



HAL
open science

Le temps géologique. Les longues durées de l'histoire de la terre

Bernard Guy

► **To cite this version:**

| Bernard Guy. Le temps géologique. Les longues durées de l'histoire de la terre. 2002. hal-00530143v1

HAL Id: hal-00530143

<https://hal.science/hal-00530143v1>

Preprint submitted on 27 Oct 2010 (v1), last revised 10 Sep 2024 (v2)

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SW

Mts du
Lyonnais

NE

Mts d'Or

Charbonnières

Saône



Figure 1

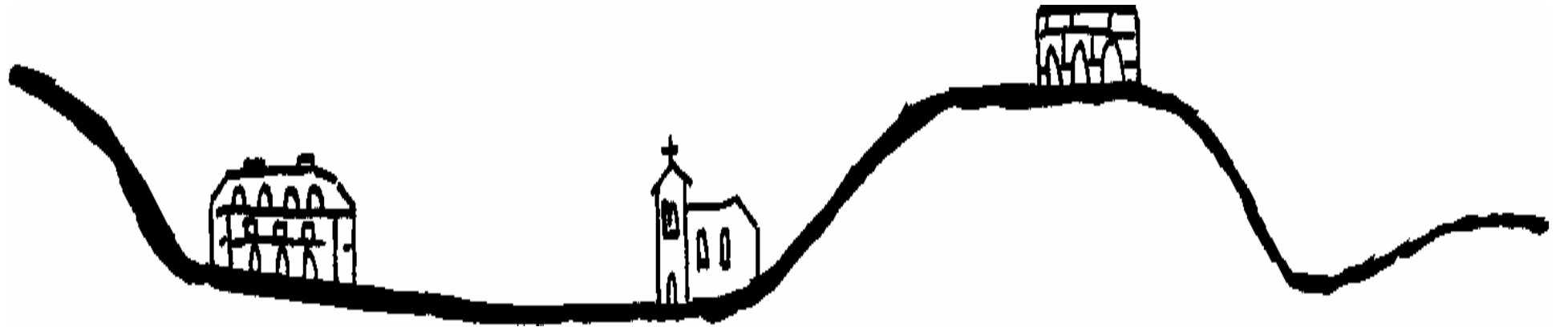


Figure 2

Figure 3

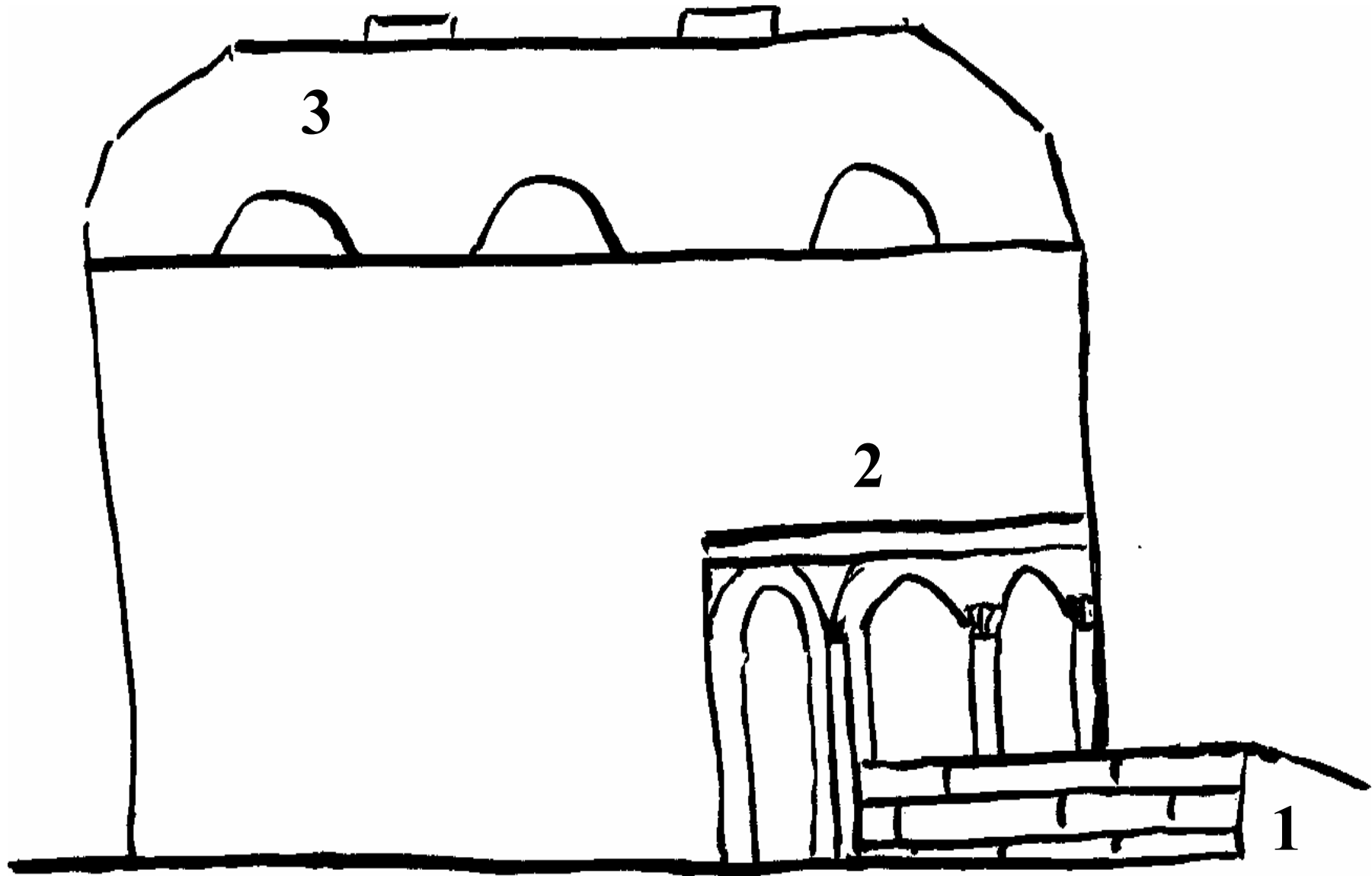
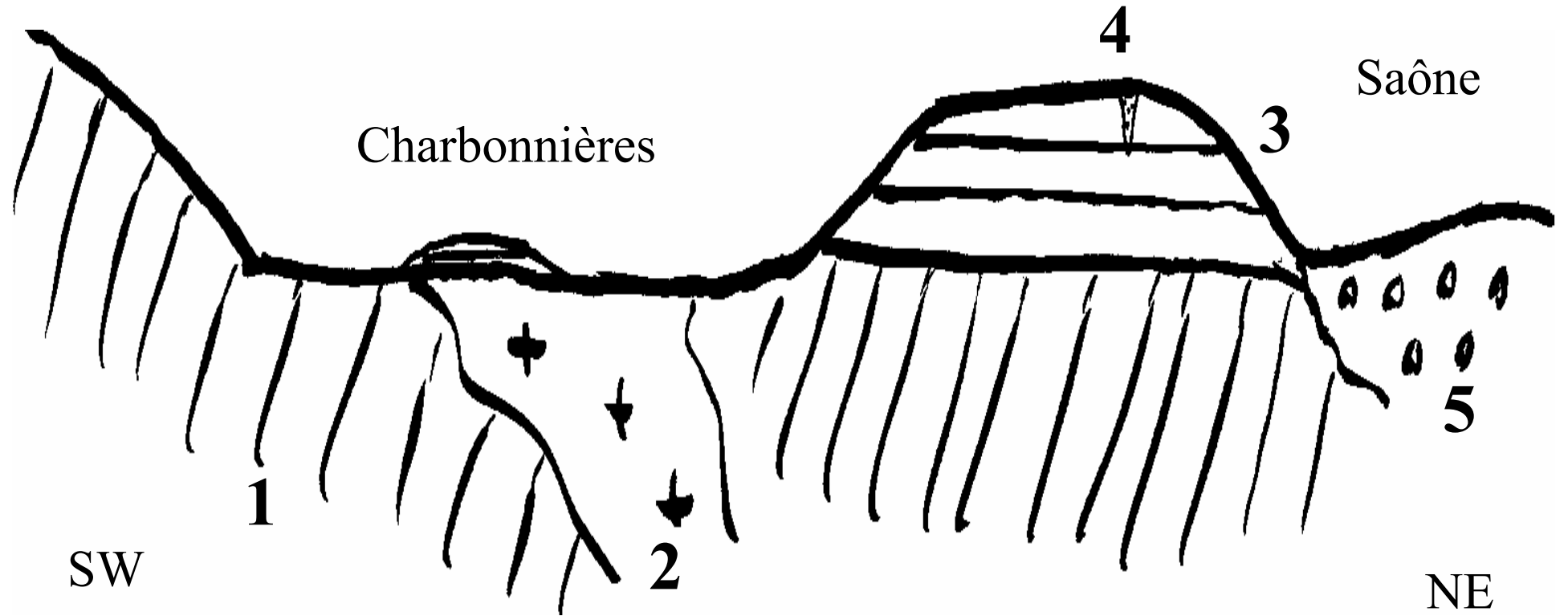


Figure 4

Monts du Lyonnais

Mont d'Or

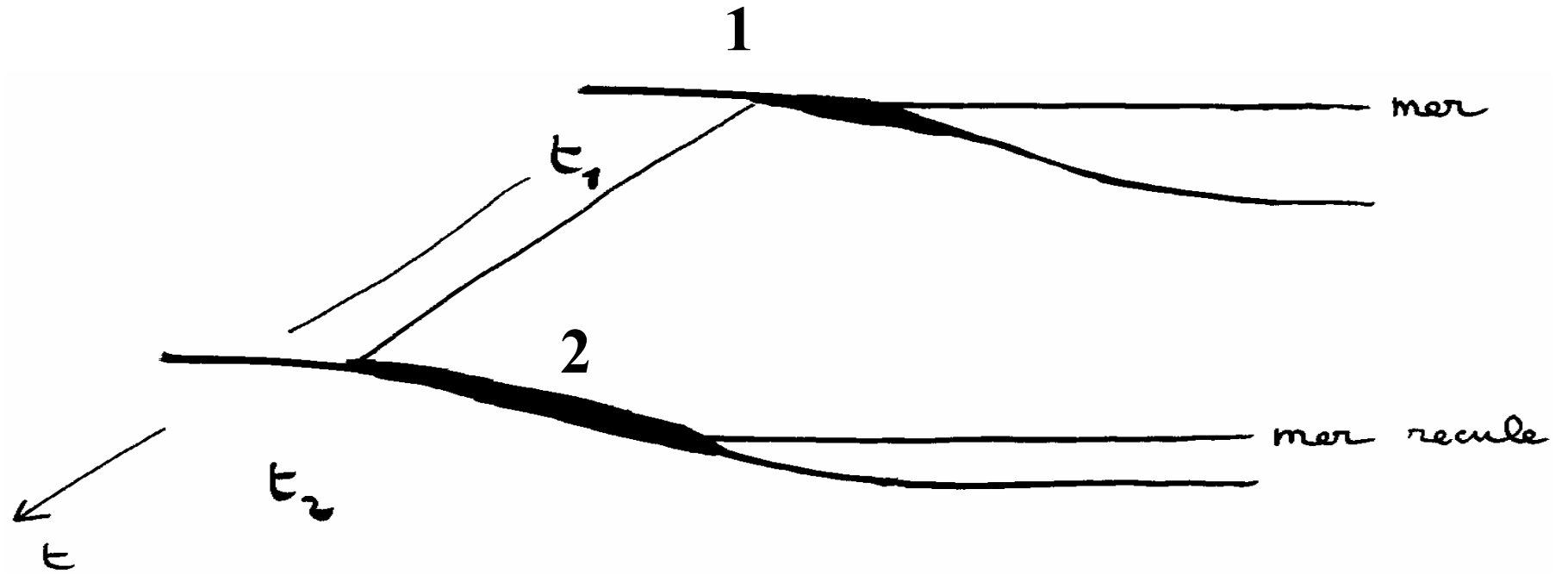


Chronologies relatives:

