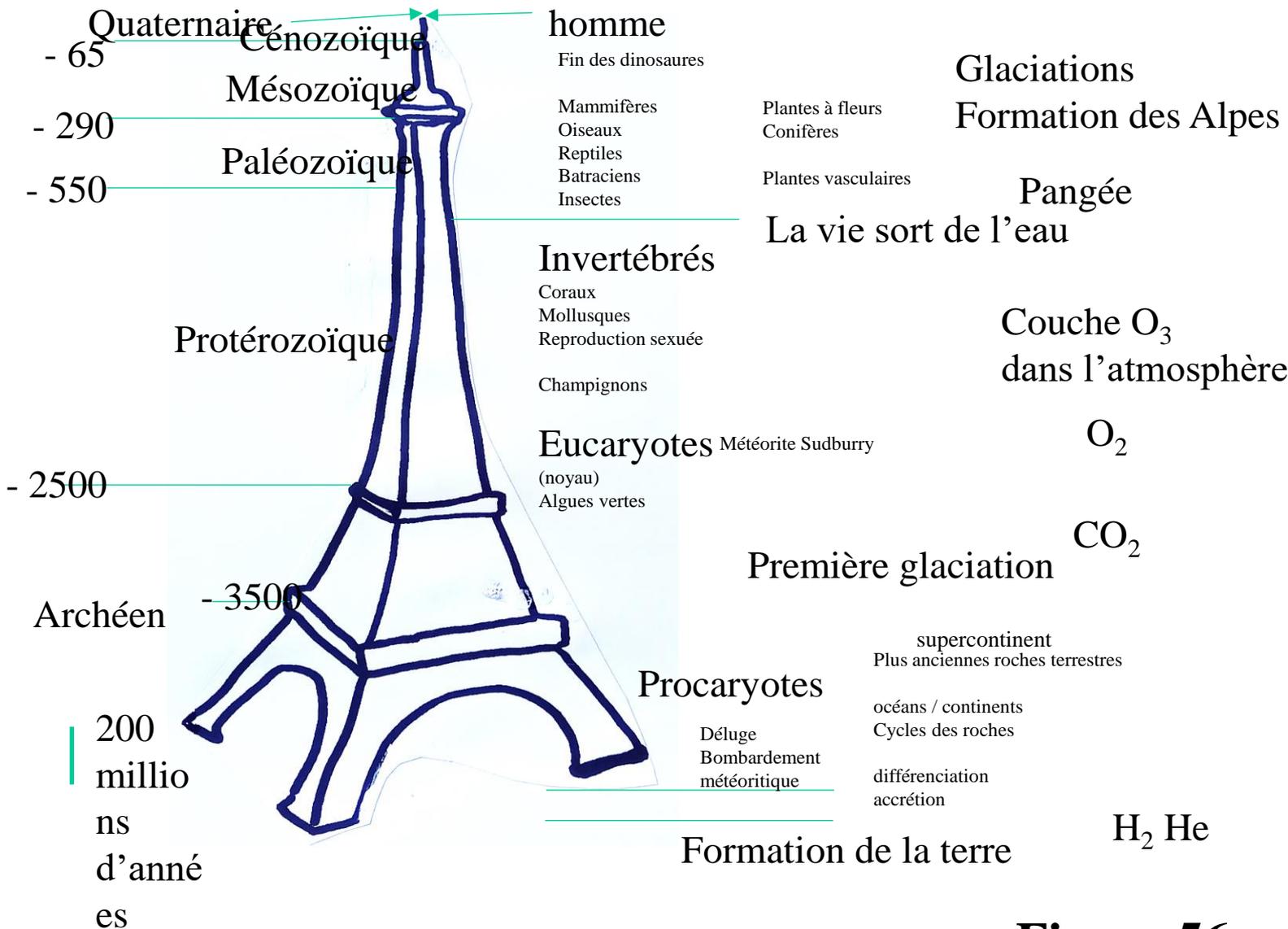


Figure 55



**Figure 56**

# Le temps géologique modélisé

écriture d 'équations différentielles et aux dérivées partielles

- **moteur interne**: la convection dans le manteau; viscosité, régime thermique; mm - cm / an; milliers de km, centaines de millions d 'a.
- **moteur externe**: les paramètres orbitaux de la terre; climats, circulation atmosphérique, océanique, cycle de l 'eau; jours, années, dizaines de milliers d 'années
- opposition orogénèse / érosion - sédimentation

Figure 57

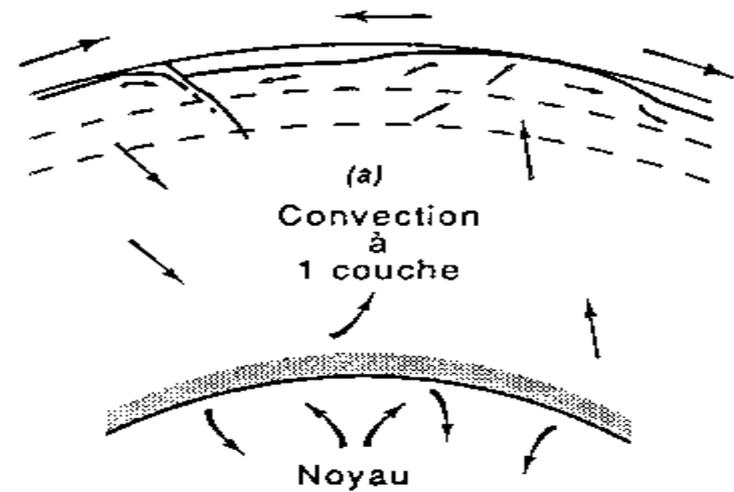
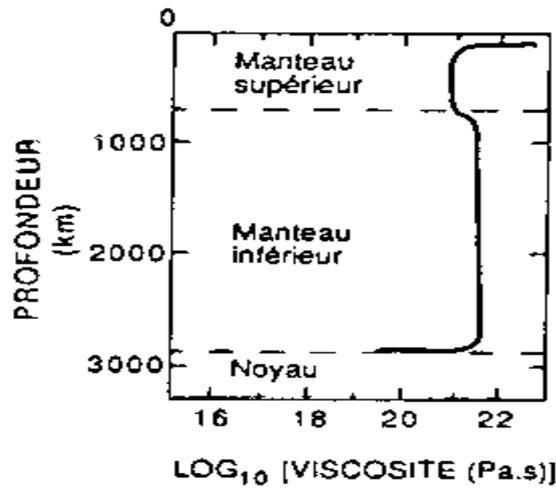