Figure 5

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

Figure 6



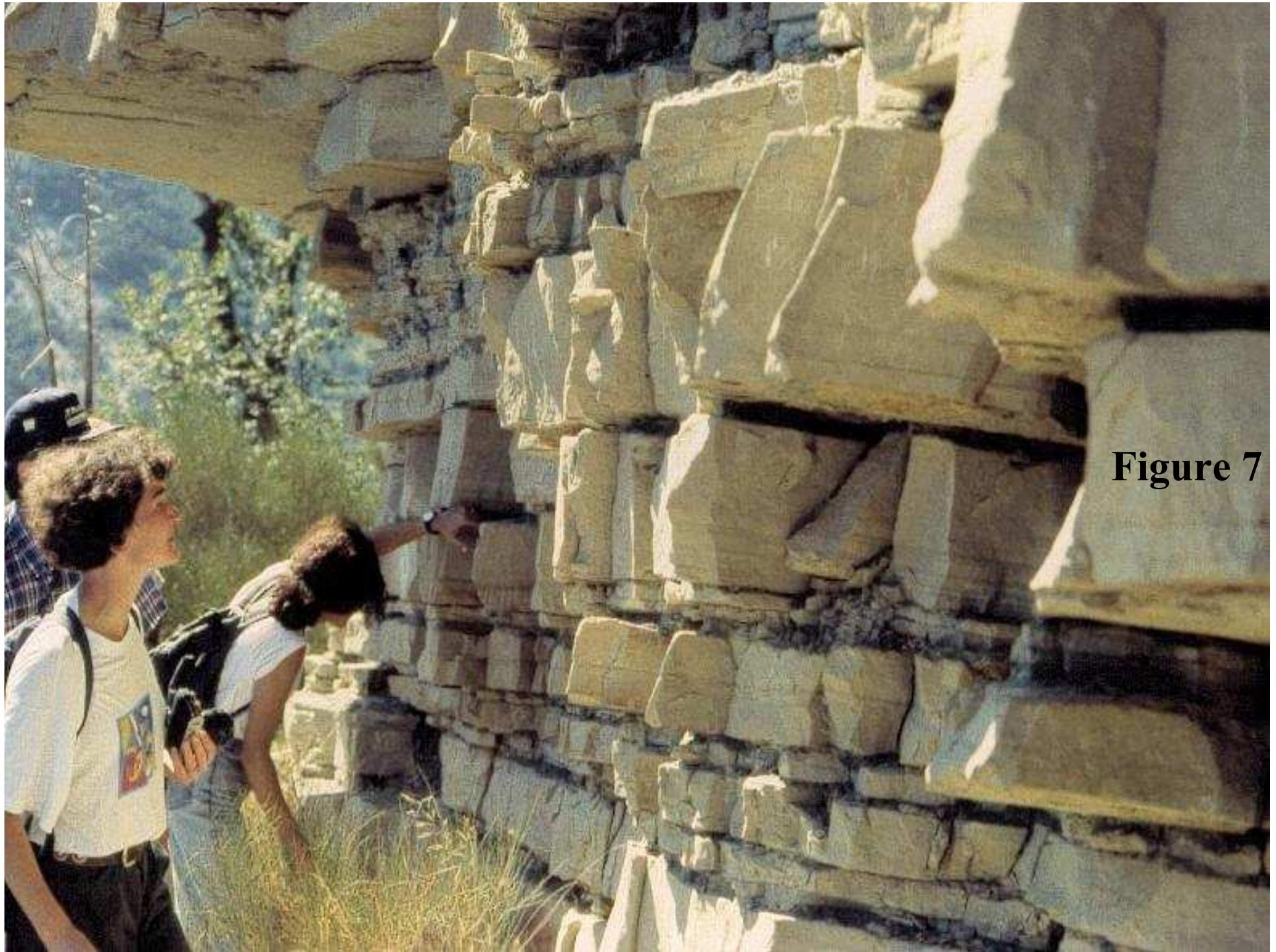


Figure 7

Figure 8

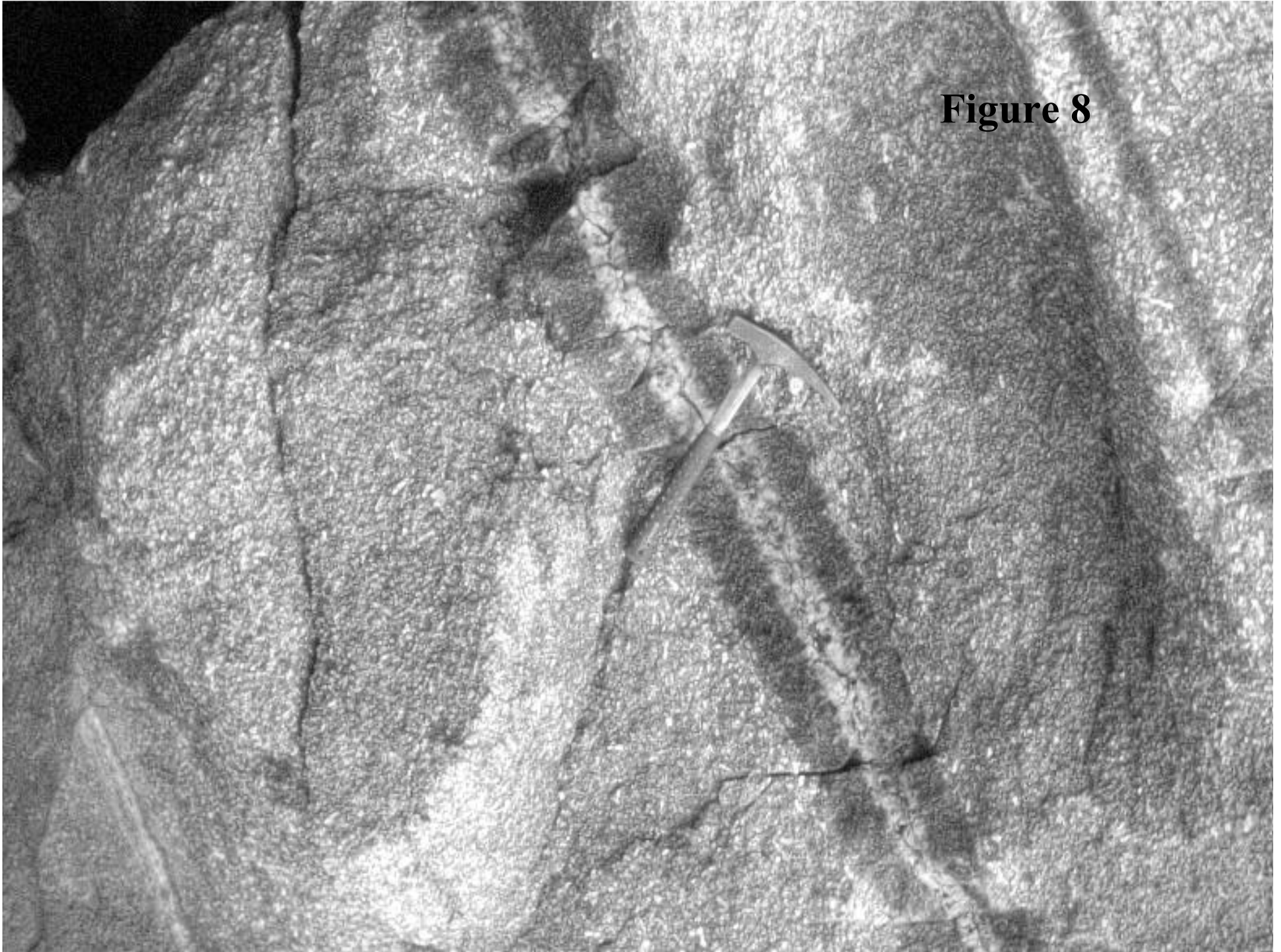


Figure 9



Figure 10

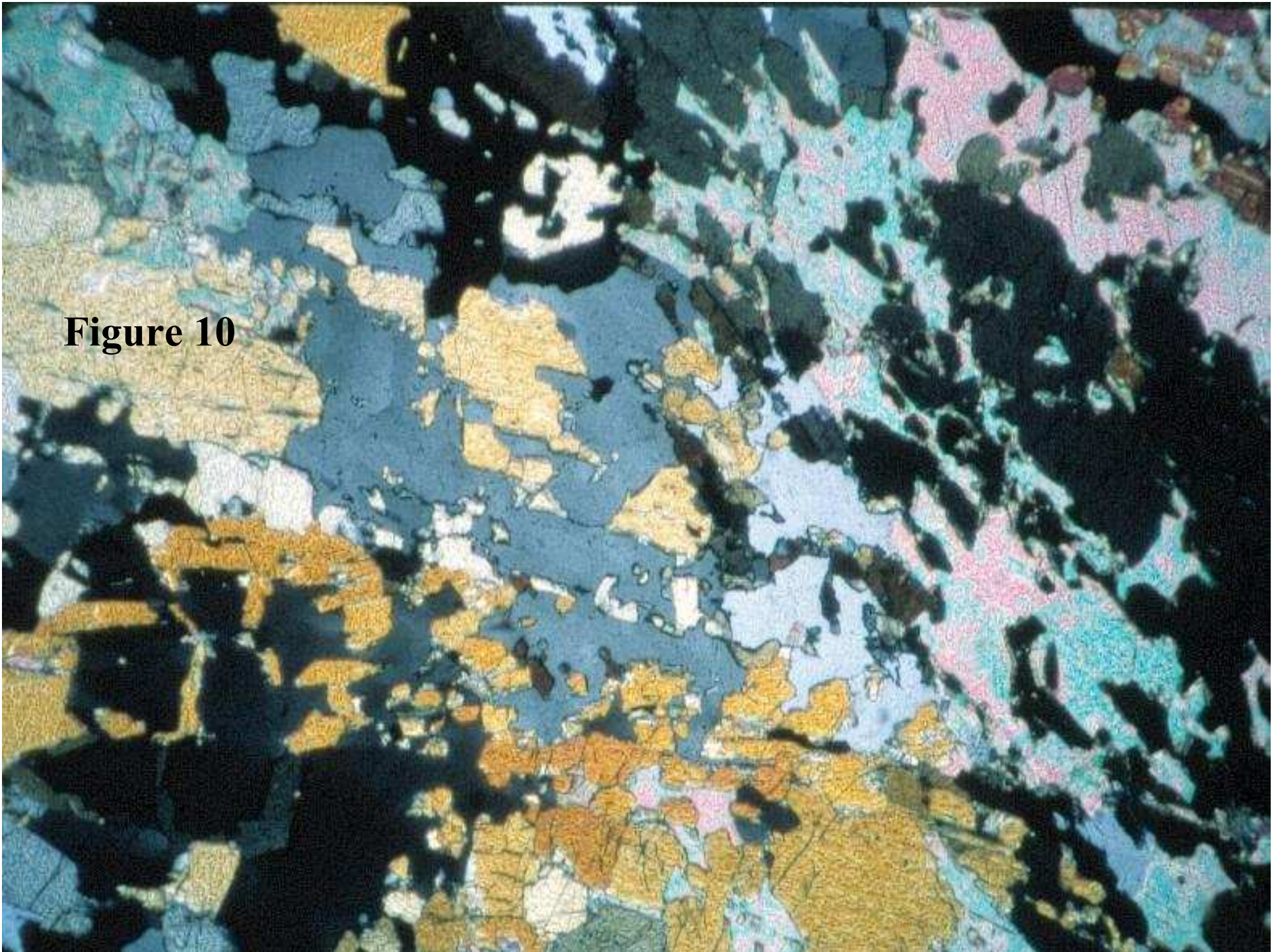




Figure 11

Figure 12

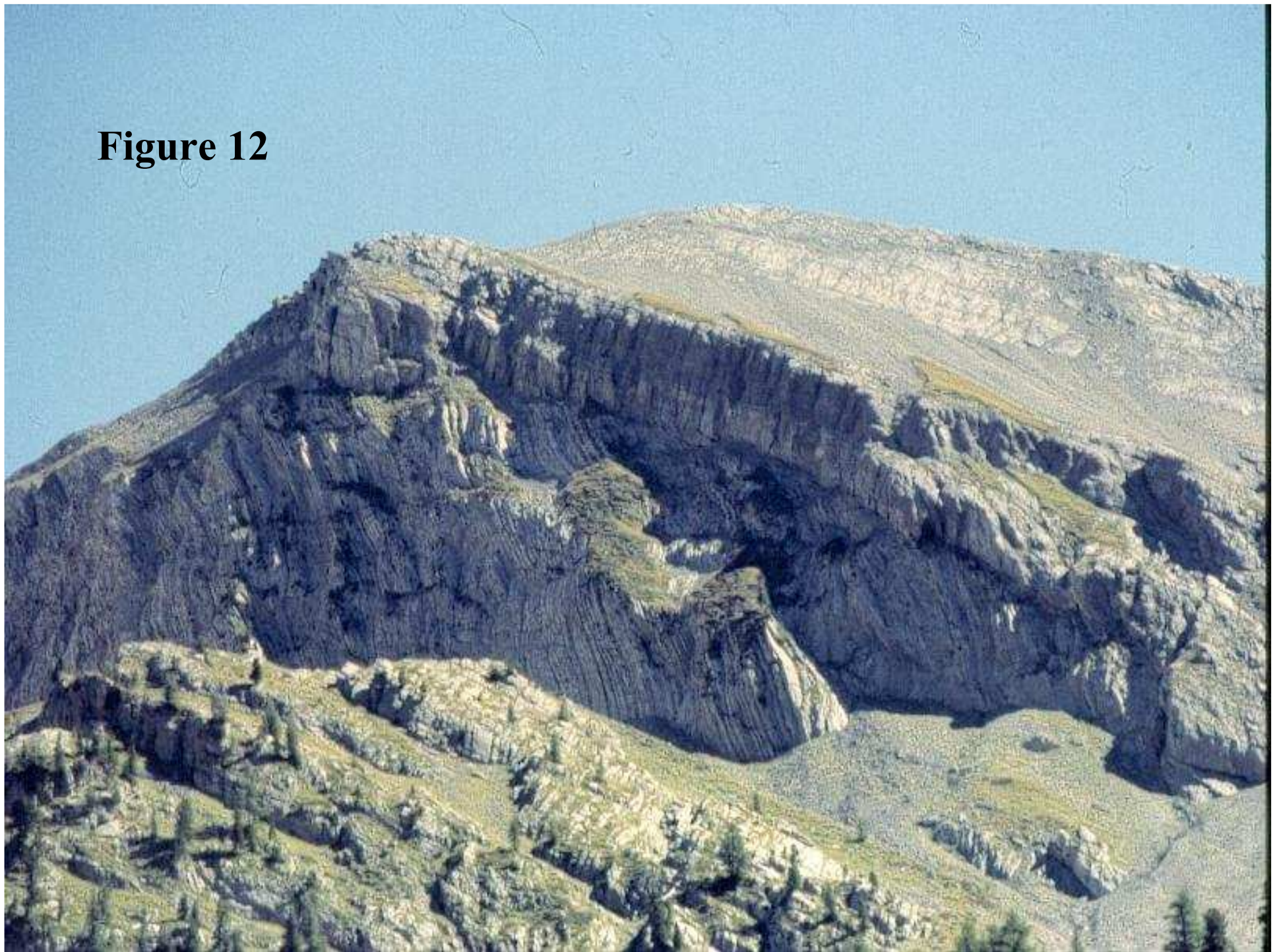
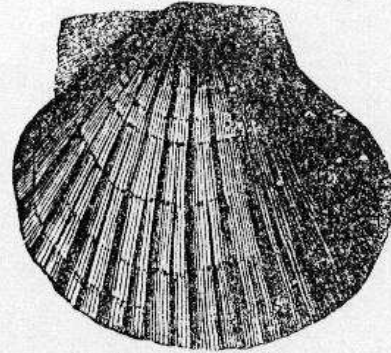




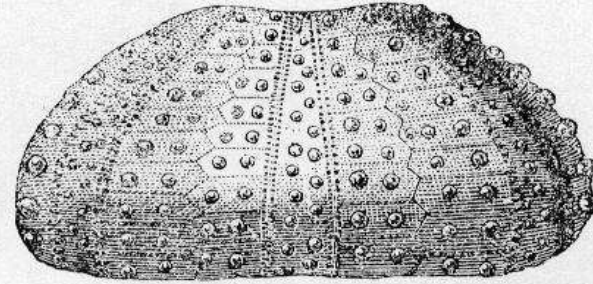
Figure 13

Fig. 241.



Pecten lugdunensis.

Fig. 242.



Diadema 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 ;

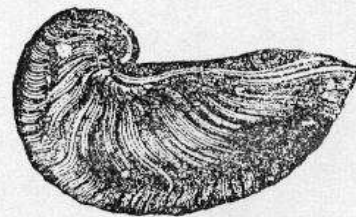


Fig. 243. *Grypha arcuata.*

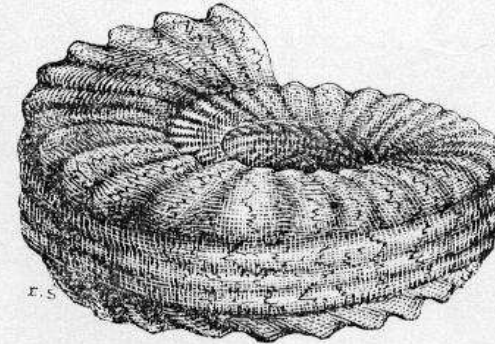


Fig. 244. *Ammonites Bucklandi.*

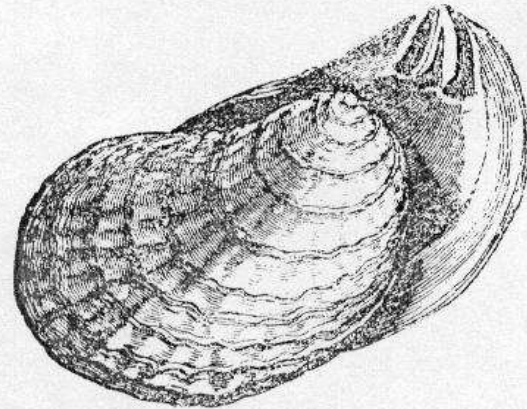


Fig. 245. *Plicatula spinosa.*

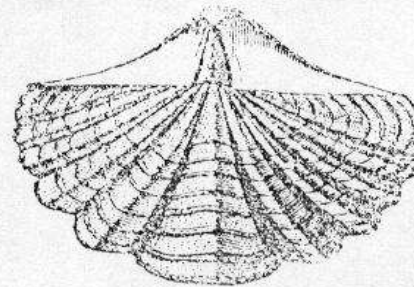


Fig. 246. *Spirifer Walcoti.*

Figure 14

Exemple du couple Rubidium / Strontium

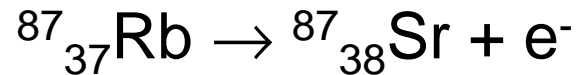


Figure 15

(neutron \rightarrow proton + électron)

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

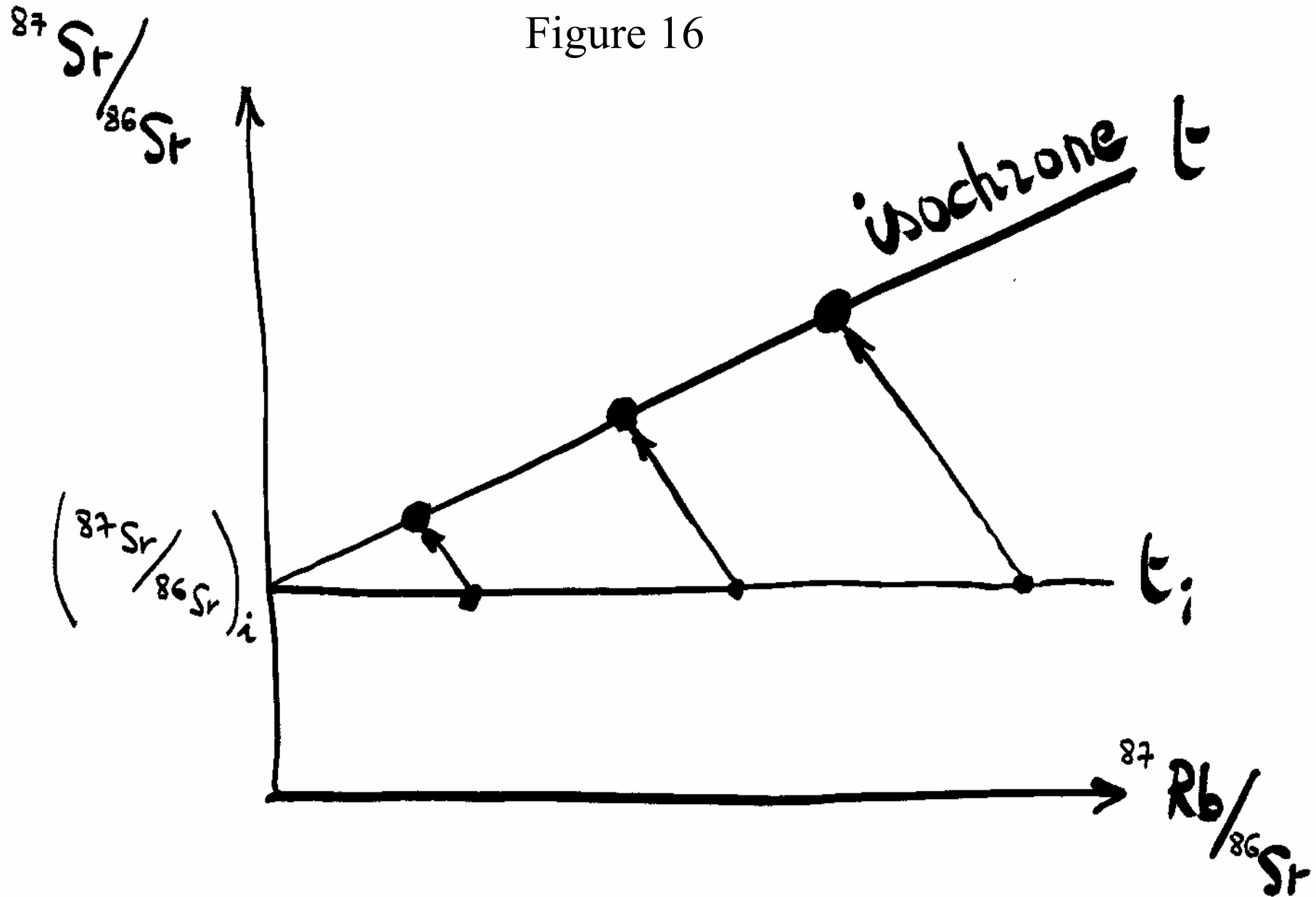
$$dF/dt = - dP/dt = \lambda P$$

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

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

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	$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{A}$	$1.31.10^9$	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}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

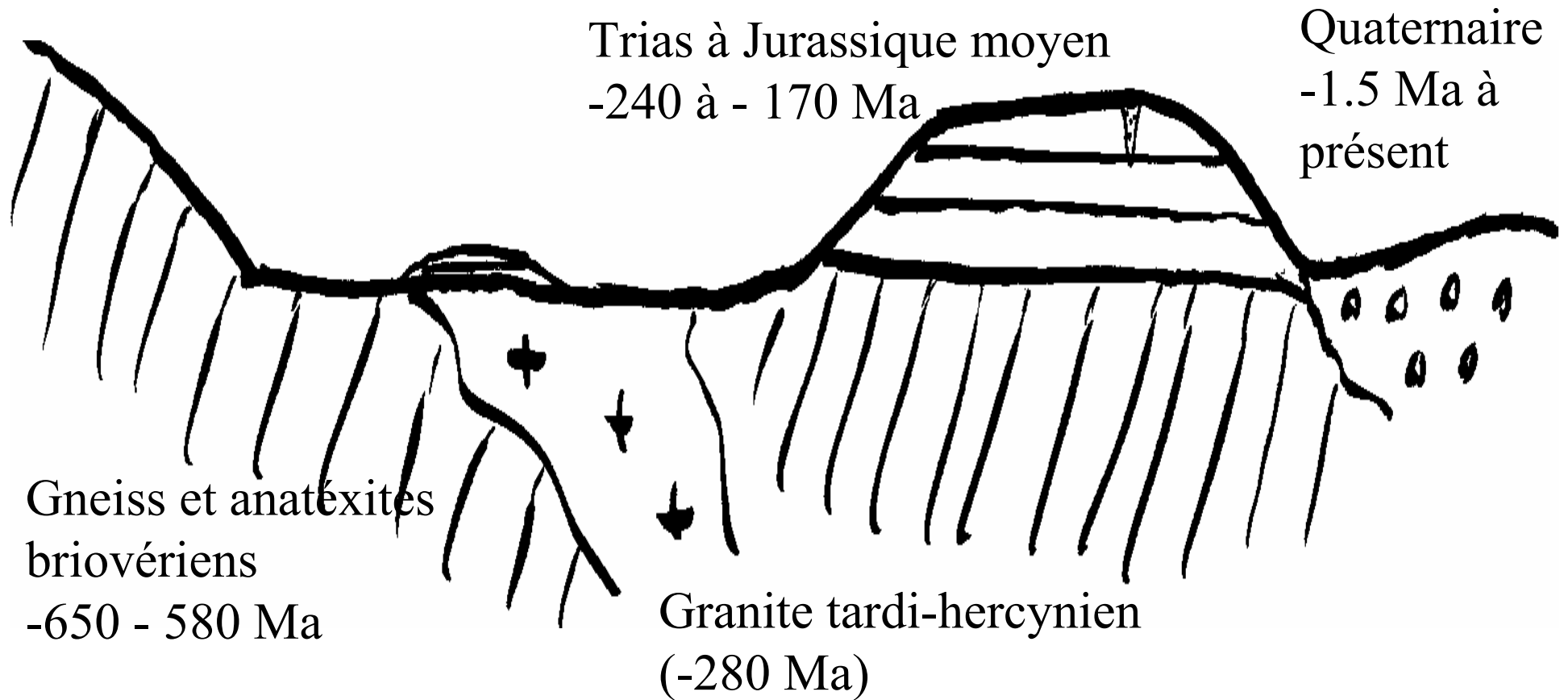


$$\left[\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} - \left(\frac{^{207}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)^0 \right] / \left[\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} - \left(\frac{^{206}\text{Pb}}{^{204}\text{Pb}} \right)^0 \right]$$

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

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

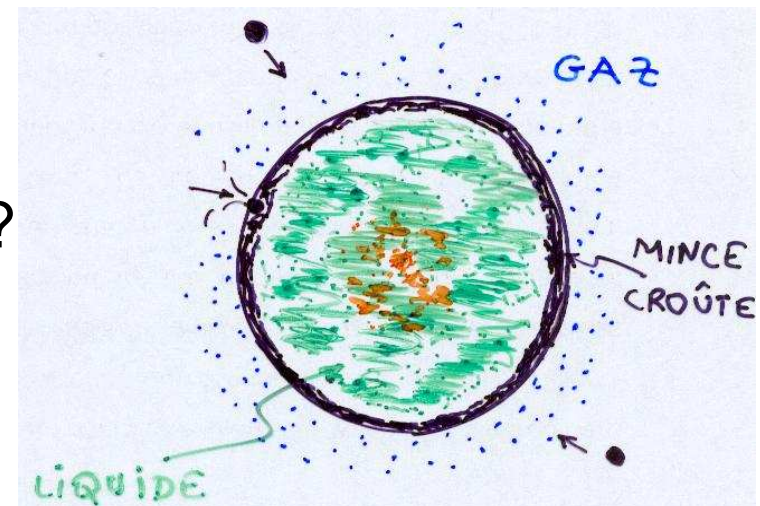
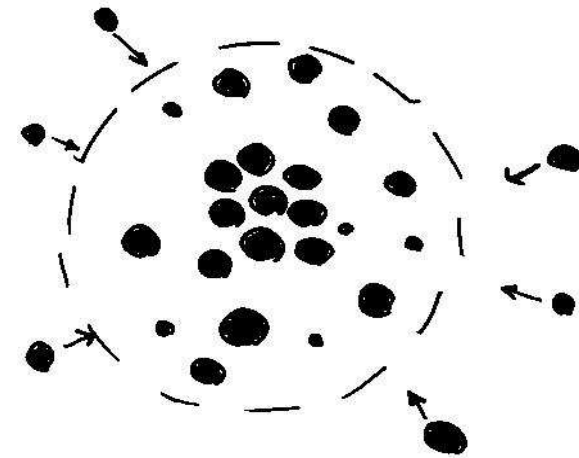
Etape 0:

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.)

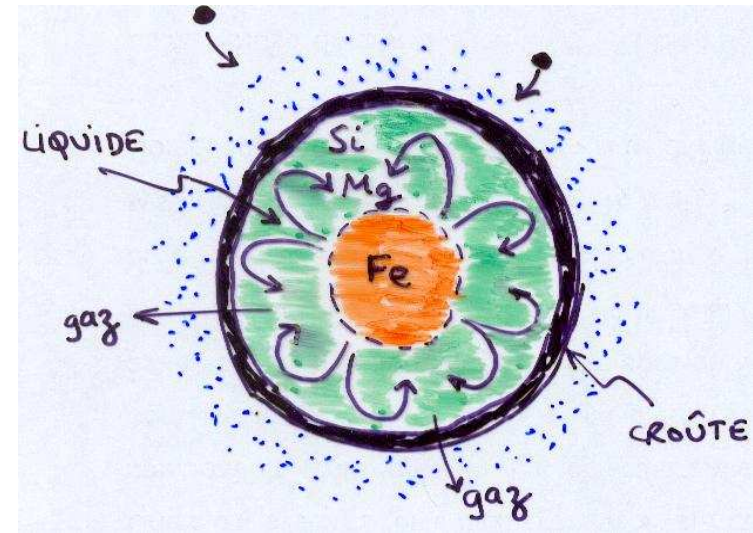
Figure 20



Etape 2:

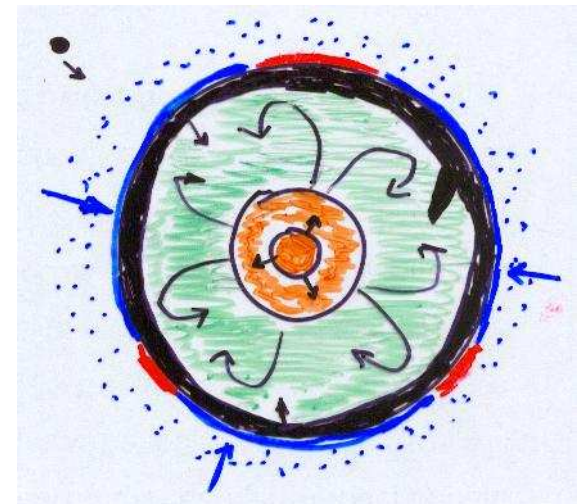
Figure 21

solidification de la graine
épaississement de la croûte
condensation de l'eau (pluie): océan
primordial
atmosphère primitive: H₂O, CO₂, N₂,
(CH₄, NH₃)
poursuite du bombardement météoritique
(durée: 50 millions d'années env.)



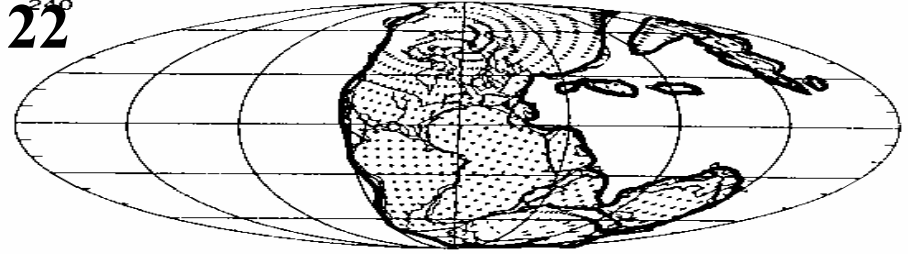
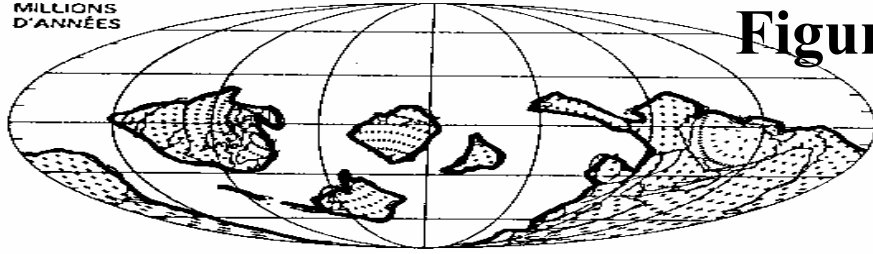
Etape 3:

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

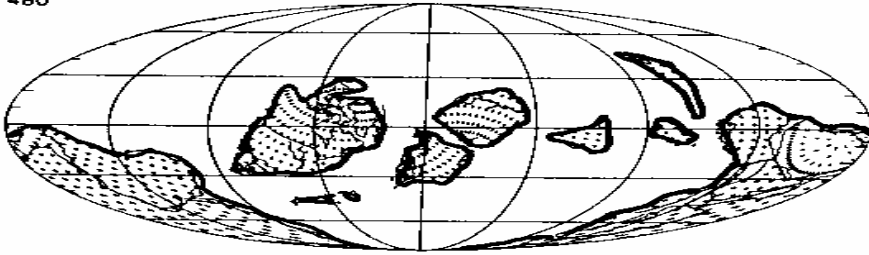


IL Y A 540
MILLIONS
D'ANNÉES

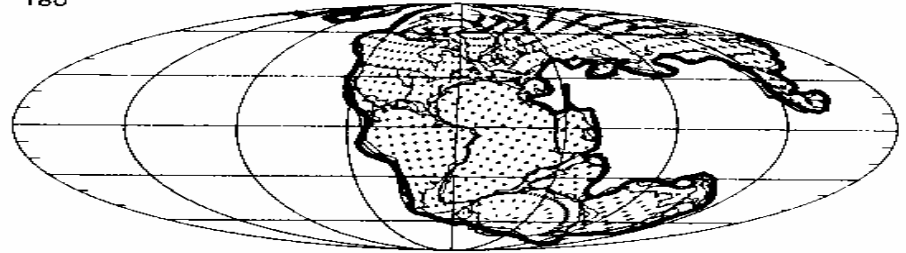
Figure 22



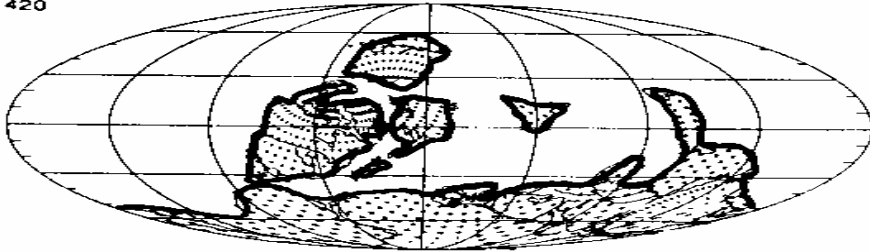
480



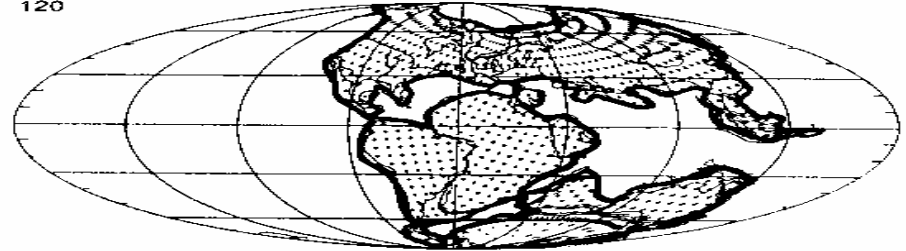
180



420



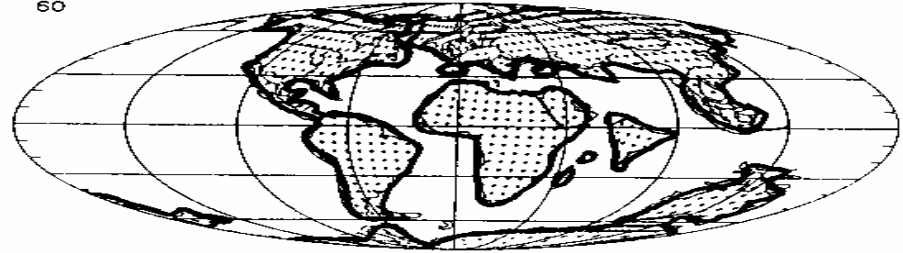
120



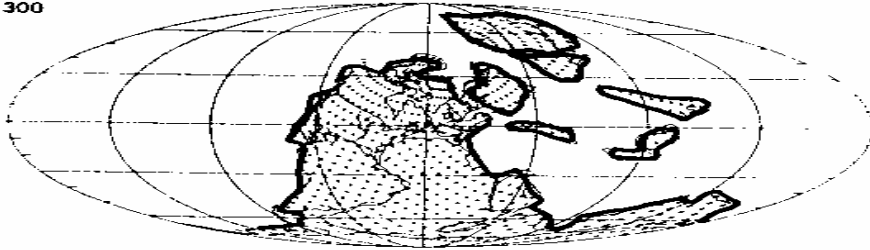
360



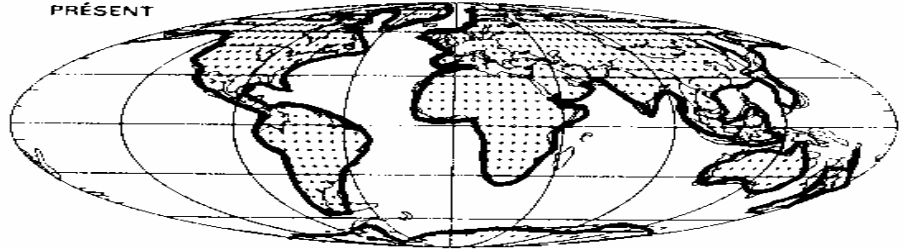
60



300



PRÉSENT



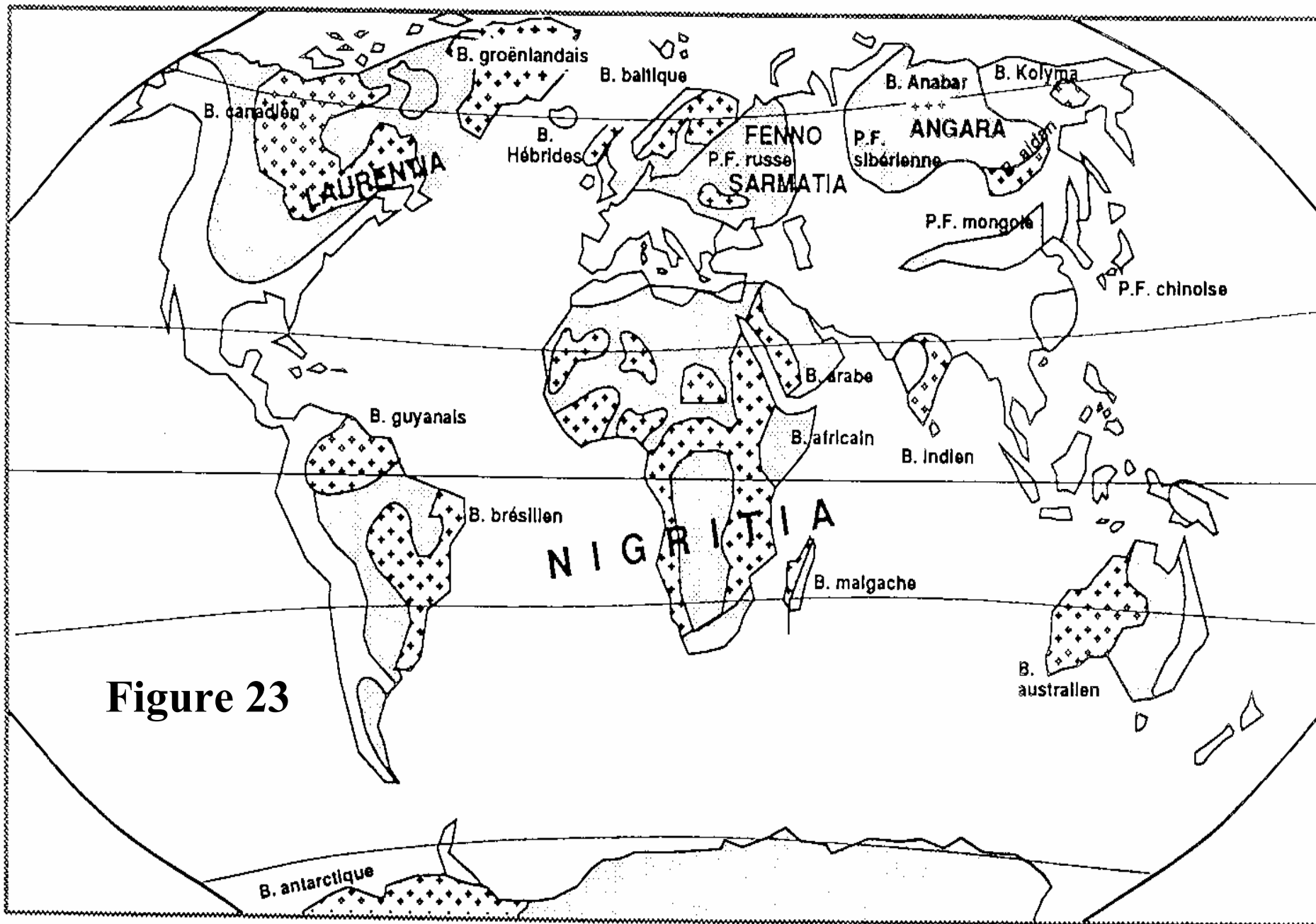
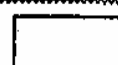