Figure 58

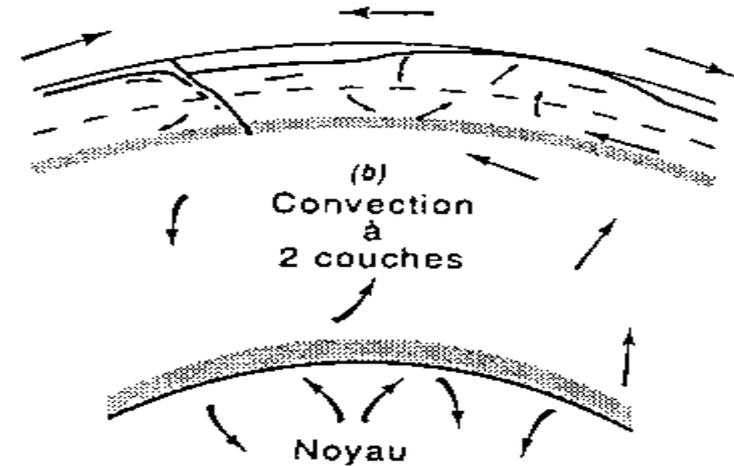
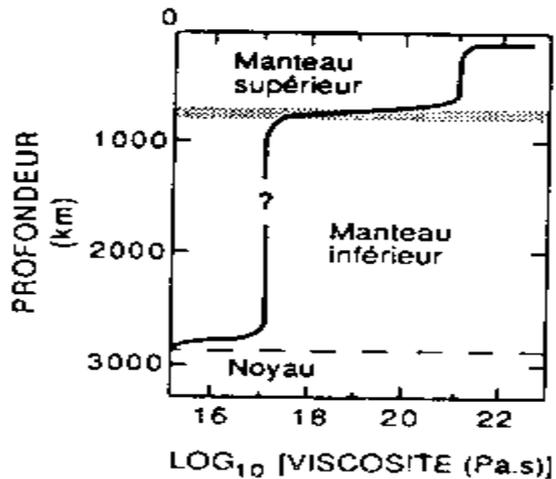
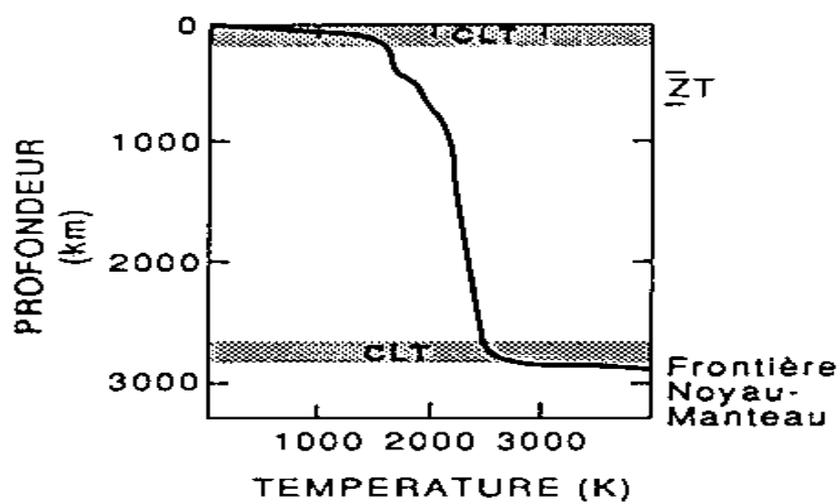
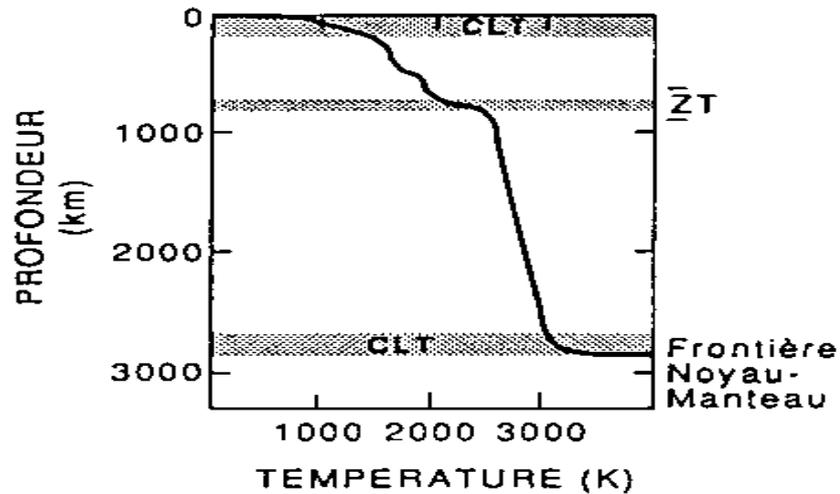


Fig. 5-10 : Convection du manteau.

Si le manteau convecte en une couche, sa viscosité peut être approximativement uniforme. S'il convecte en deux couches, l'élévation de température due à l'existence d'une couche limite thermique à 670 km (voir Fig. 4-4) pourrait conduire à une viscosité plus faible dans le manteau inférieur.