Figure 23

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

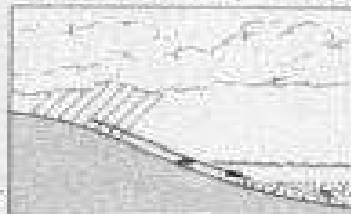


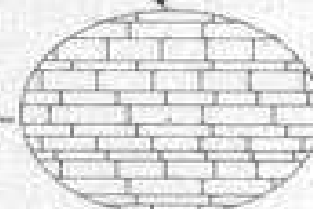
Figure 25



ROCHES
IGNÉES



SÉDIMENTS



ROCHES
SÉDIMENTAIRES

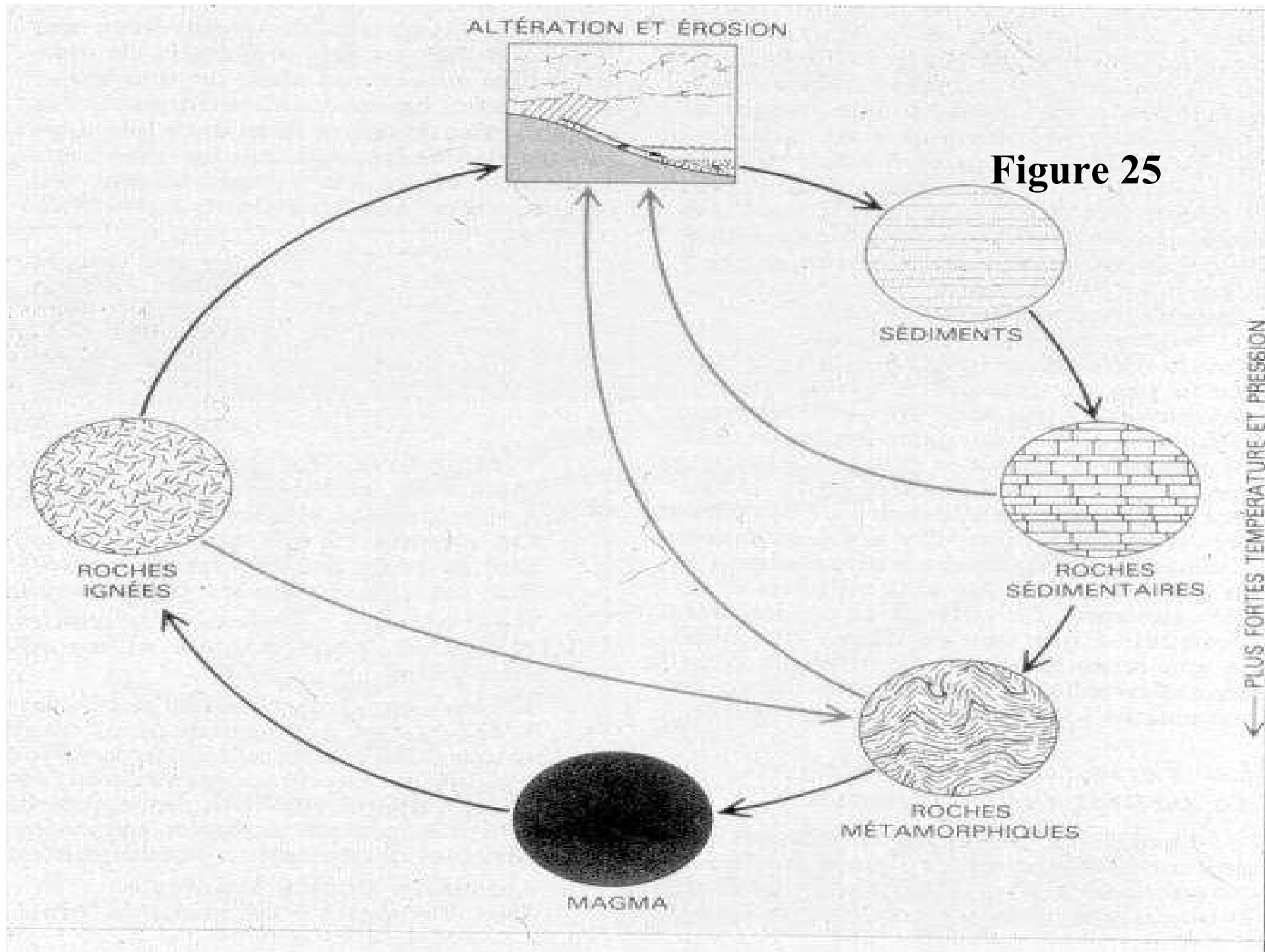


ROCHES
MÉTAMORPHIQUES



MAGMA

← PLUS FORTES TEMPÉRATURE ET PRESSION



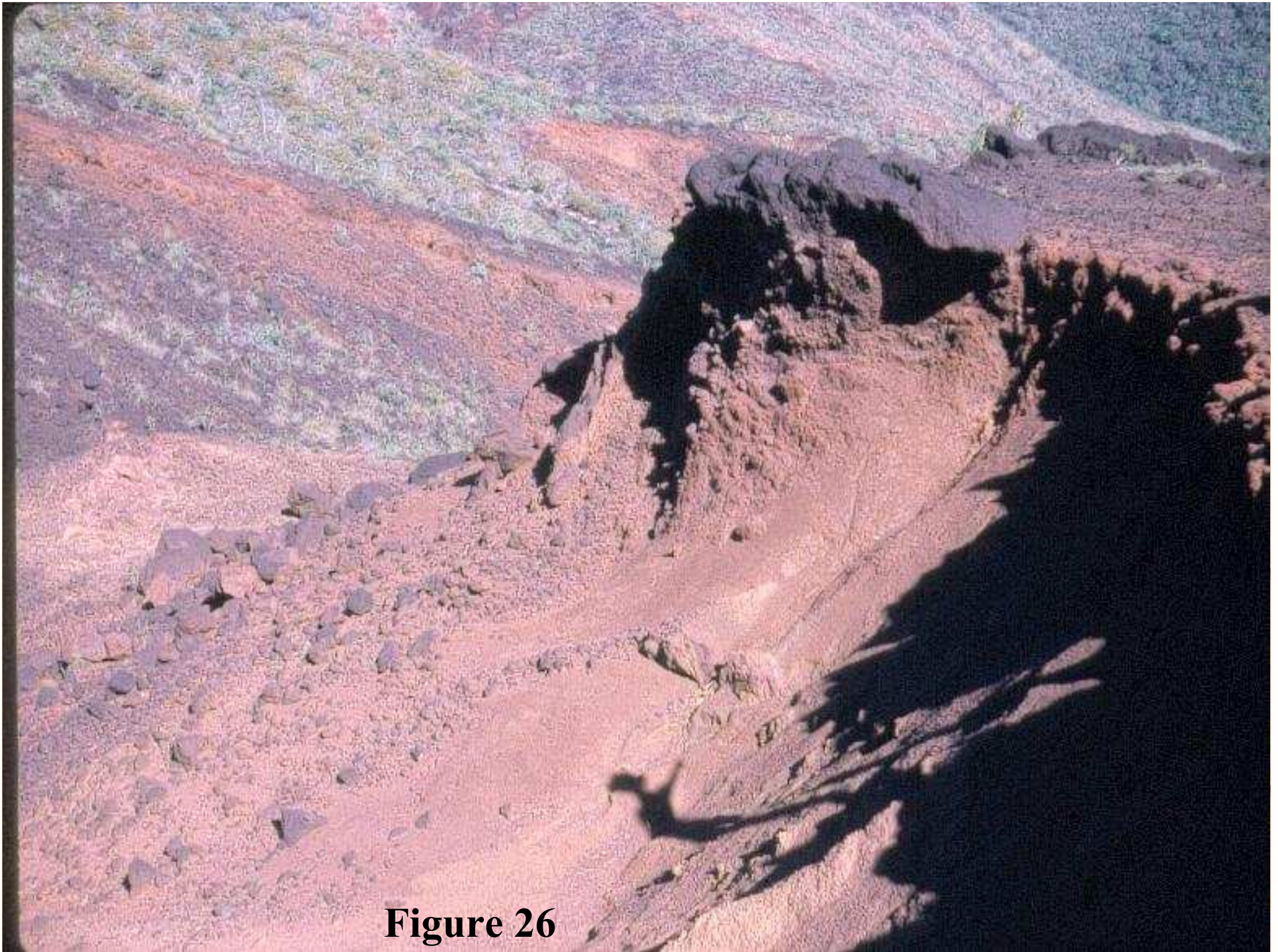


Figure 26

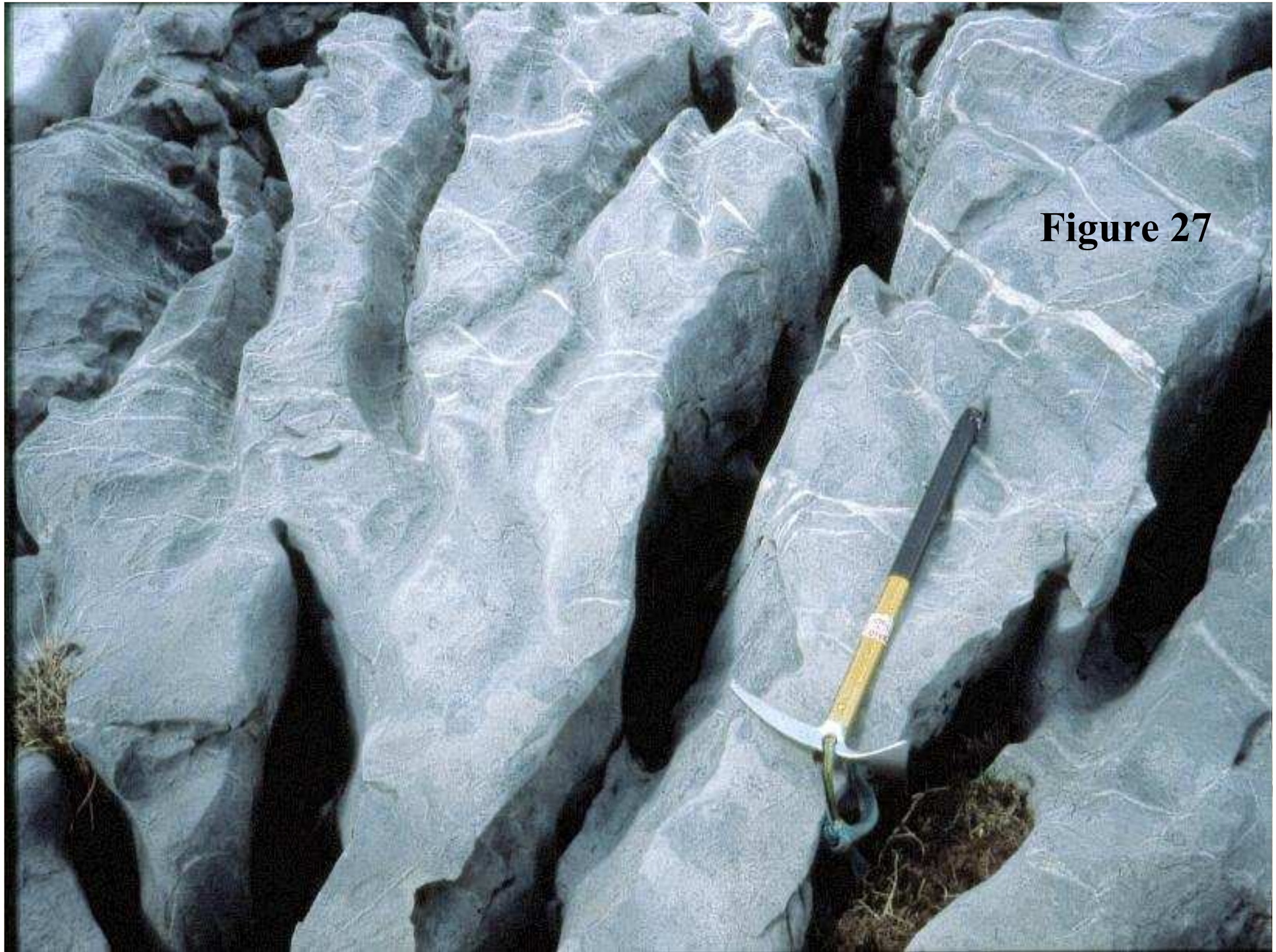


Figure 27

Figure 28

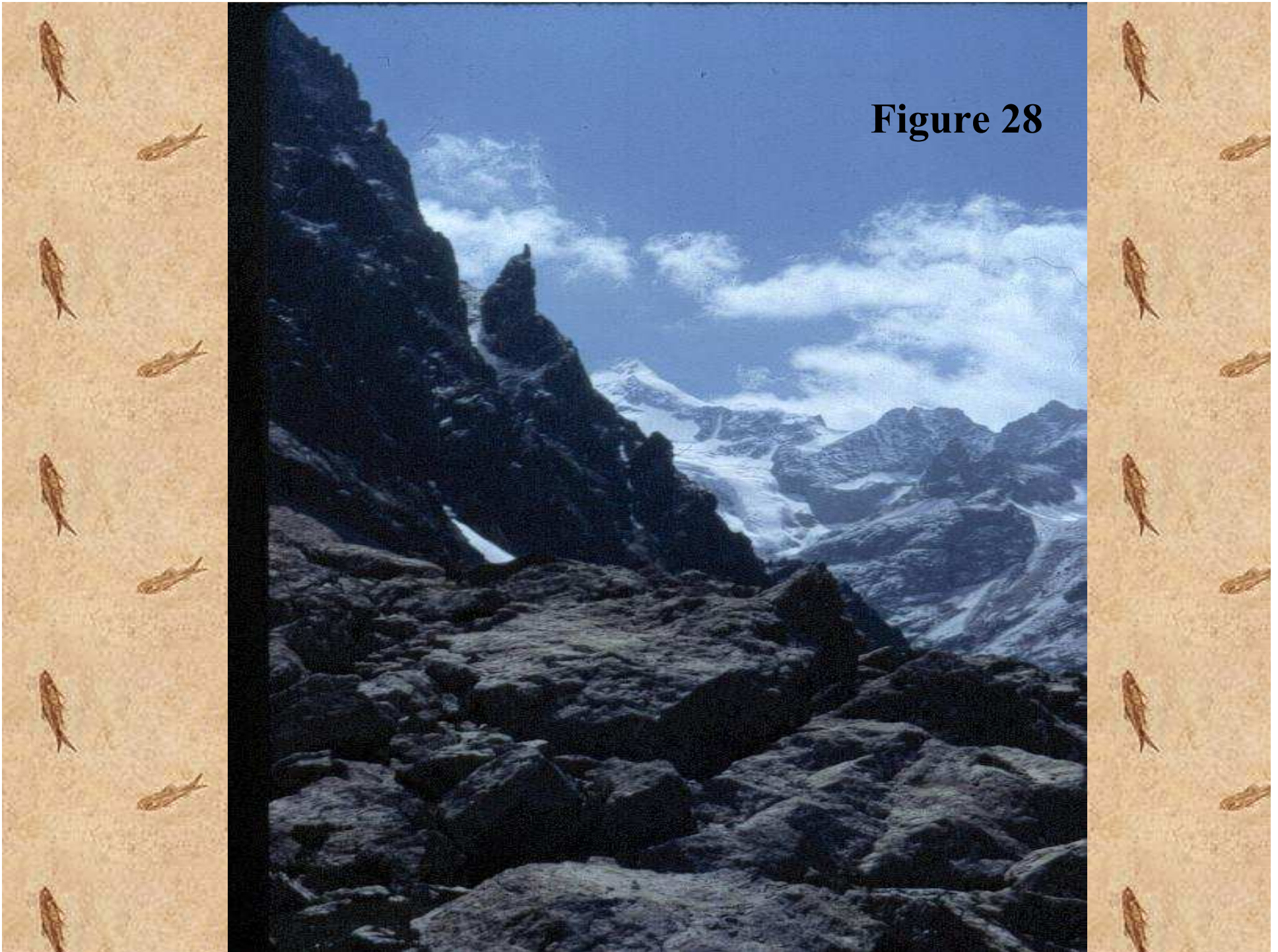




Figure 29

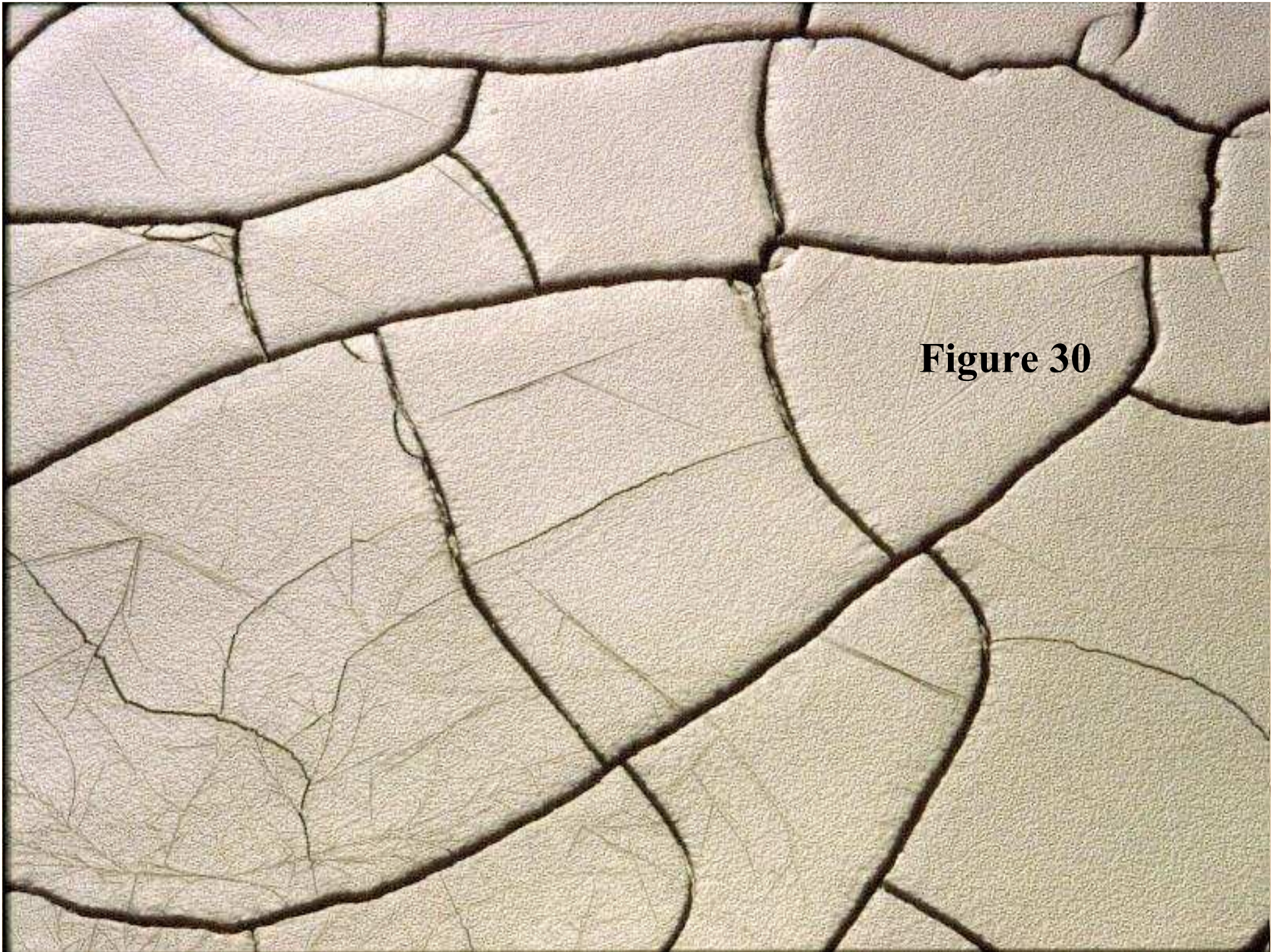


Figure 30

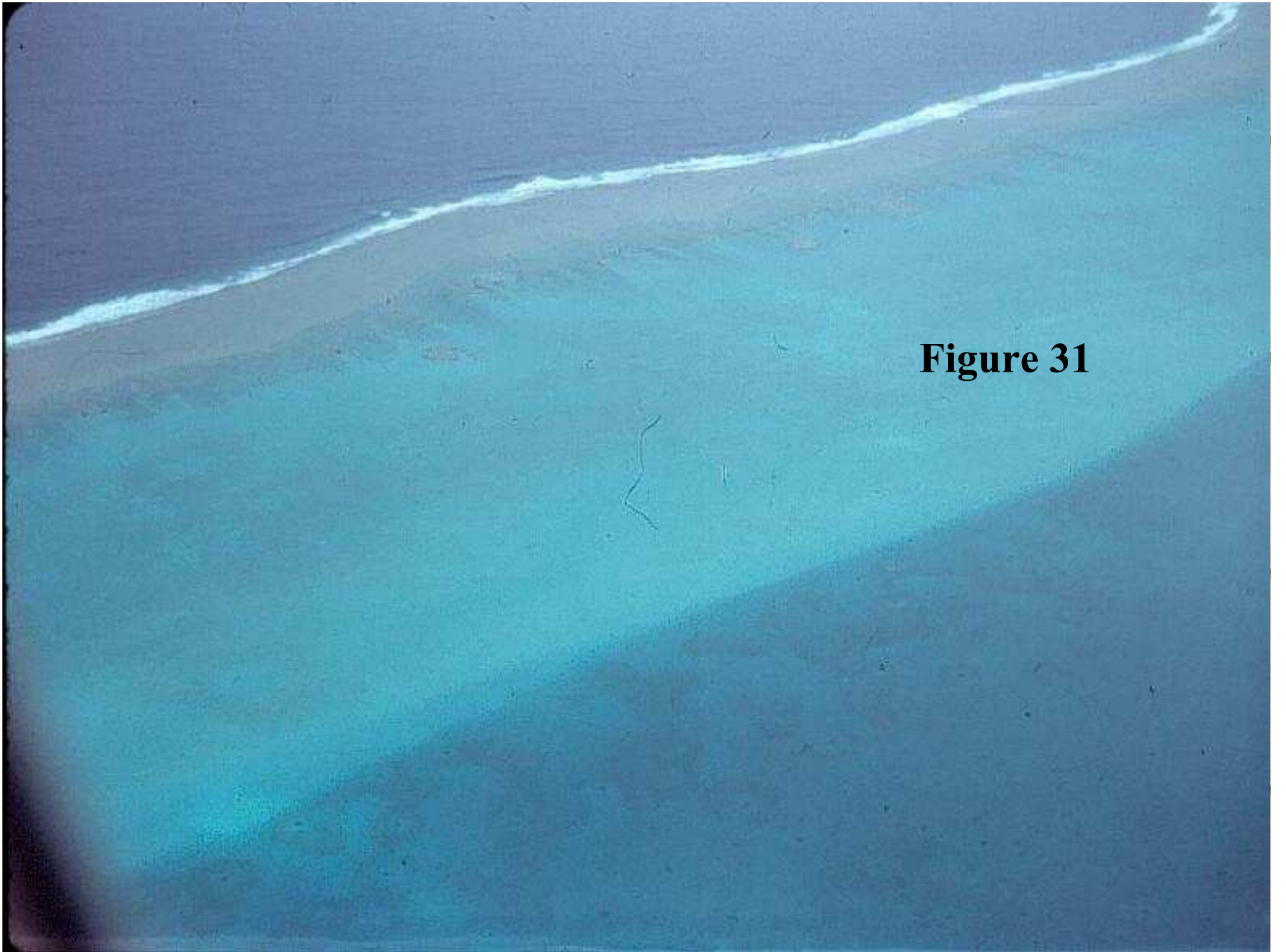


Figure 31

Figure 32



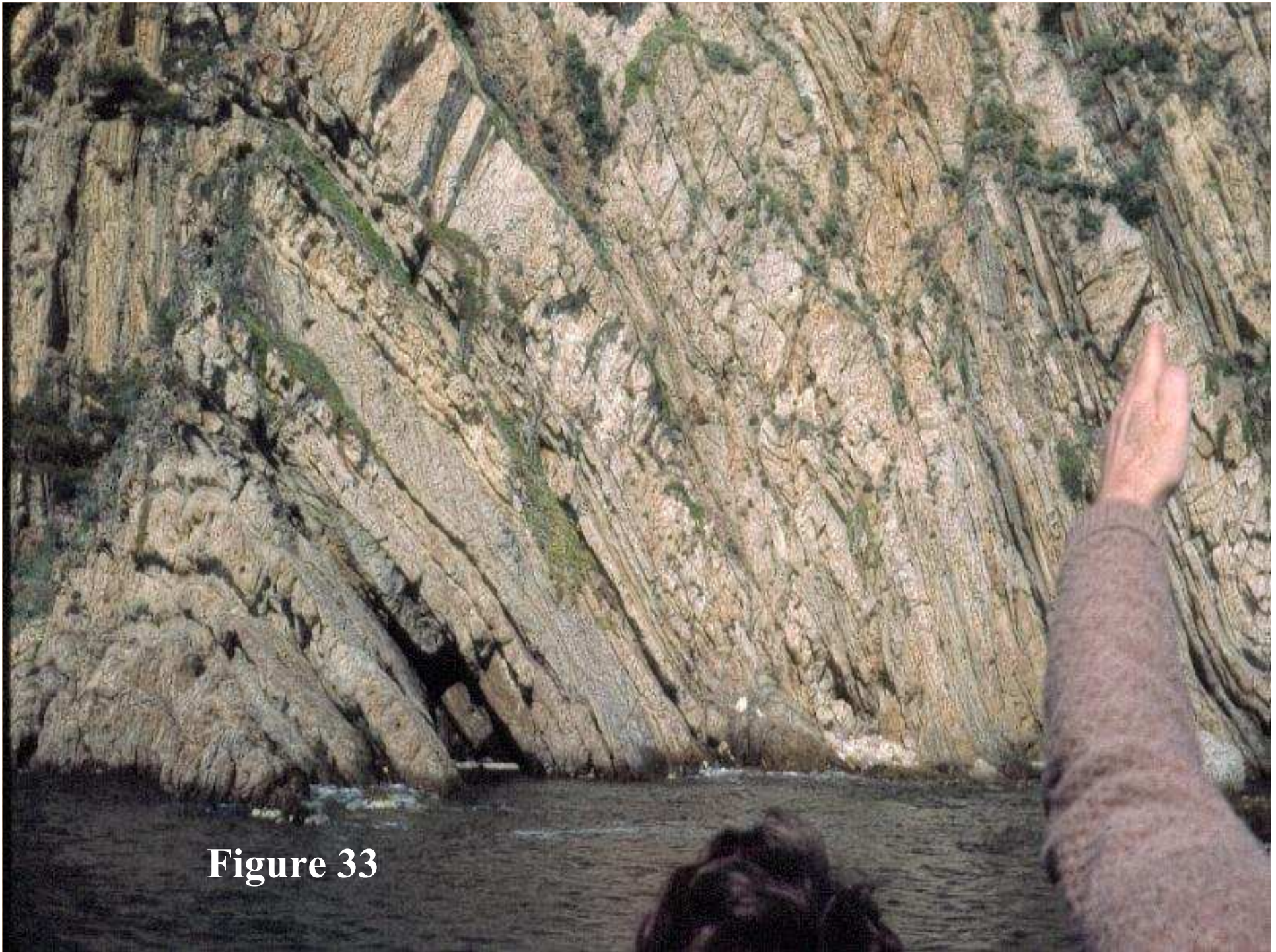


Figure 33

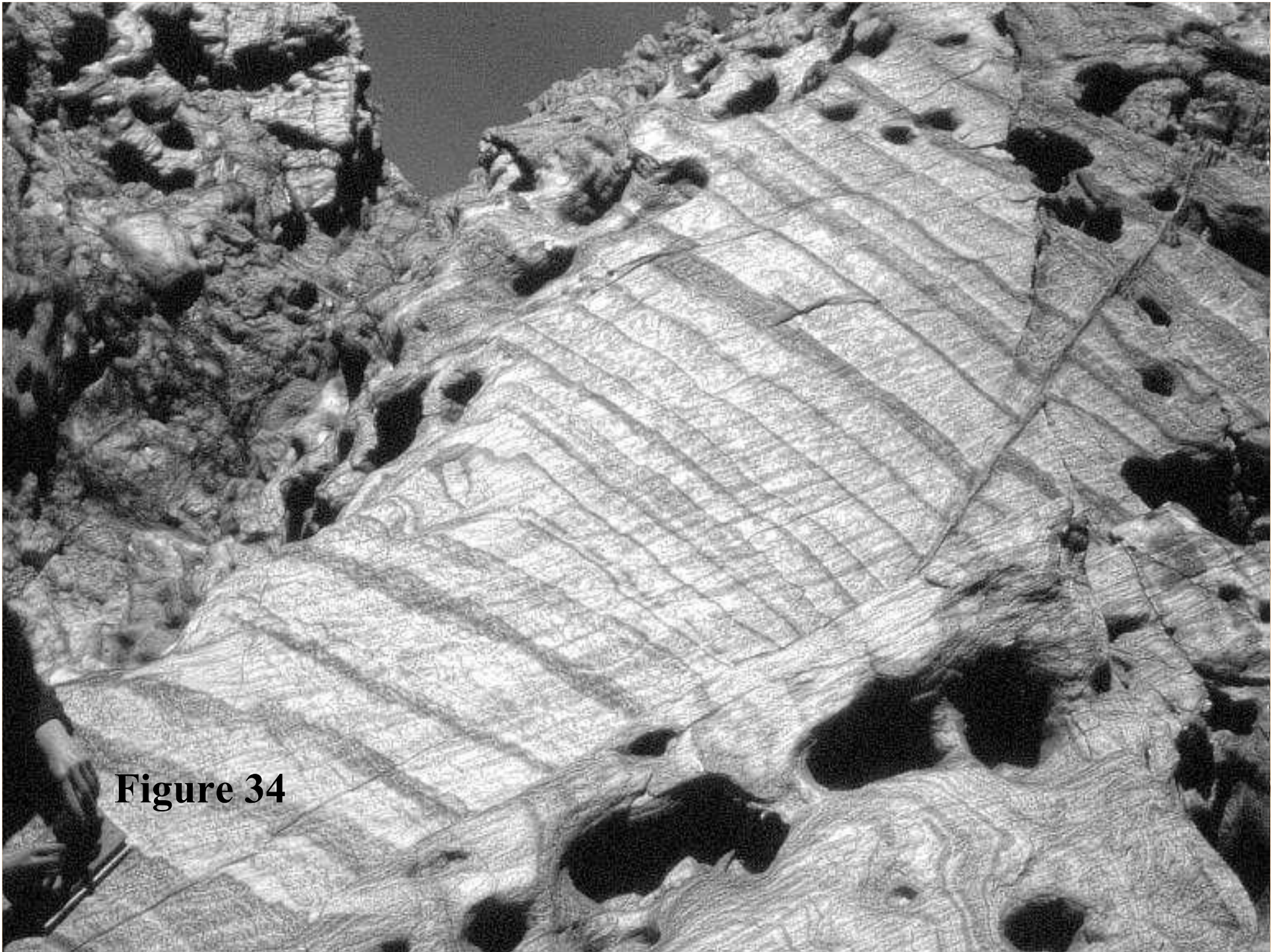


Figure 34



Figure 35

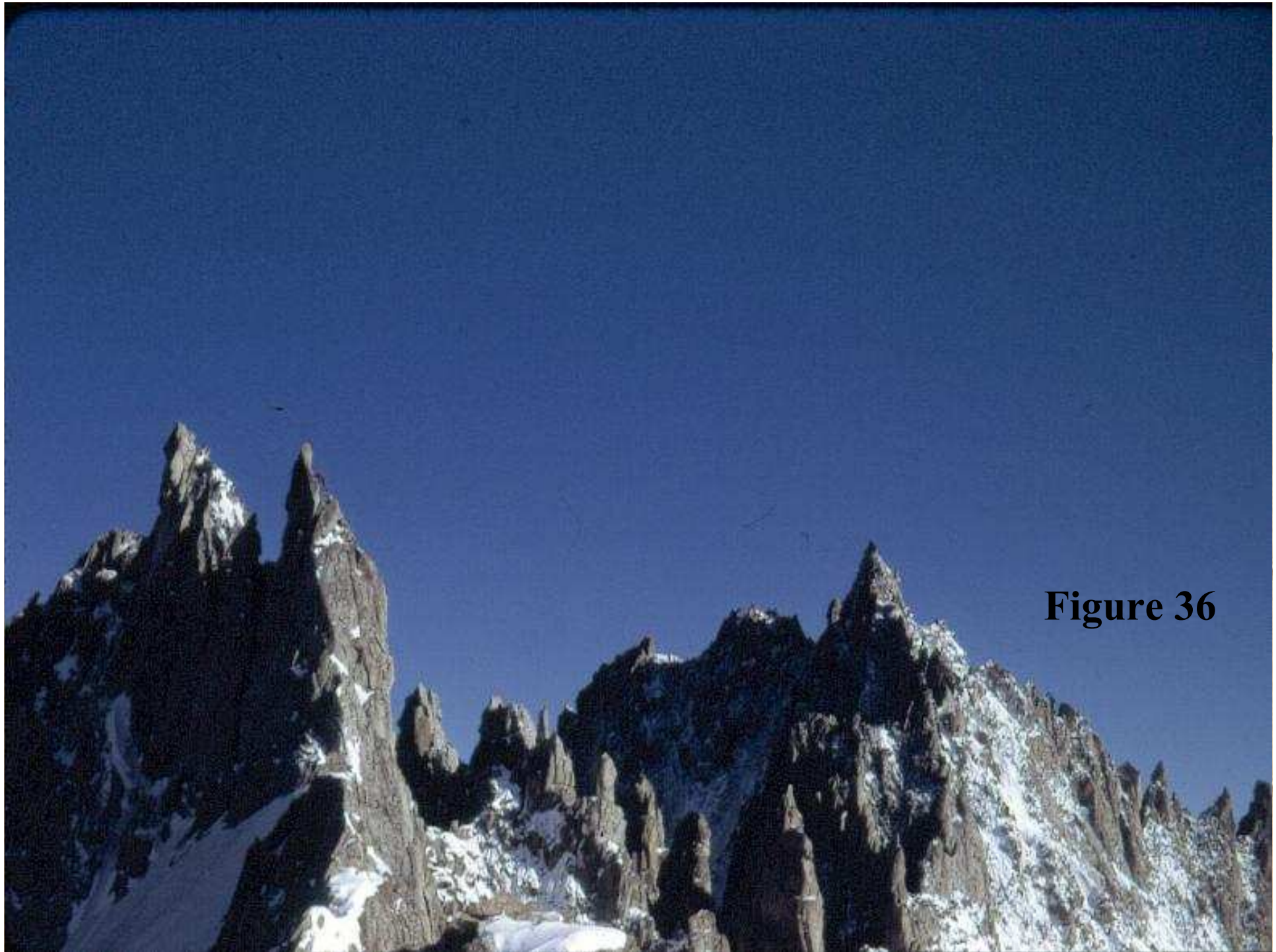


Figure 36

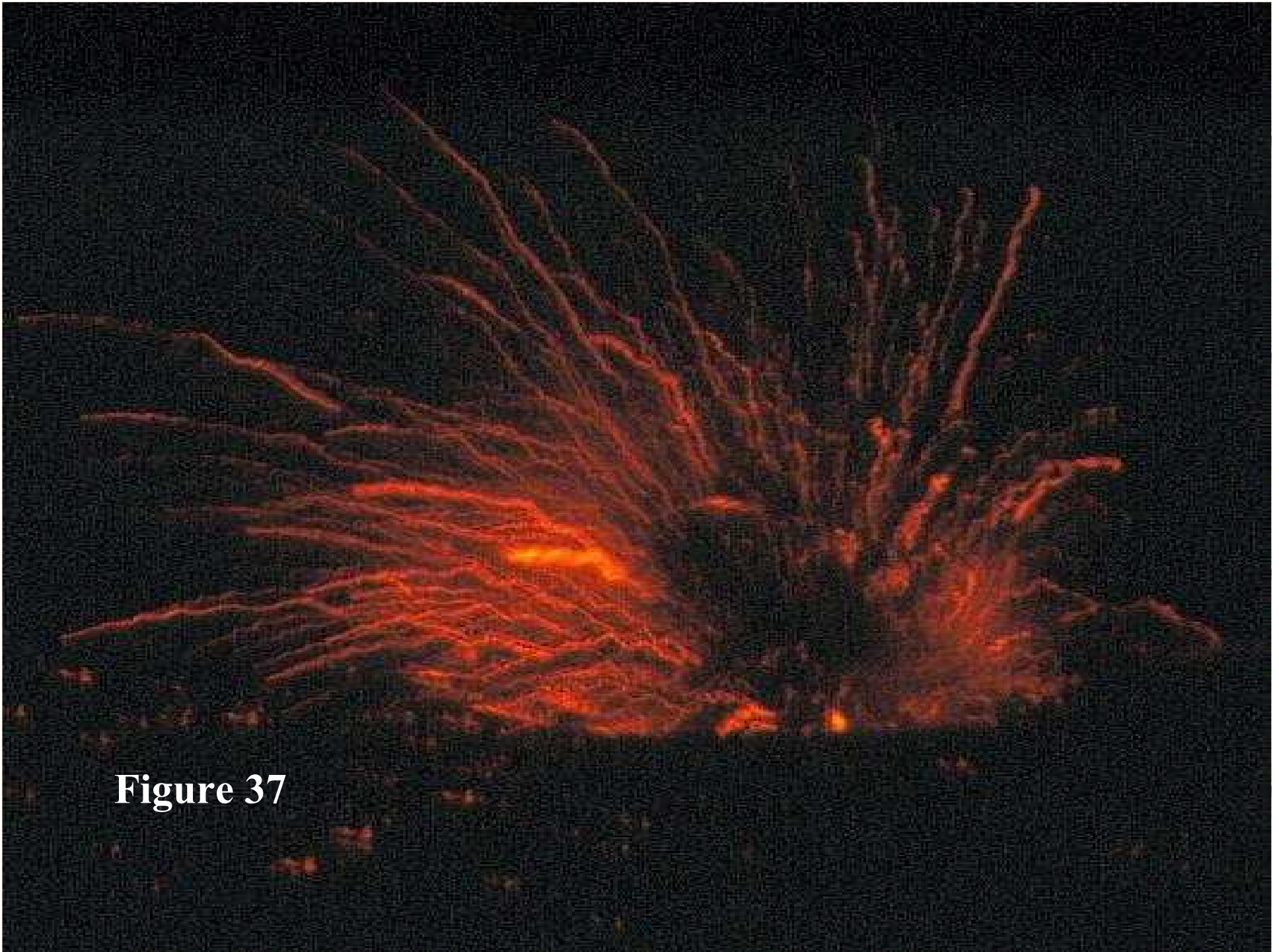


Figure 37

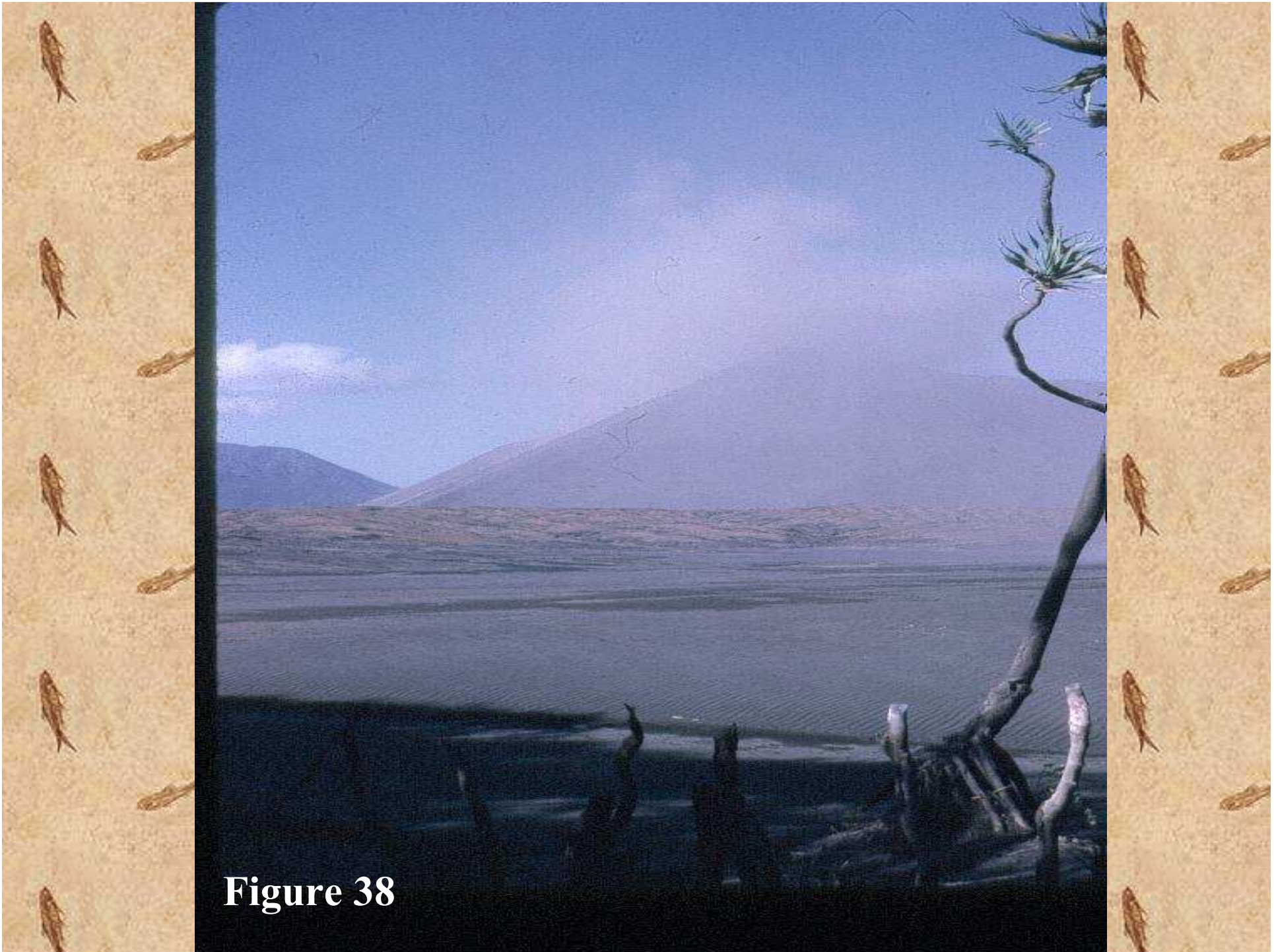


Figure 38



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) -> O₂ ->
vie animale (hémoglobine)

- chaîne alimentaire (exemples)

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

gymnospermes -> reptiles

plantes à fleurs -> mammifères



Figure 46

PL. XXIX

PLANTES FOSSES DE L'EGYPTE

MUSEUM HISTORICUM NATURAE HISTORICAE

Fig. 1.

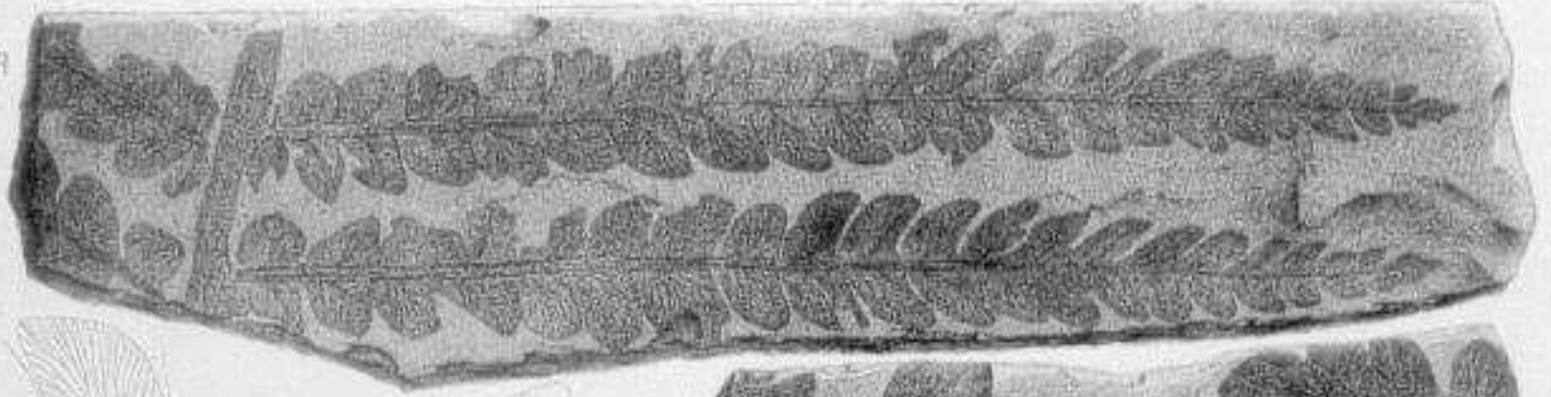


Fig. 17.

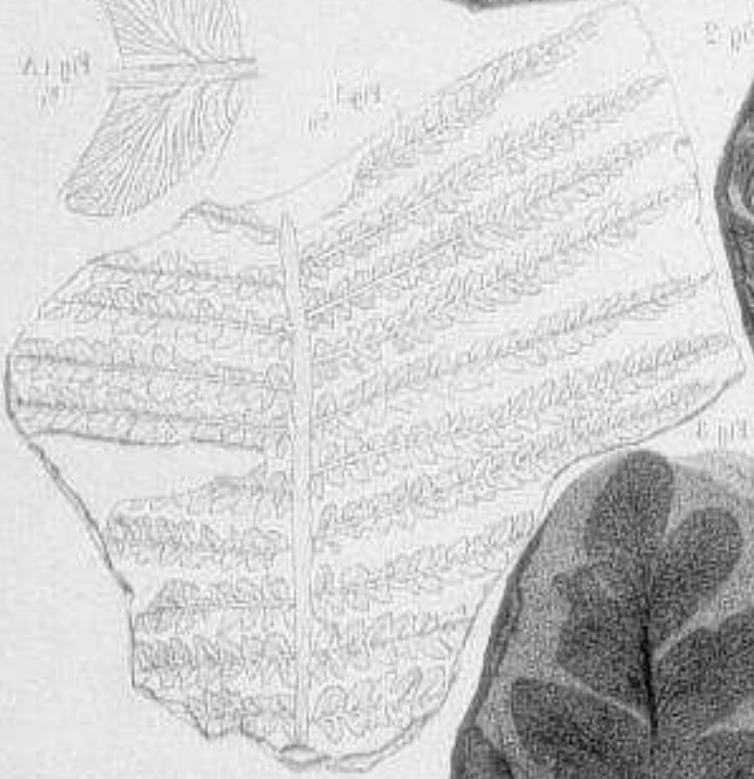


Fig. 18.

Fig. 2.

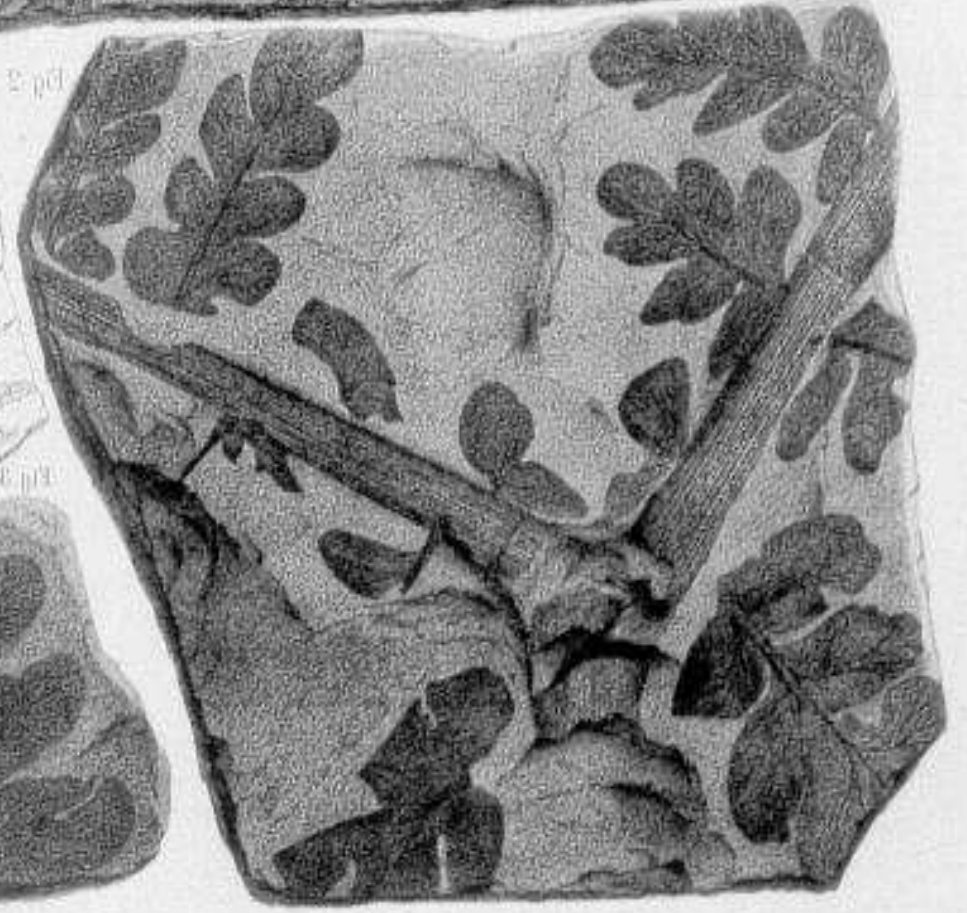


Figure 47

PLANTES FOSSES DE L'EGYPTE

MUSEUM HISTORICUM NATURAE HISTORICAE

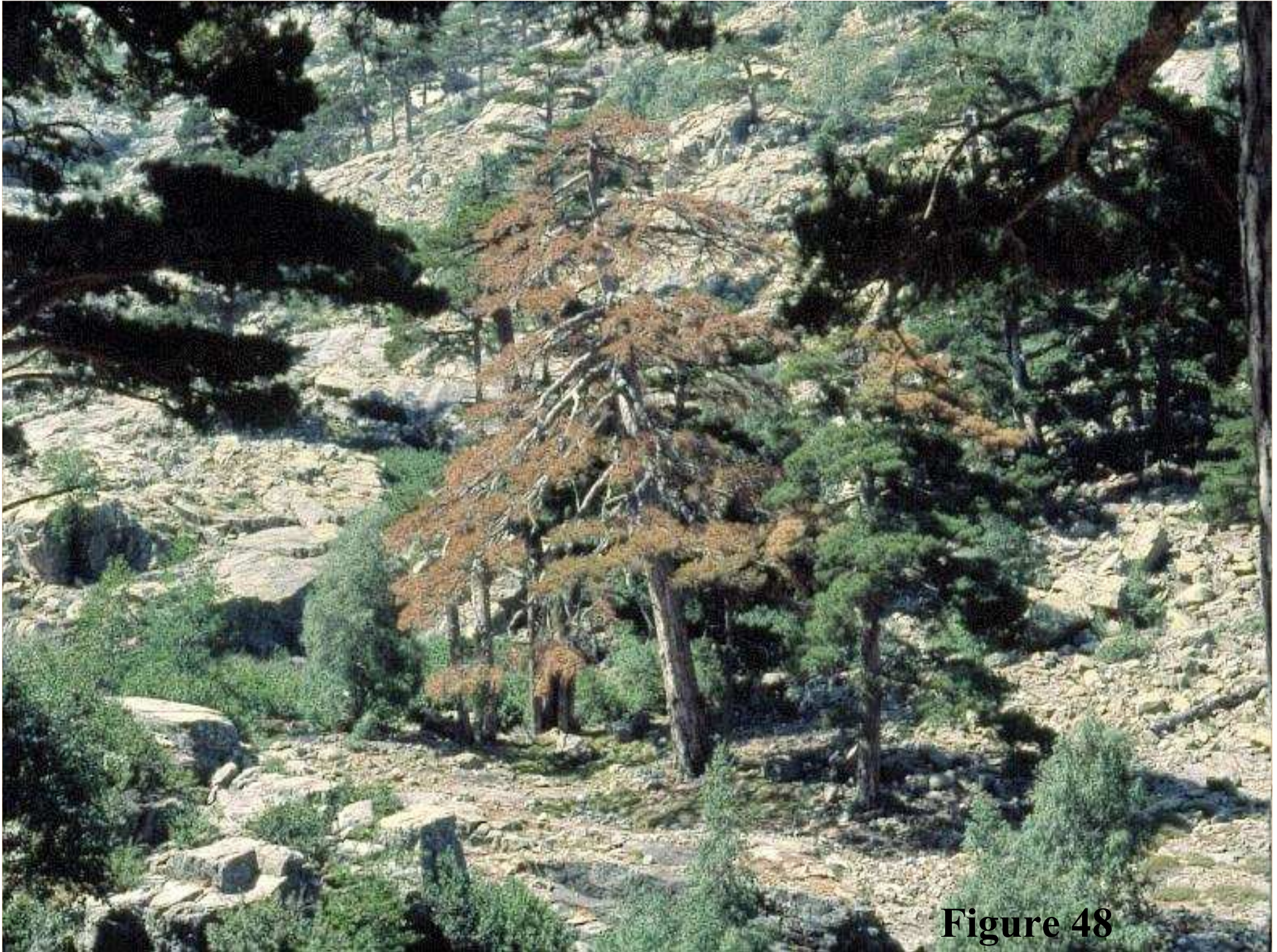
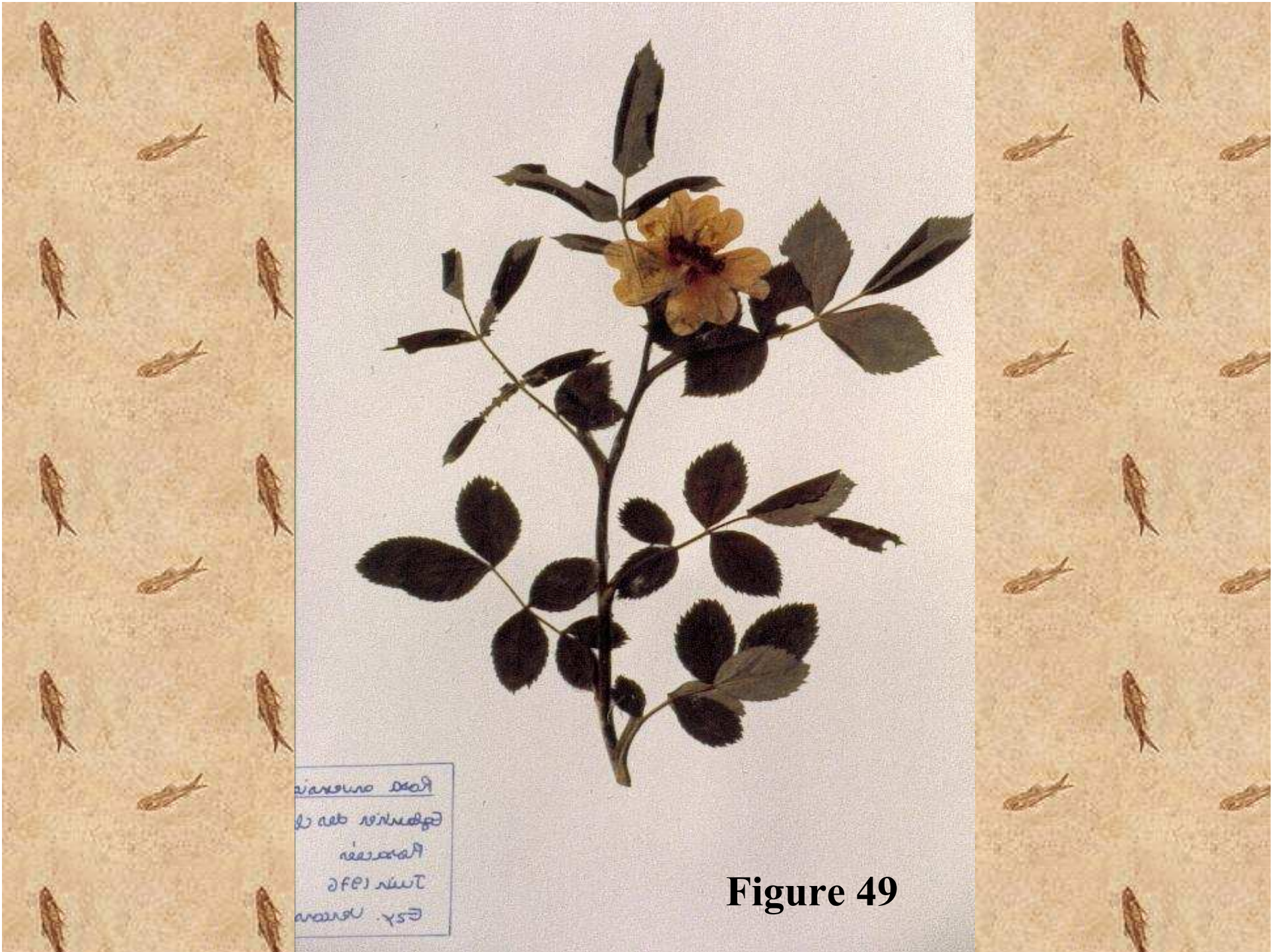