(a)



(b)

**Figure 59**

**Fig. 4-4 : Allure du géotherme.**

Le gradient de température est plus élevé dans les couches limites thermiques (CLT) que dans les régions animées de mouvements de convection. Si le manteau convecte en une seule couche (a), il n'y a de couches limite thermique qu'au sommet et à la base du manteau. Si le manteau convecte en deux couches, il doit y avoir une couche limite thermique à la profondeur de 670 km.

# Phénomènes physiques élémentaires en jeu

(processus évolutifs):

- diffusion de la chaleur (loi de Fourier)
- diffusion de la matière (loi de Fick)
- déformation élastique / plastique
- dynamique des fluides; (de la loi de Navier Stokes à celle de Darcy)
- cinétique chimique

**Figure 60**

Phénomène évolutif	loi	Ordres de grandeur des paramètres en géologie	Ordre de grandeur des paramètres dans d'autres domaines	Temps intégré avec gradients "géologiques"
Diffusion de la chaleur	Fourier $t = x^2/D_{th}$	Diffus. Therm. $10^{-4}$ à $10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s	Même ou plus rapide	Refroidissement d'un granite ( $10^2$ à $10^4$ m), d'une série métamorphique (km): $10^4$ à $10^6$ années Refroid. d'une coulée volcanique (m à 100 m): années à $10^2$ années
Diffusion de la matière	Fick $t = x^2/D$	Intracristallin $10^{-22}$ à $10^{-13}$ cm <sup>2</sup> /s dans l'eau $10^{-4}$ à $10^{-6}$ cm <sup>2</sup> /s dans silicate fondu $10^{-6}$ cm <sup>2</sup> /s	Même ordres de grandeur	Echanges de matière locaux dans le métamorphisme: quelques centimètres par millier d'années
Termes de pression / viscosité	Déformation mécanique	Viscosité silicate fondu $4 \cdot 10^2$ Pa.s manteau $10^{21}$ Pa.s glace $10^{11}$ Pa.s eau $4 \cdot 10^{-3}$ Pa.s	Viscosité métal fondu $4 \cdot 10^{-3}$ Pa.s	"écoulement" d'une montagne: mm à cm/an
	Navier Stokes / Darcy	Viscosité eau $4 \cdot 10^{-3}$ Pa.s Perméab. $10^{-3}$ à $10^3$ d Grad. Pression $10^1$ à $10^2$ bars/km	<b>Figure 61</b>	Vitesse de migration de l'eau dans la croûte mm à cm/an 10 km en $10^7$ ans
Cinétique chimique	Vitesse prop. à affinité chimique $10^{-1}$ à $10^{-14}$ moy. $10^{-4}$ à $10^{-5}$ Mol/m <sup>2</sup> /s			Temps de disparition d'un cristal millimétrique à 25°C: de $10^2$ à $10^6$ ans (quartz)

## Ordre de grandeur du temps nécessaire pour faire disparaître les Monts d'Or

- Volume de calcaire  $3 \text{ km} \times 6 \text{ km} \times 200 \text{ m} = 1.8 \cdot 10^9 \text{ m}^3$   
Volume molaire de  $\text{CaCO}_3$   $36.93 \text{ cm}^3$   
Nombre de moles de Calcium:  $5 \cdot 10^{15}$

- 1m d'eau par an sur une surface de  $3 \times 6 \text{ km}^2$   
 $1.8 \cdot 10^7 \text{ m}^3$  d'eau disponibles par an

- Teneur en Ca d'une eau en équilibre avec la calcite à  $\text{PCO}_2 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ atm}$  et à  $20^\circ\text{C}$ :  $10^{-3} \text{ mol/l}$   
Teneur en Ca d'une rivière:  $15 \text{ g} / \text{m}^3$  ( $0.3 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}$ )  
Prenons  $1 \text{ mol/m}^3$

- On peut donc enlever  $1.8 \cdot 10^7$  moles de Ca par an  
Pour enlever  $5 \cdot 10^{15}$  moles, il faut des temps à compter en centaines de millions d'années

- Suivant les climats et températures, la situation par rapport au réseau hydrographique, et aussi en rajoutant l'érosion mécanique... temps de dizaines à centaines de millions d'années

- A comparer à remplissage karstique post-crétacé (-60 millions d'années) depuis l'émersion

- Dans le Massif Central érosion de coulées volcaniques au droit d'une rivière: 50 à 100 mètres en 1 à 2 millions d'années