Figure 48



Rosa chinensis
Garten der
Professoren
Juni 1976
E.S. Nelson

Figure 49



Figure 50

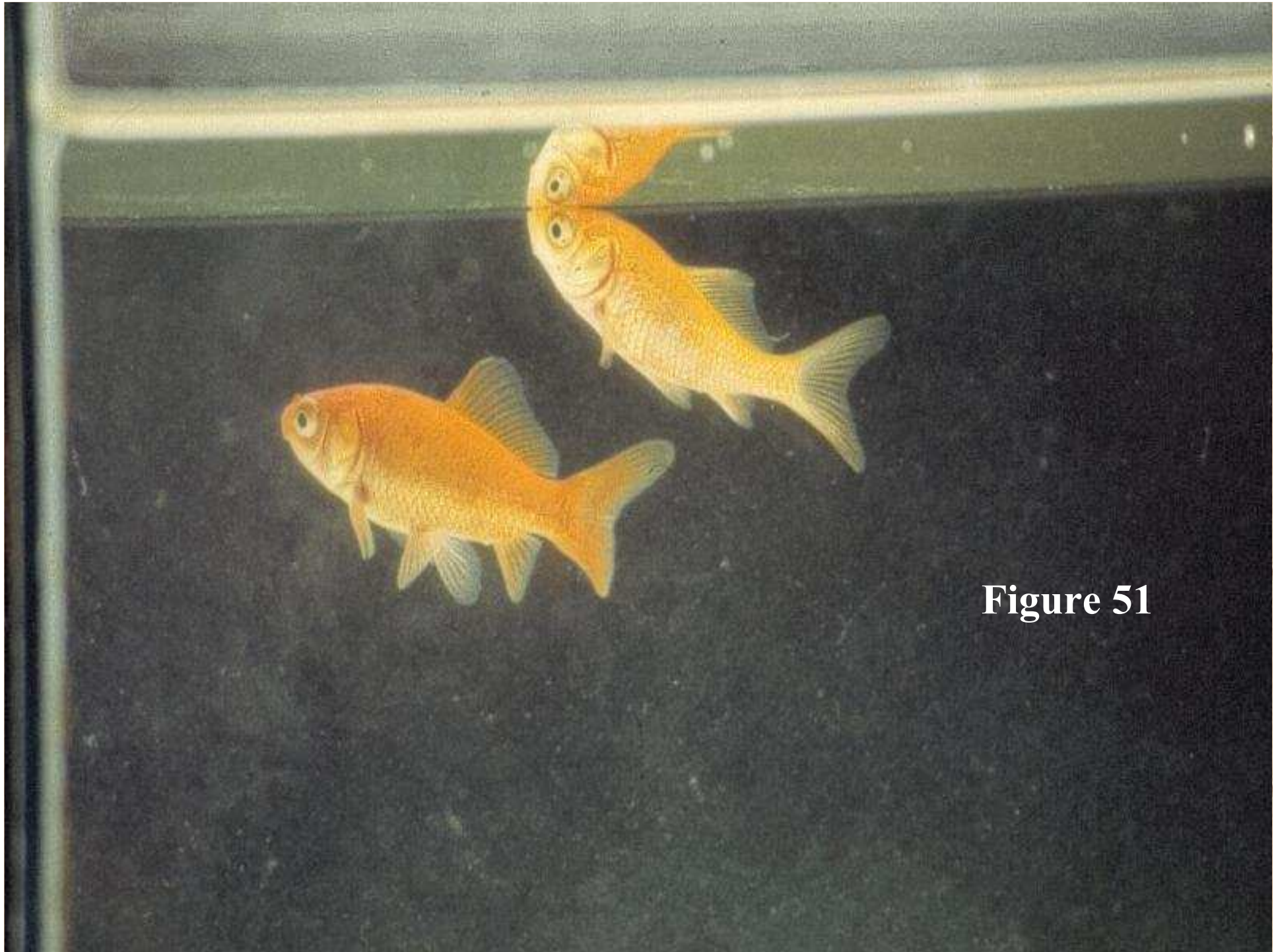


Figure 51

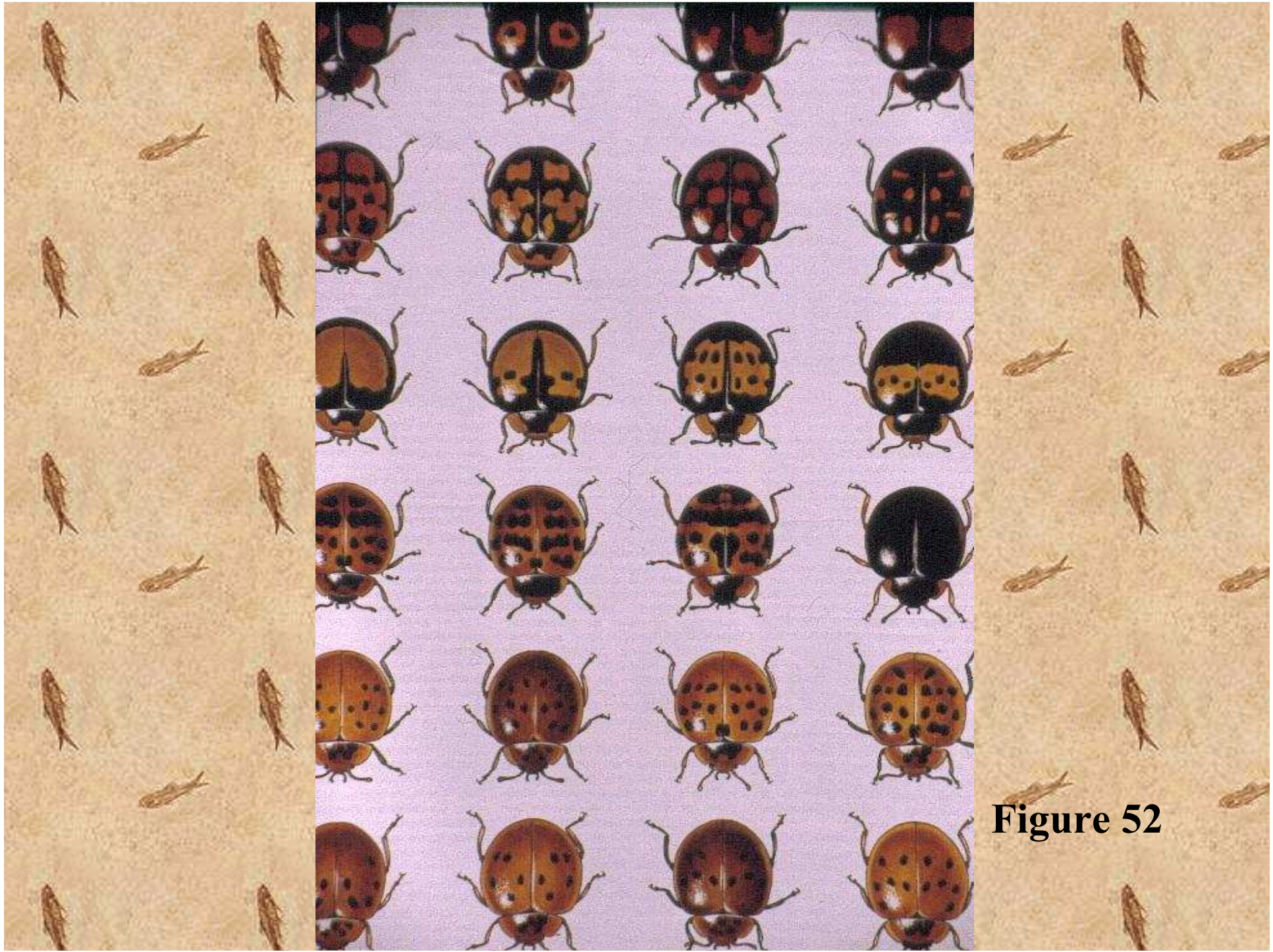


Figure 52

ÉCHELLE DES TEMPS GÉOLOGIQUES

ÉVOLUTION DES VERTÉBRÉS

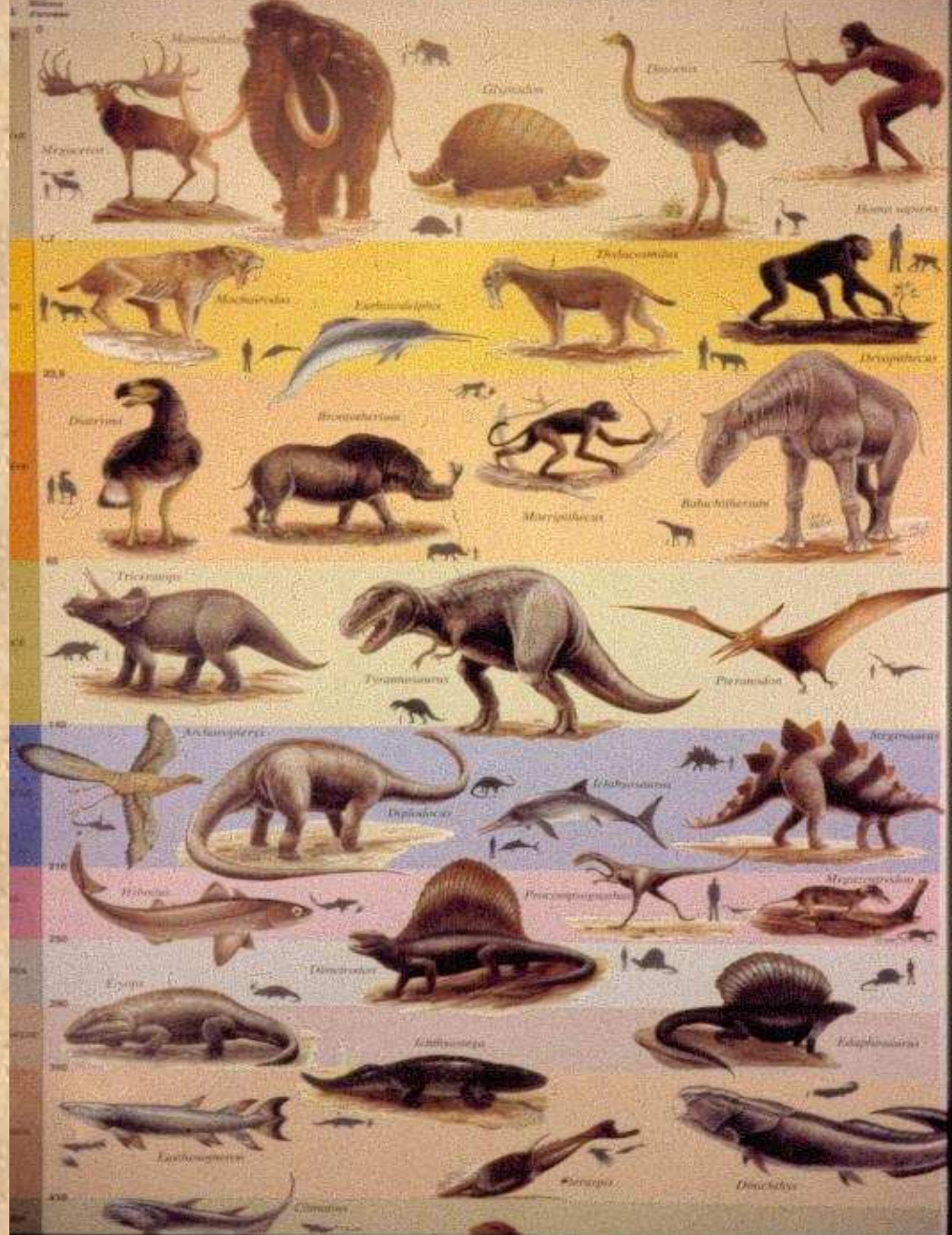
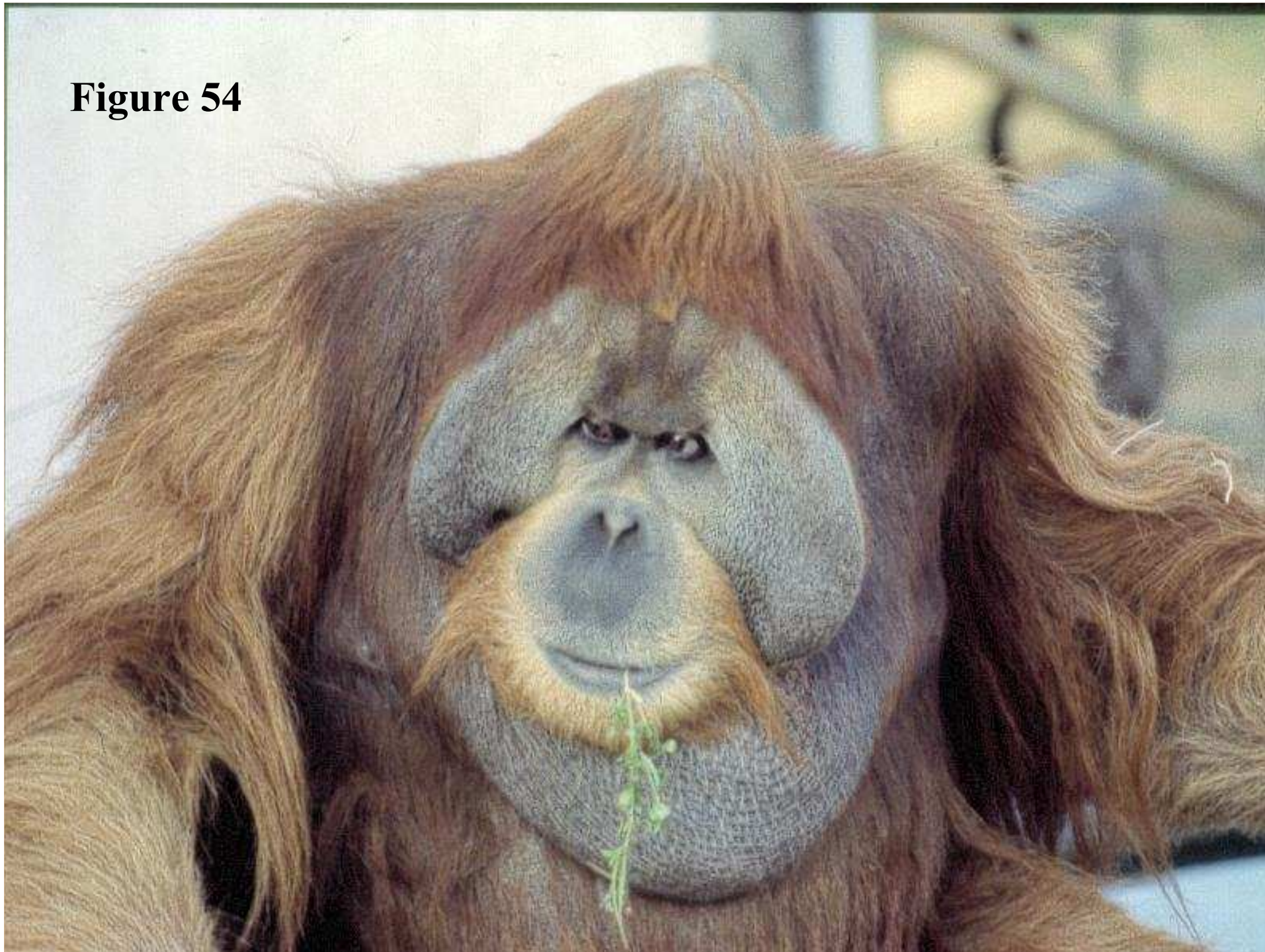