**Figure 62**

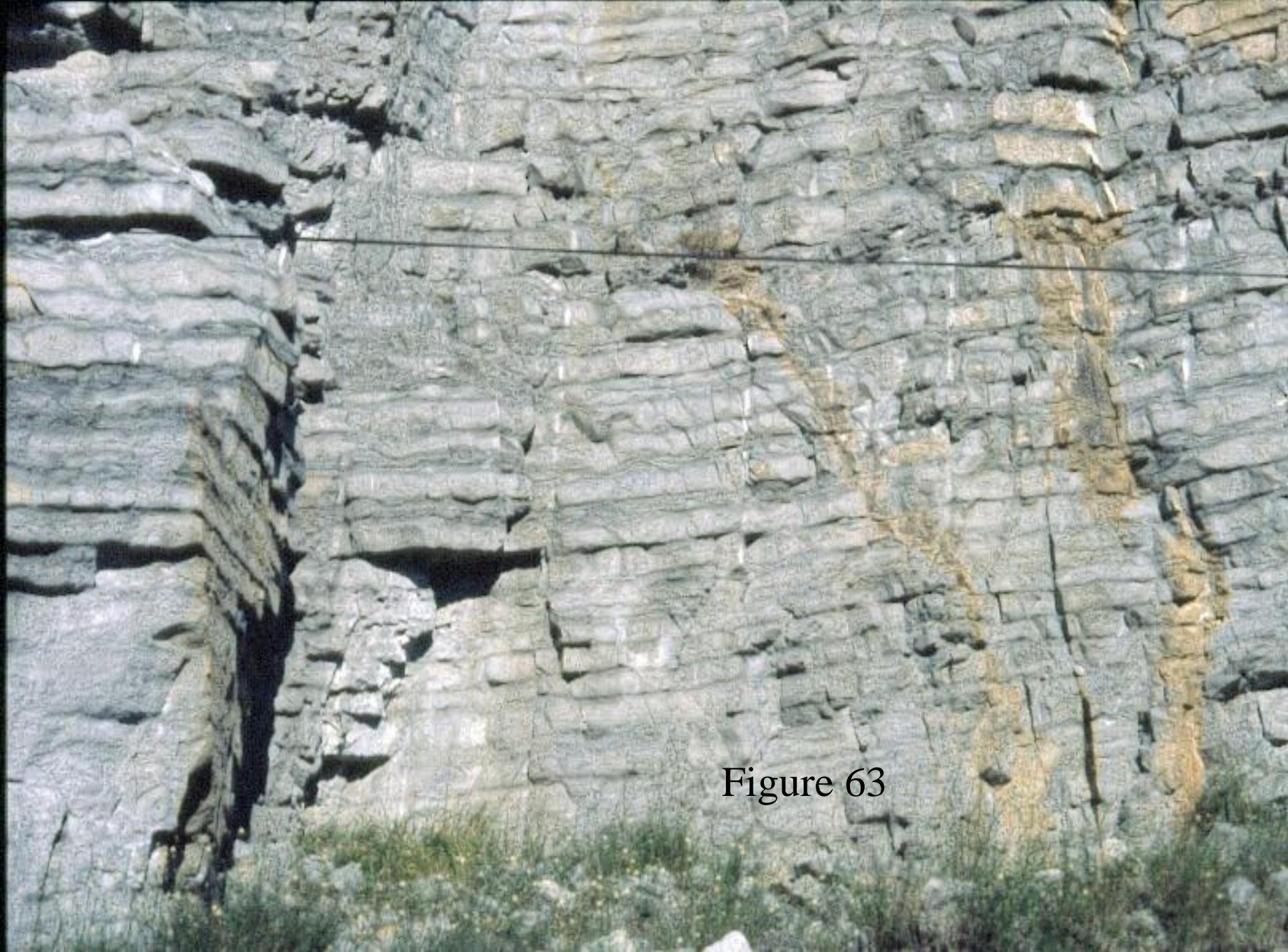


Figure 63

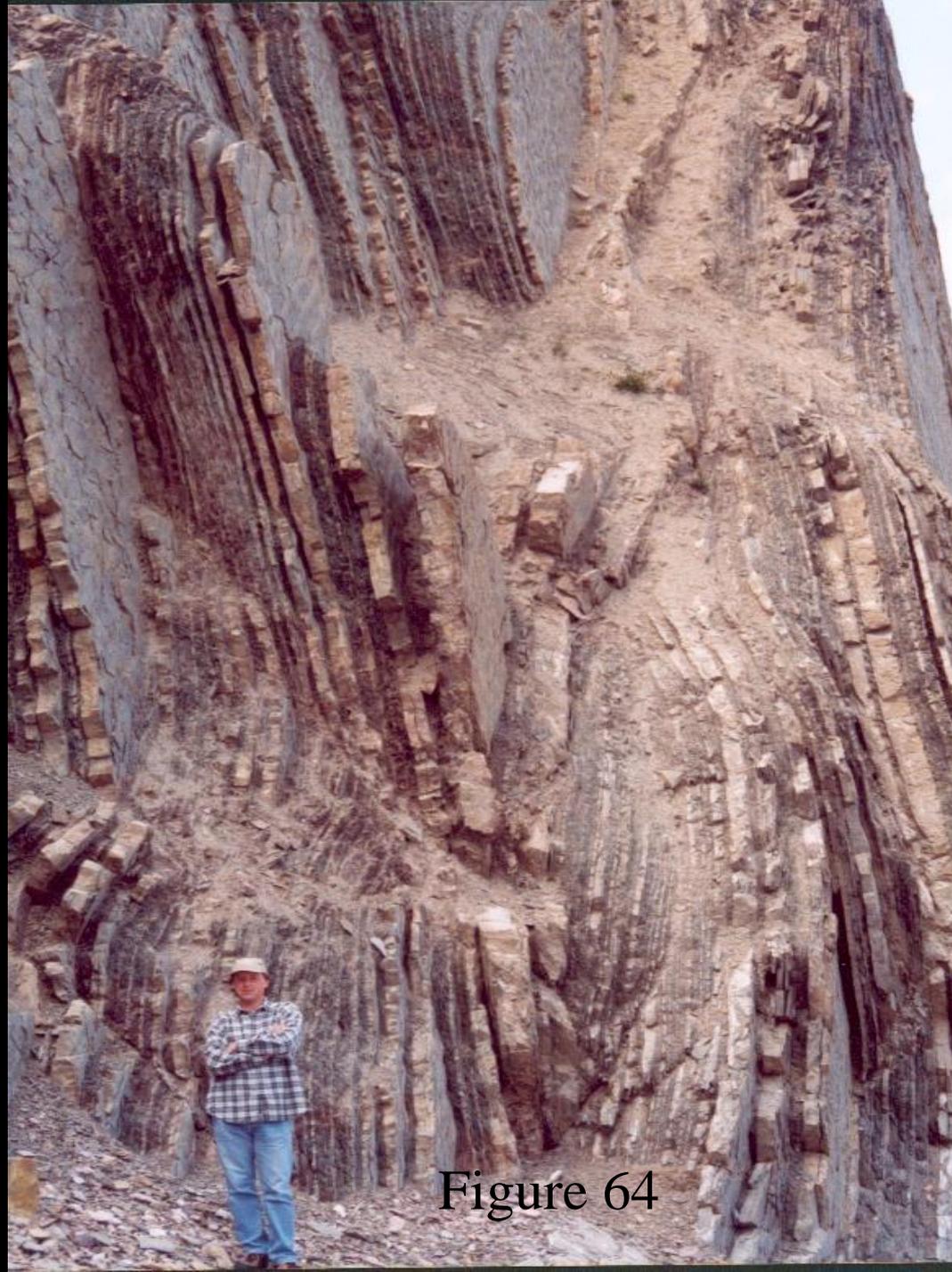