Figure 53

Figure 54



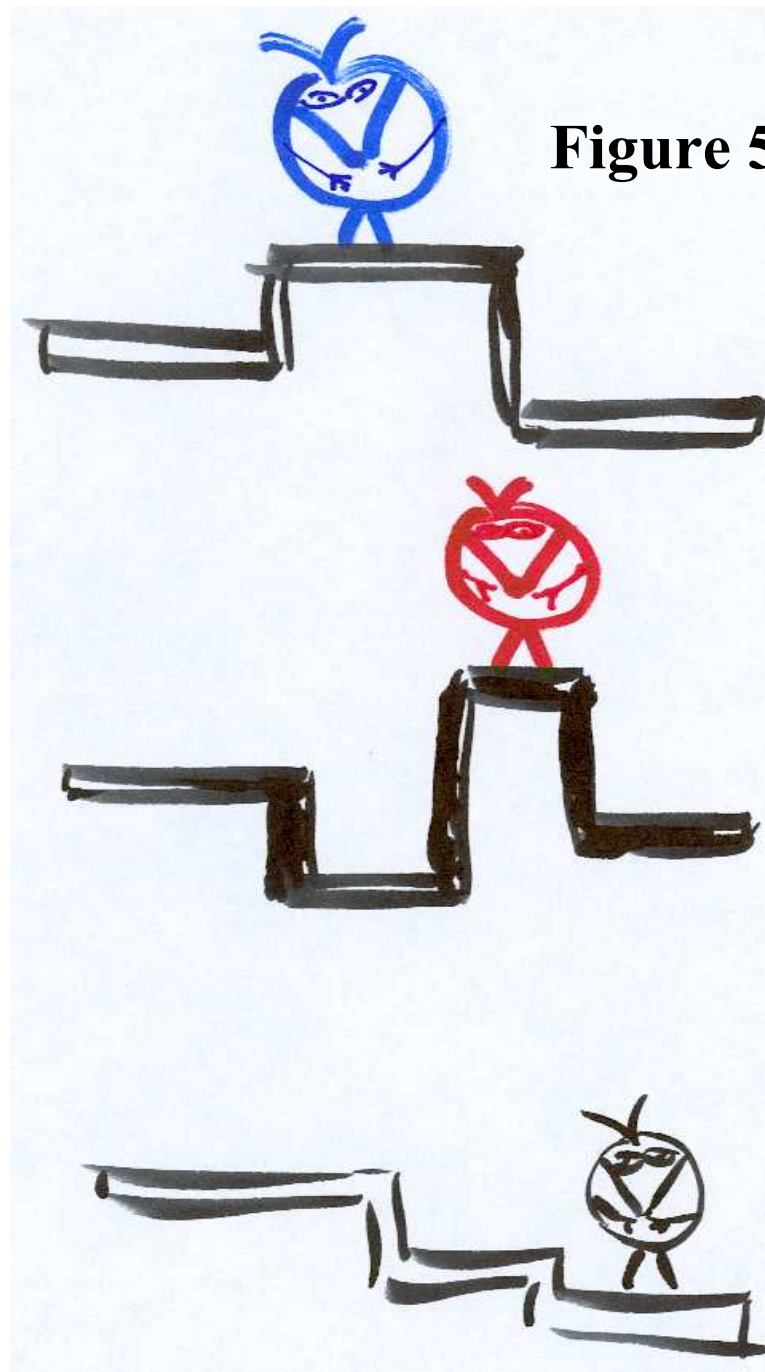
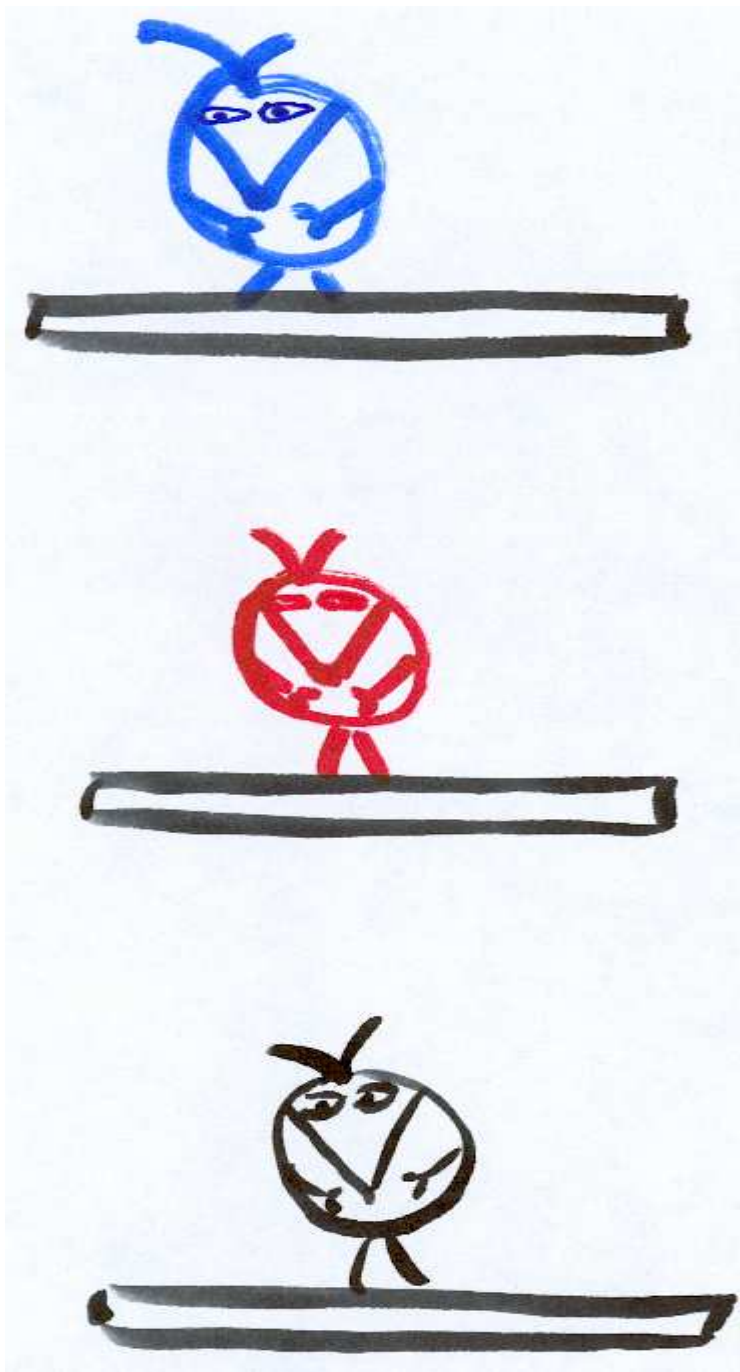


Figure 55

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

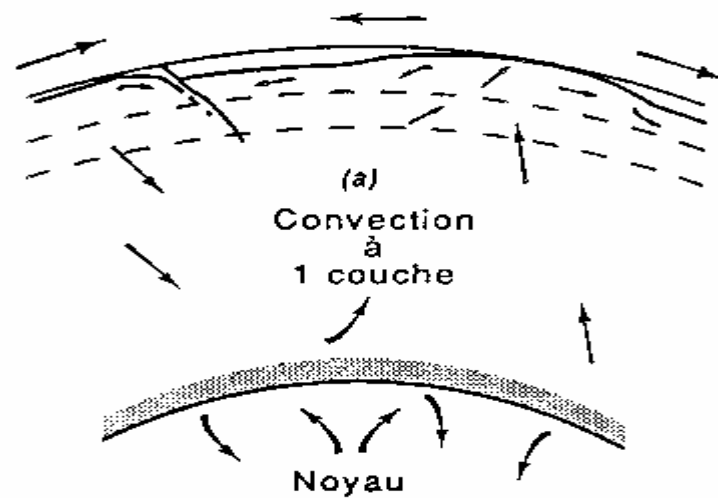
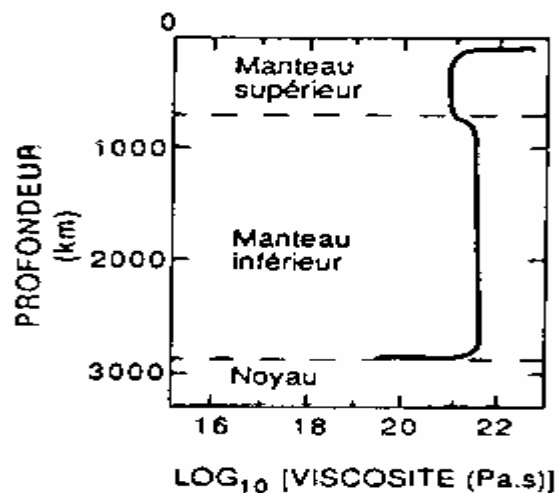


Figure 58

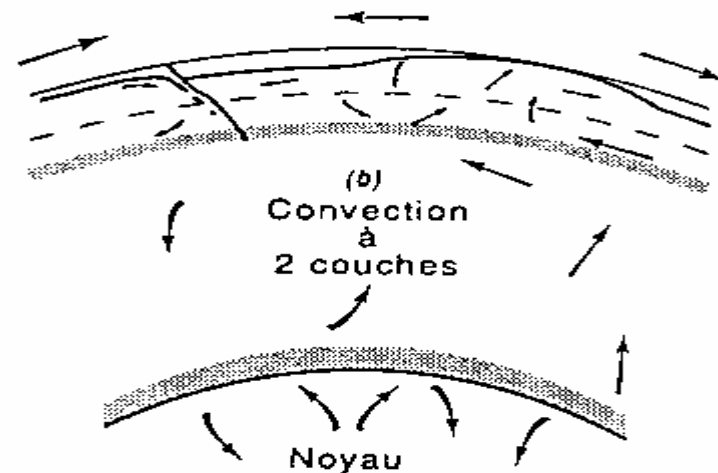
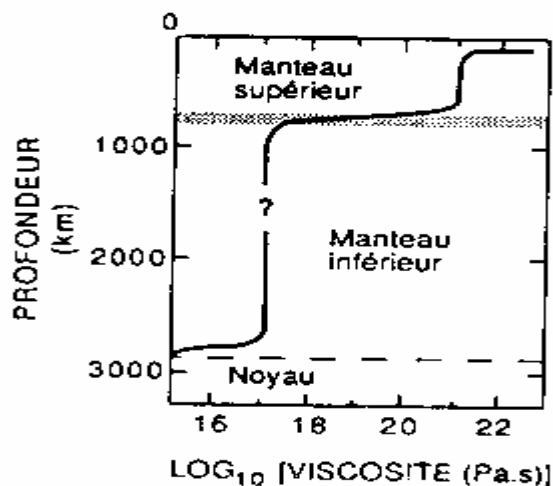
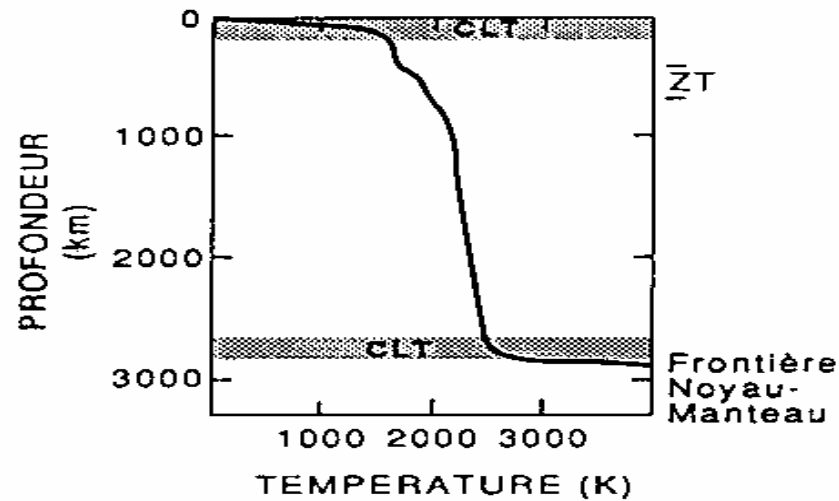
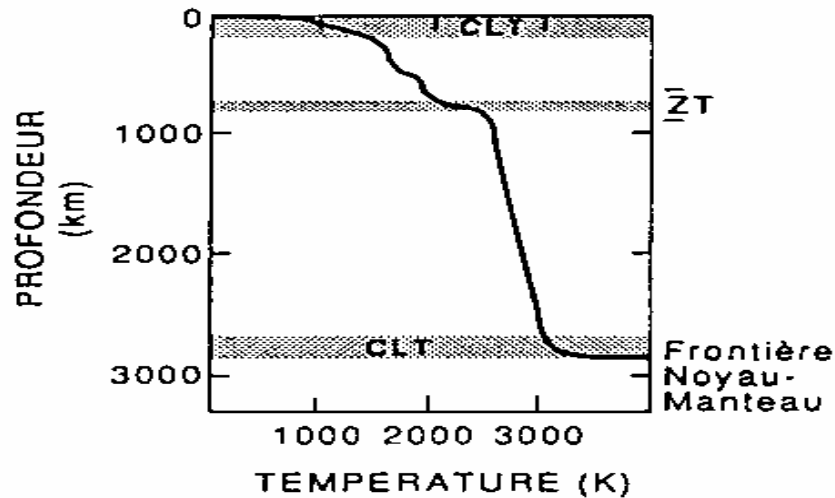


Fig. 5-10 : Convection du manteau.

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 ² /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 ² /s dans l'eau 10^{-4} à 10^{-6} cm ² /s dans silicate fondu 10^{-6} cm ² /s	Même ordres de grandeur	Echanges de matière locaux dans le métamorphisme: quelques centimètres par milliers 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		
Cinétique chimique	Vitesse prop. à affinité chimique	10^{-1} à 10^{-14} moy. 10^{-4} à 10^{-5} Mol/m ² /s		Temps de disparition d'un cristal millimétrique à 25°C: de 10^2 à 10^6 ans (quartz)

Figure 61

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 CaCO_3 36.93 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°C : 10^{-3} mol/l
Teneur en Ca d'une rivière: $15 \text{ g} / \text{m}^3$ ($0.3 \cdot 10^{-3} \text{ mol/l}$)
Prenons 1 mol/m^3

Figure 62

- 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

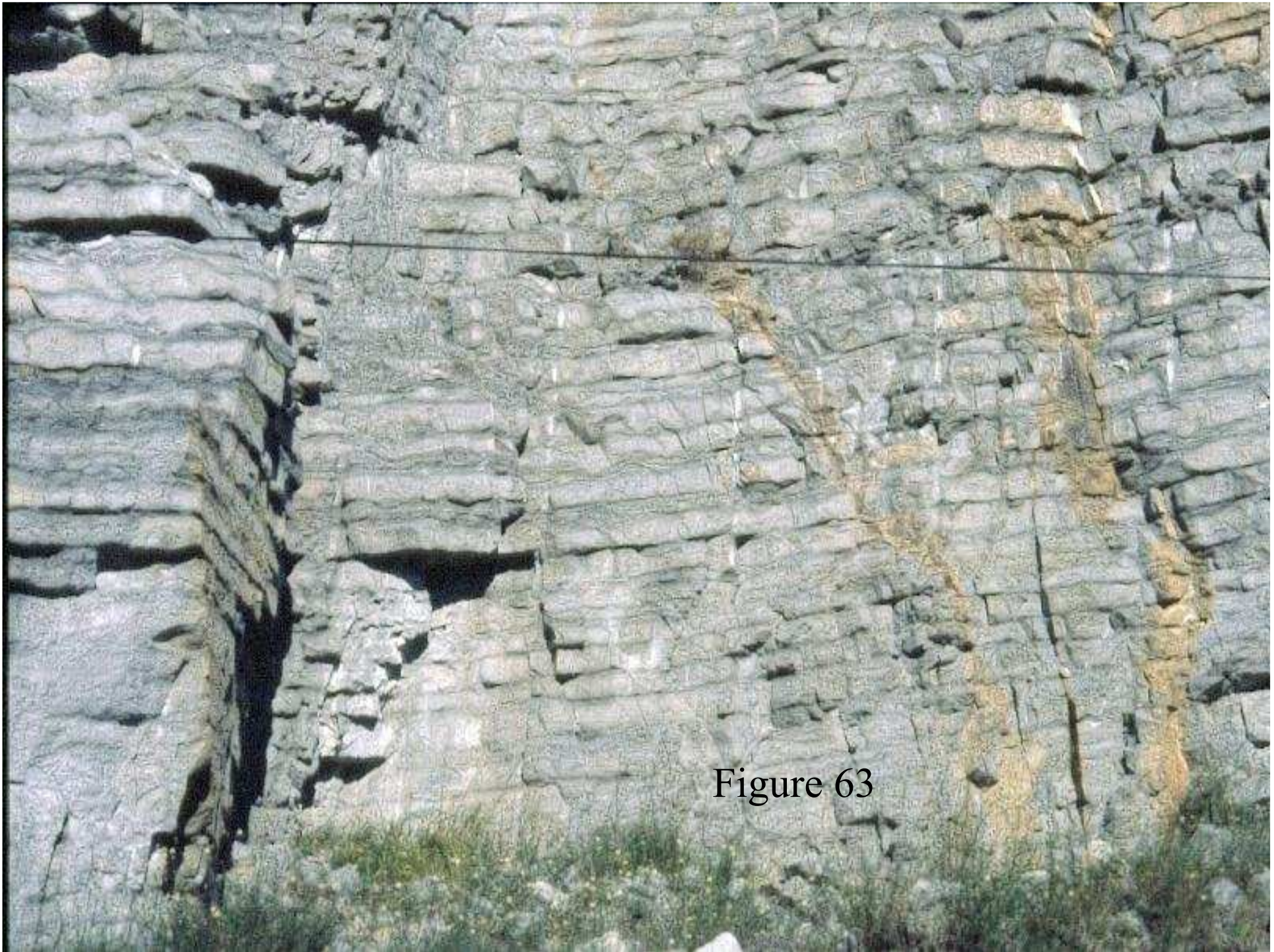


Figure 63

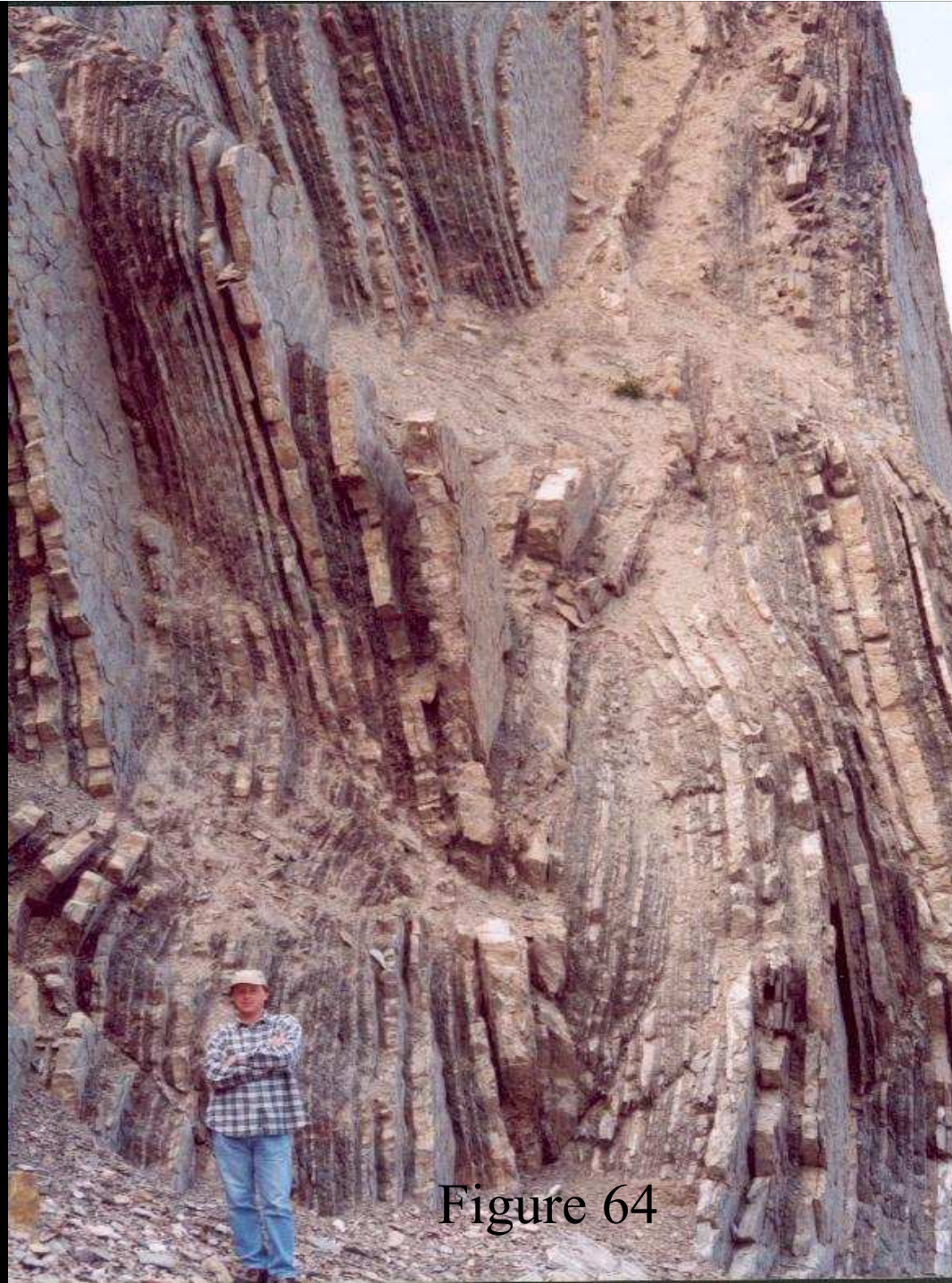


Figure 64

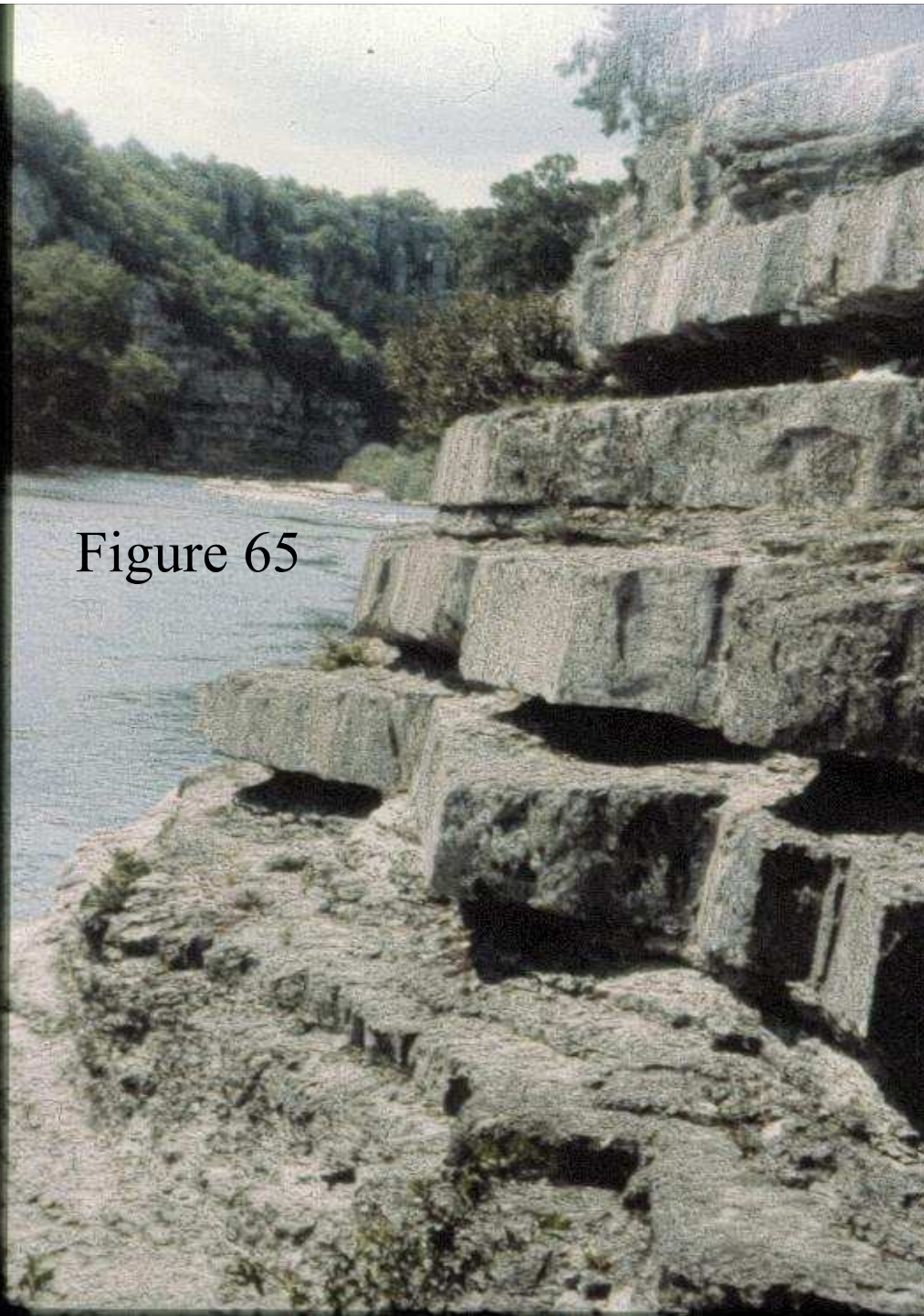


Figure 65



Figure 66

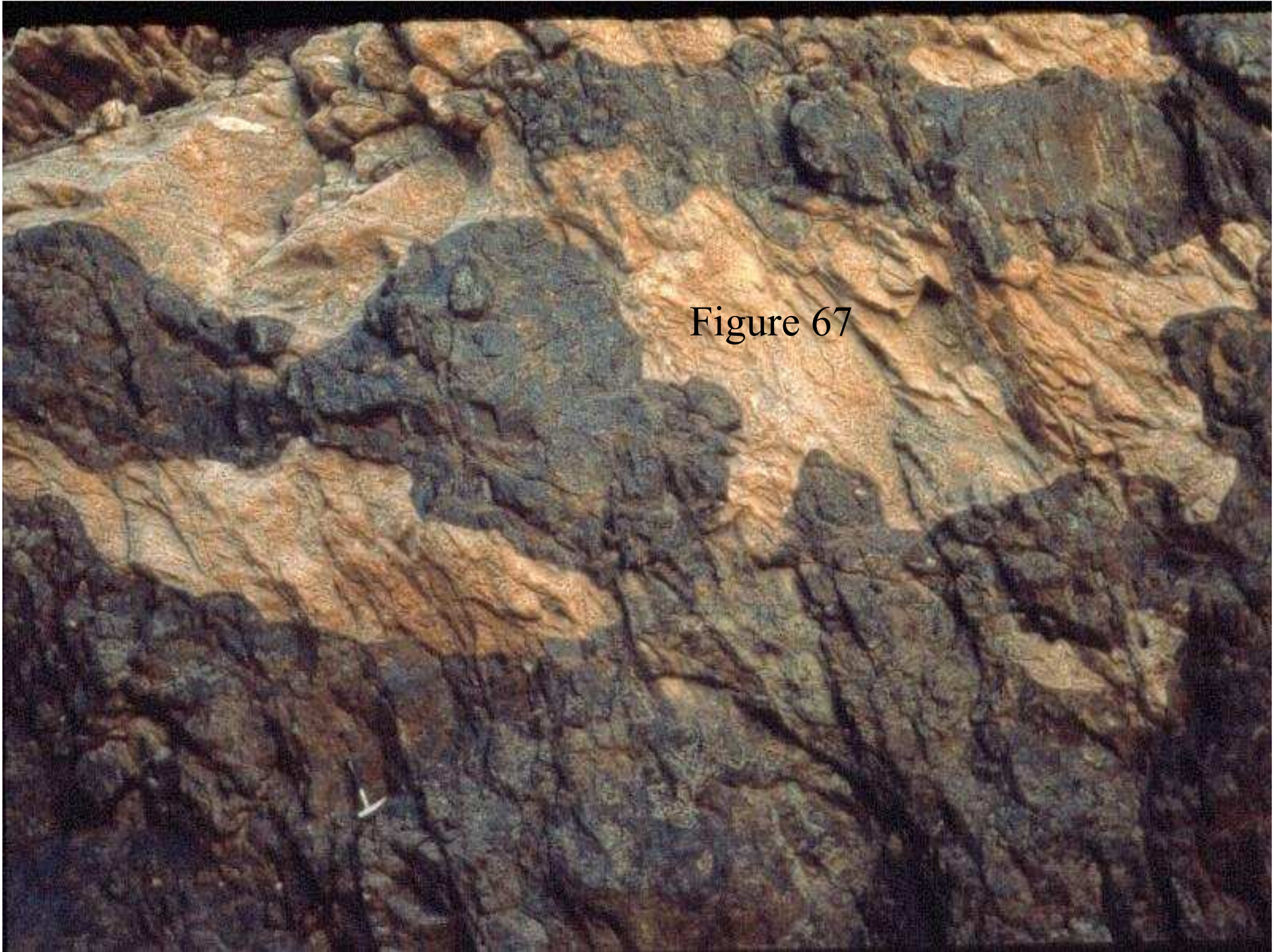


Figure 67

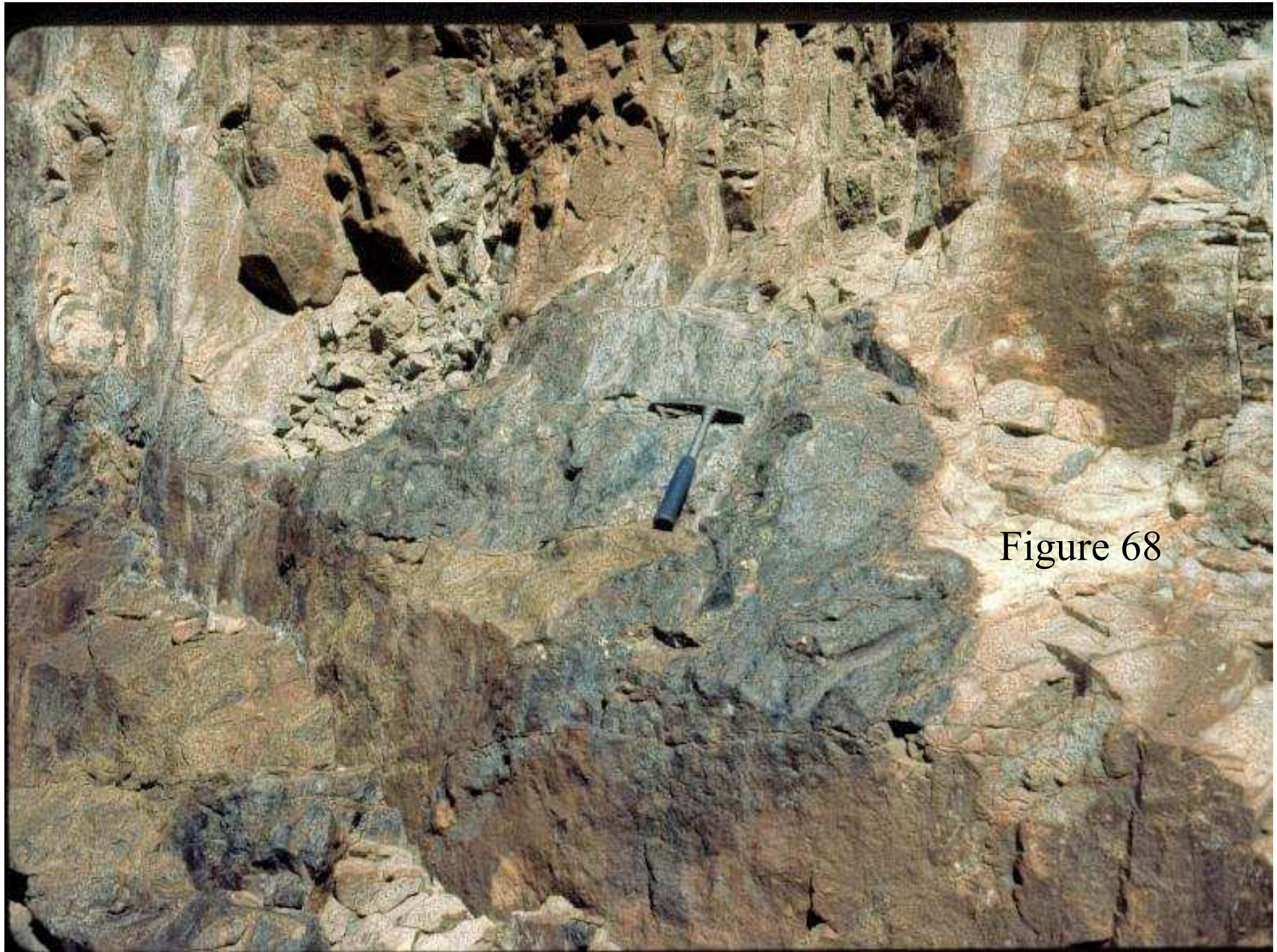


Figure 68

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. ^t 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)	2 à $3 \cdot 10^8$ 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^e siècle, coexistence et allers et retour entre des points de vue différents

- Antiquité: monde historique judéo-chrétien / 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

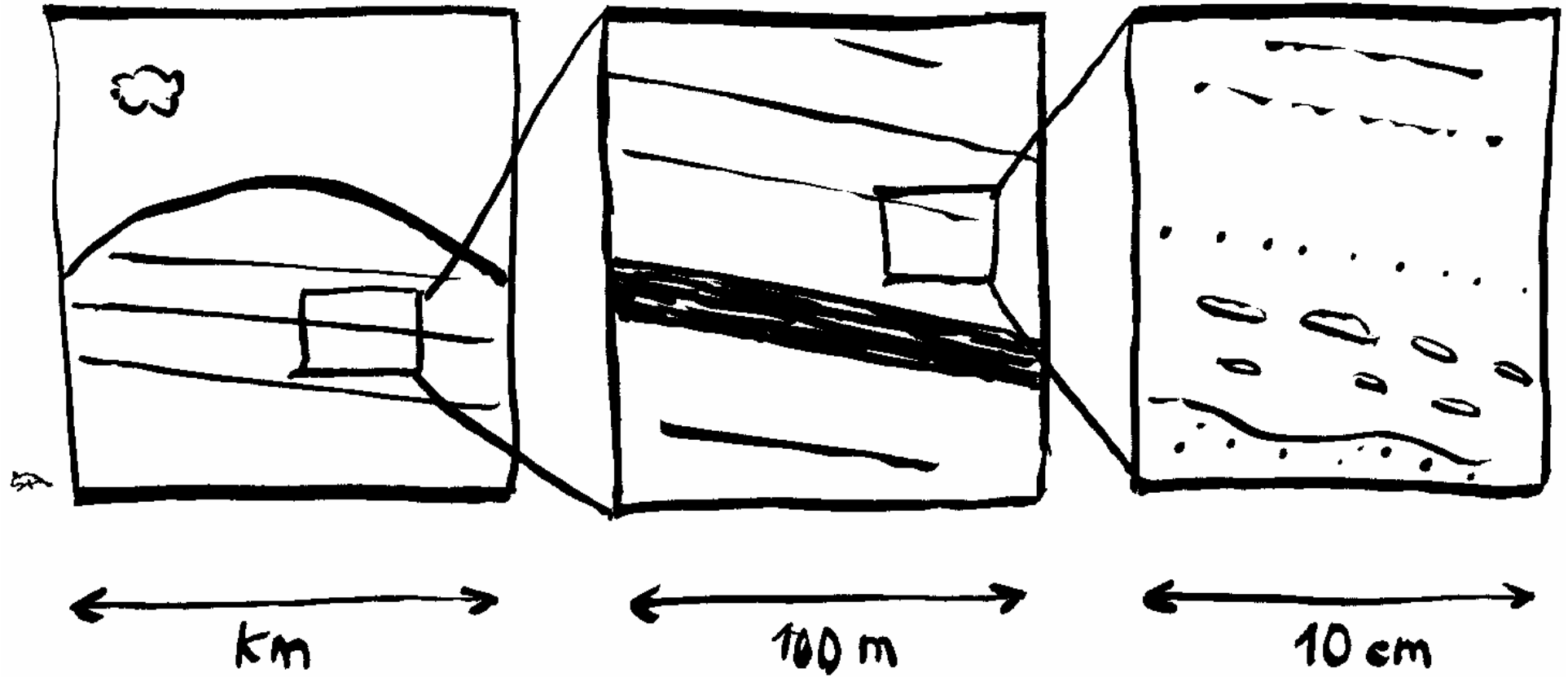


Figure 75

- 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

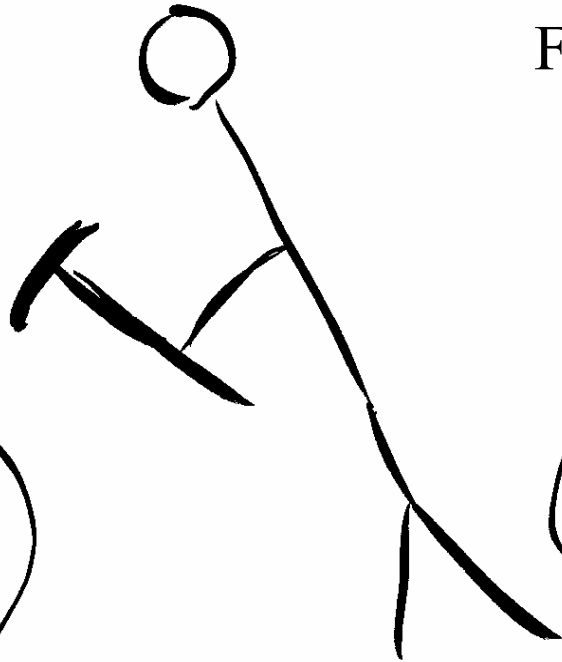


Figure 76

(géologue)

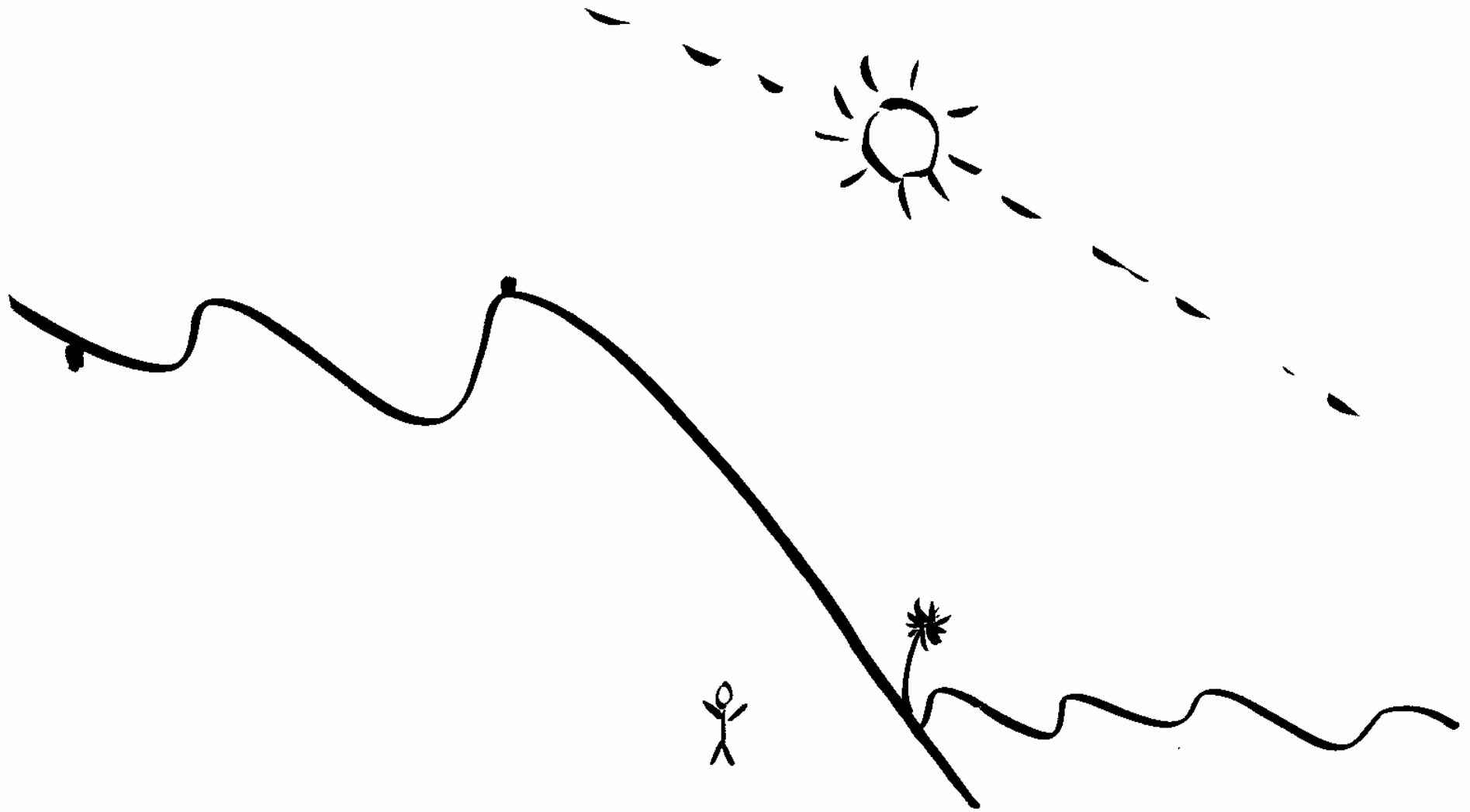


Figure 77

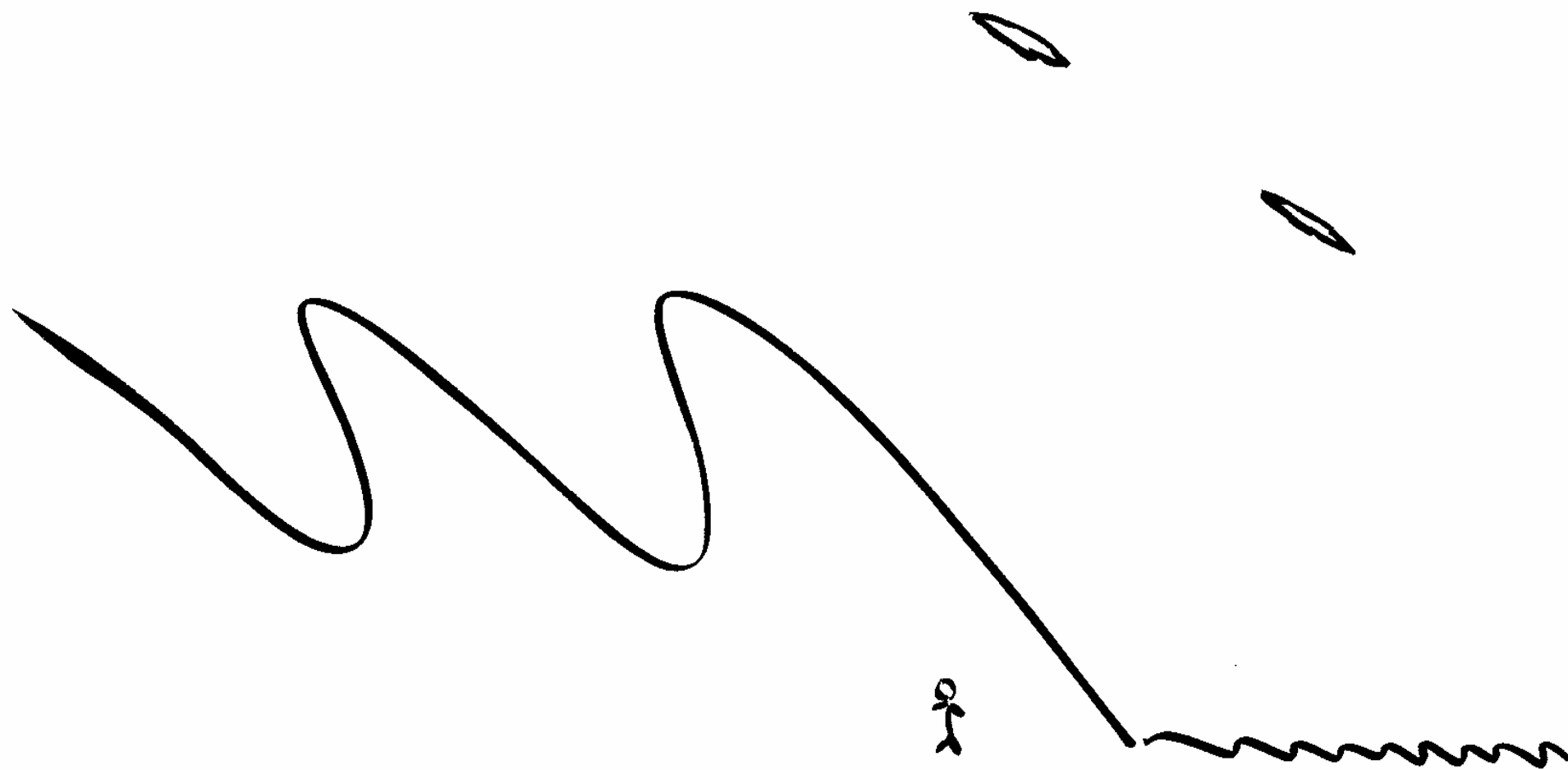


Figure 78