Figure 64

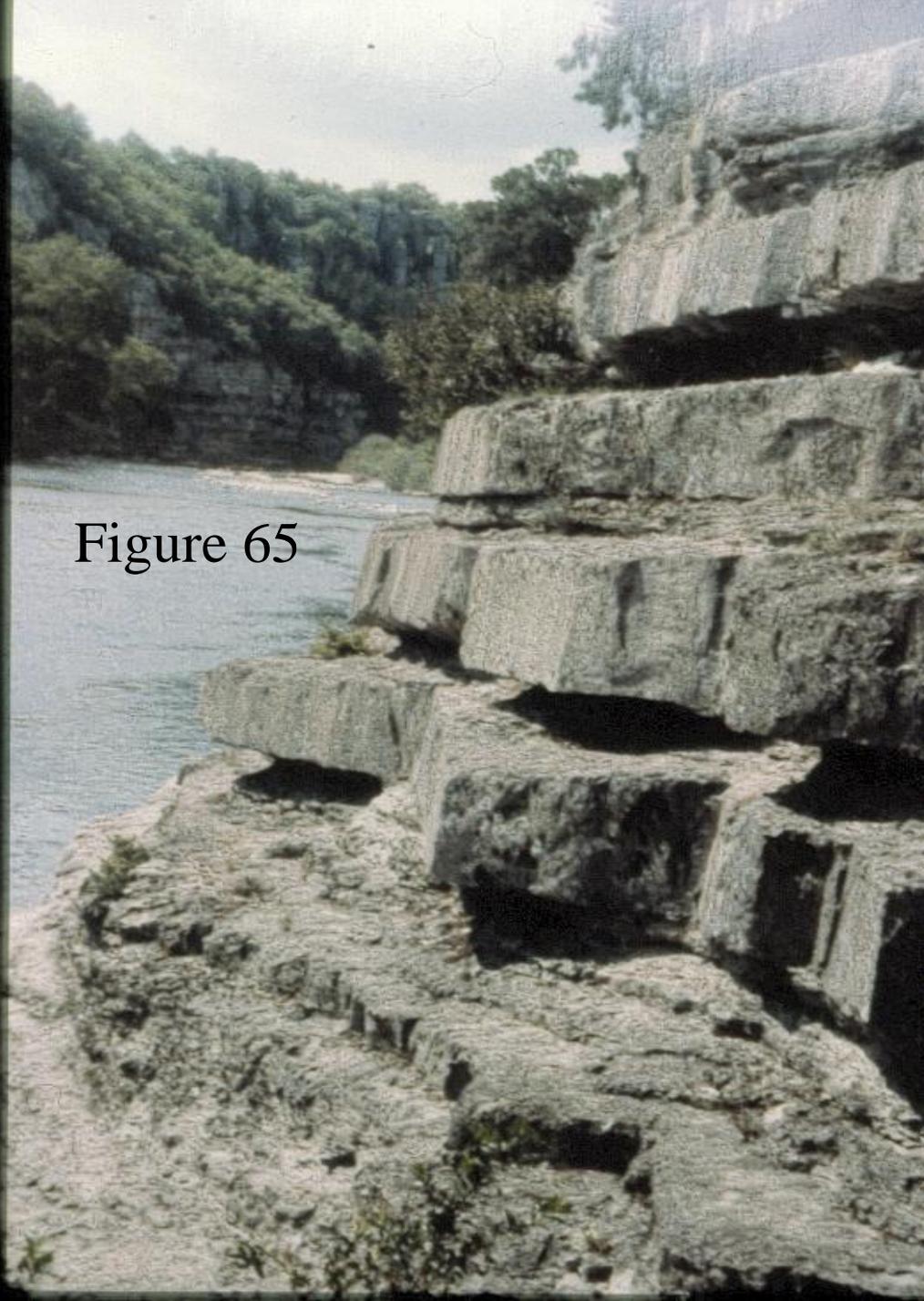


Figure 65



Figure 66

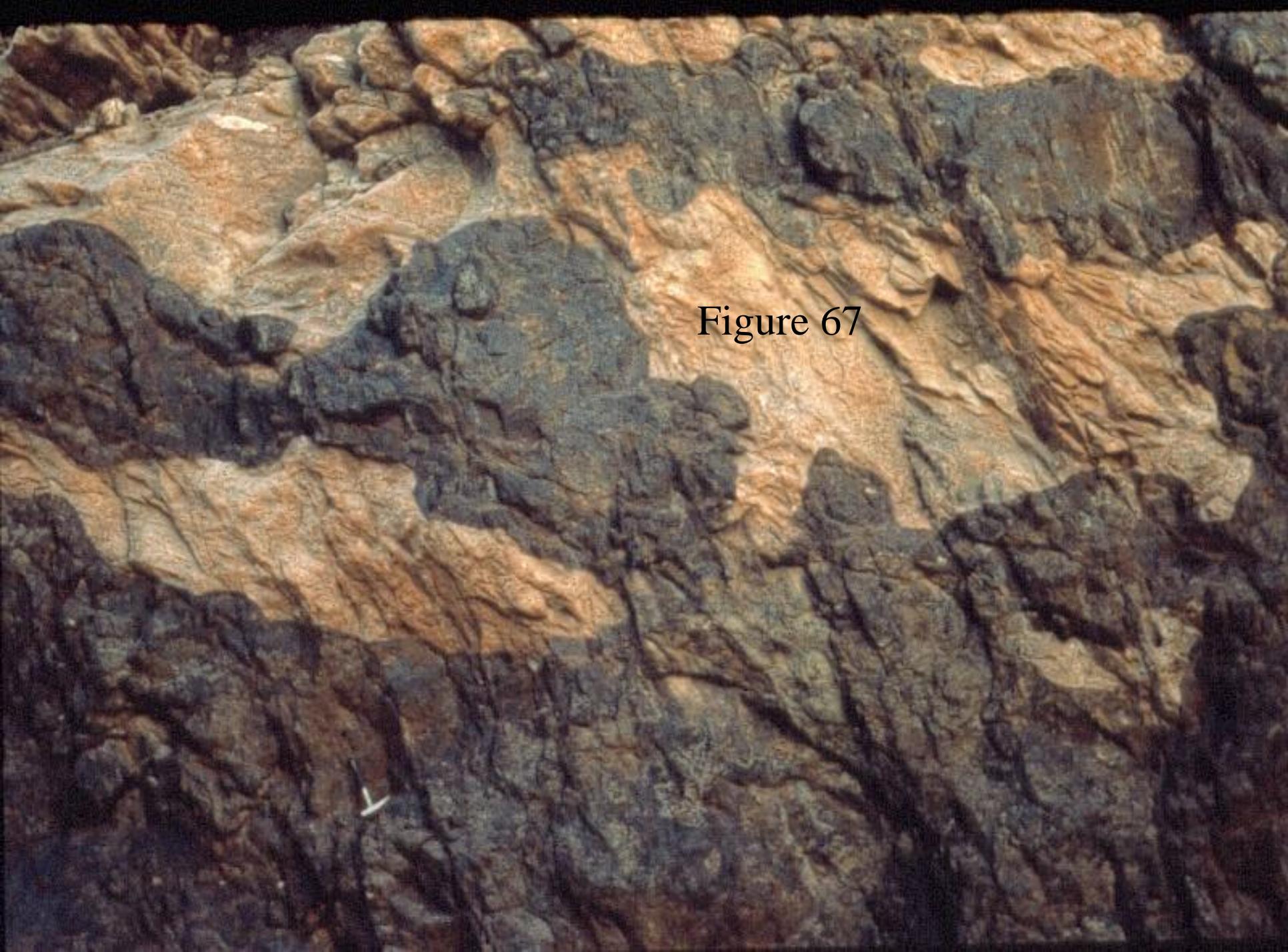
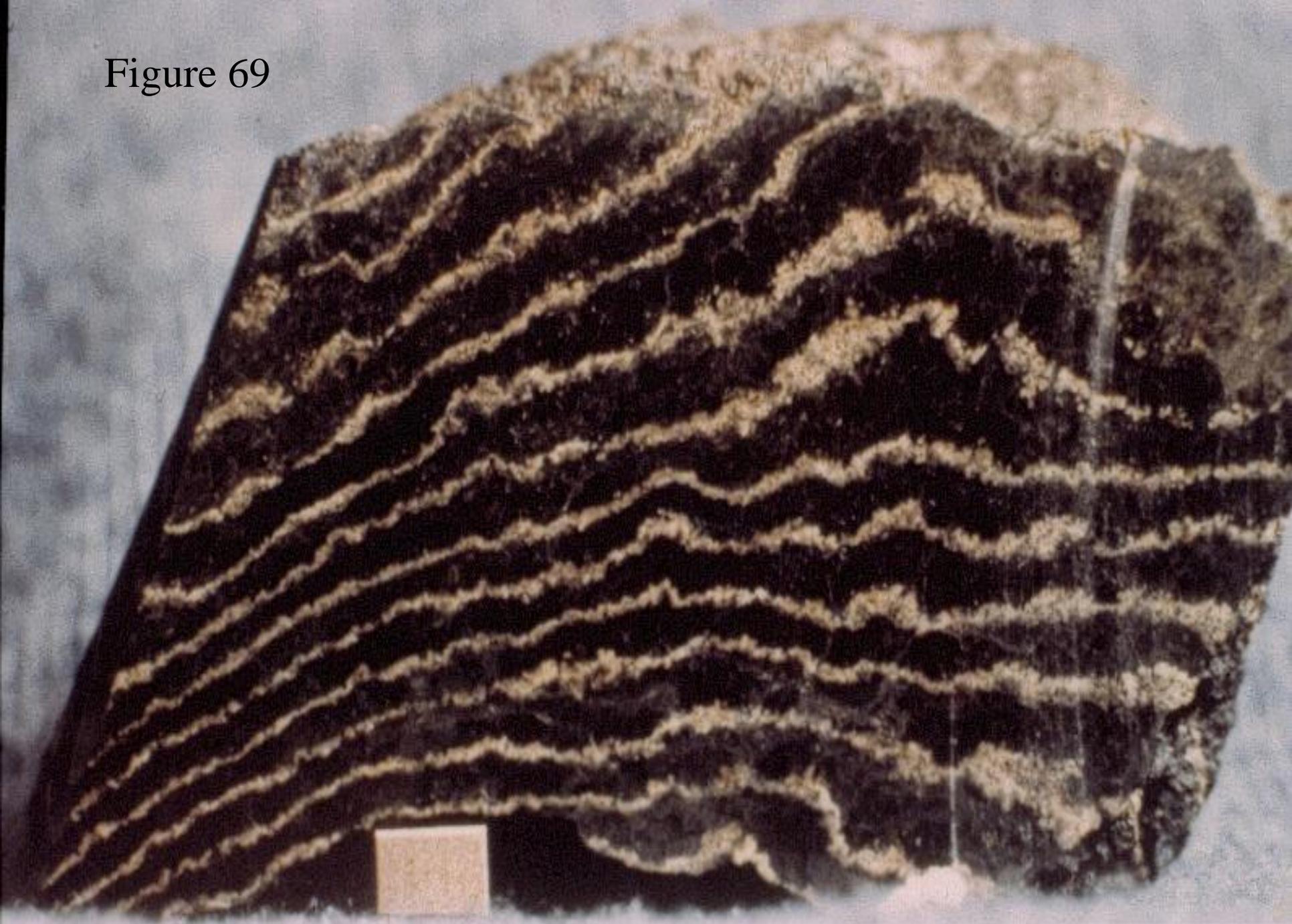


Figure 67



Figure 68

Figure 69



# Pourquoi le temps géologique est-il si long?

- grandes distances, gradients (« forces ») plus faibles
- paramètres cinétiques souvent plus petits: viscosité, coefficients cinétiques, de diffusion, de conduction thermique; systèmes chimiques complexes, liaison covalente

## Facteurs d 'évolution de la terre

Figure 70

- couplage non linéaire entre phénomènes oscillants et dérives séculaires, coopèrent ou non (ex. des glaciations), comportements cahotiques, jamais d 'état stationnaire
- temps sagittal et temps cyclique; temps courts, temps longs, périodes de calme, périodes de changement

<i>Temps sagittal (irréversible; nouveau)</i>	<i>demi-vie</i>	<i>Temps cyclique (retour prévisible)</i>	<i>Période</i>
activité solaire (fin du soleil)	$4 \cdot 10^9$	cycles solaires	$10^1$ à $10^5$
éloign. <sup>†</sup> terre-lune augment. durée jour diminut. nb j / an	$1j/10^6$	rotation de la terre autour du soleil et sur elle-même cycles climatiques	$10^{-3}$ à $10^4$
refroidissement (solidification) de la terre: décroissance radioactive des éléments	$10^4$ à $10^{10}$	glaciations  cycle des roches (tectonique des plaques)	$10^5$  $10^6$ à $10^8$
dissipation de la chaleur d'accrétion	$10^7$	cycles des éléments cycle de l'eau	$10^4$ à $10^6$ $10^4$
formation de la croûte continentale	$2 \cdot 10^9$		
chutes de météorites fortes chutes (début) influence d'une chute	$10^8$ $10^0$ à $10^4$	vie et mort des êtres vivants	$10^{-3}$ à $10^3$
vie et mort d'une espèce	$10^5$ à $10^8$		
durée d'un individu	$10^{-3}$ à $10^3$		

Figure 71

# Repères historiques

Jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle, coexistence et allers et retour entre des points de vue différents

- Antiquité: monde historique judéochrétien / monde éternel des grecs
  - Moyen-Age: chronologie du monde = chronologie de l'humanité
  - Renaissance: lecture critique des textes, observations de la terre: du temps a été enregistré dans les roches
- Sténon (1631- 1687): stratigraphie et chronologie relative

## •XVII°- XVIII°-XIX° siècles

Figure 73

Approches physiques (globales): Descartes (1596-1650), Newton (1642-1727), Leibnitz (1646-1716), Kant (1724-1804), Laplace (1749-1827), Kelvin (1824-1907)

•Buffon (1707-1788): 75 000 ans

Approches naturalistes:

- Cuvier (1769-1832): phénomènes brutaux dans le passé
- Hutton (1726-1797), Lyell (1797-1875): durées illimitées
- influence de Darwin (1809-1882): centaines de millions
- Philipps vers 1850: érosion (Gange): 96 millions
- Troly (sel de la mer): 90 - 99 millions

## **XIX°: la controverse avec Lord Kelvin:**

utiliser les lois physiques connues; non uniformité géologique car il ne peut y avoir de source de chaleur illimitée et éternelle

- chaleur du soleil, chaleur de la terre, bilans, dissipation de l'énergie dans les marées

Figure 74

- Kelvin: 98 puis 24 millions

- en face nouvelles estimations d'érosion (Reade, Haughton): 600 à 2300 millions

- le XX° siècle: découverte de la radioactivité; résolution de deux problèmes: la source de chaleur, l'âge de la terre

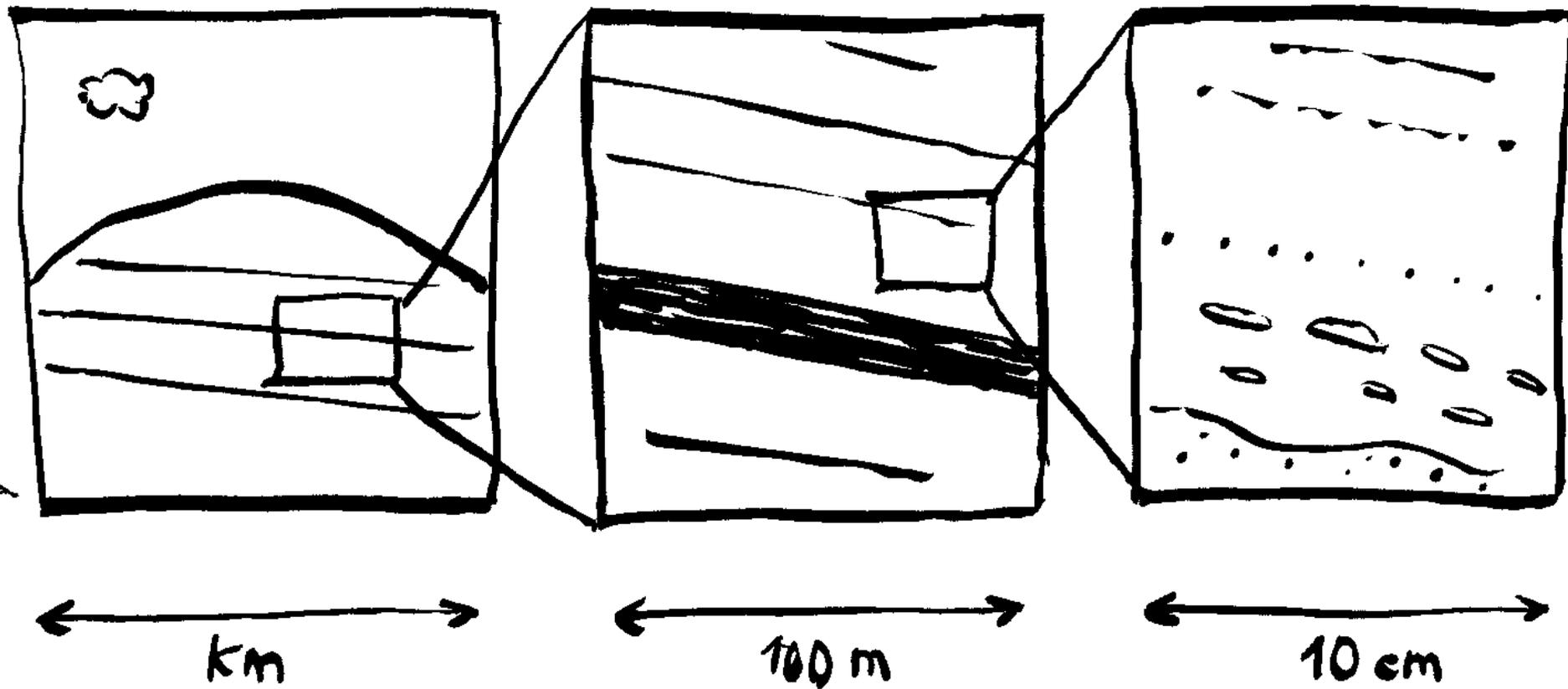


Figure 75

- en considérant des morceaux d'espace de tailles différentes: effet de poupées russes / zoom: découvertes de très grandes durées, puis les durées un peu moins longues apparaissent etc

temps



terre

Figure 76



(géologue)



Figure 77

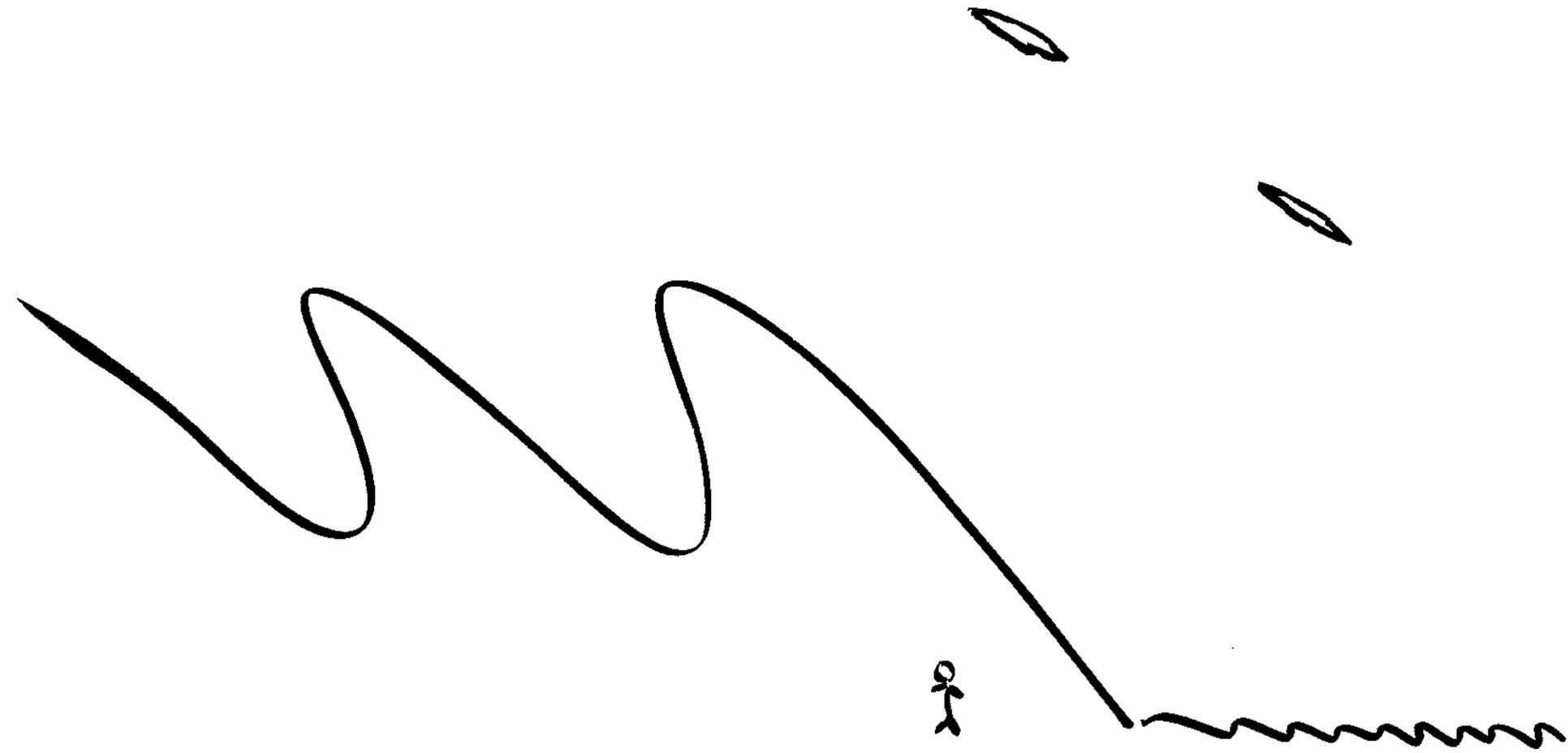


Figure 78