

GEOLOGIE STRUCTURALE (6)

Robert Six

I. EXEMPLES DE DISLOCATIONS TECTONIQUES DISCONTINUES

L'étude des différents exemples proposés ici nous permettra de voyager à travers le monde. Nous passerons de la Grèce à la Californie, en passant par l'Algérie, l'Arménie, la France, les Philippines, le Maroc, la Calabre, le Tibet et le Moyen Orient. La plupart de ces exemples sont repris de « Ce que nous disent les pierres » de Maurice MATTAUER.

A. Faille normale sur le mur du canal de Corinthe en Grèce (Fig. 1)

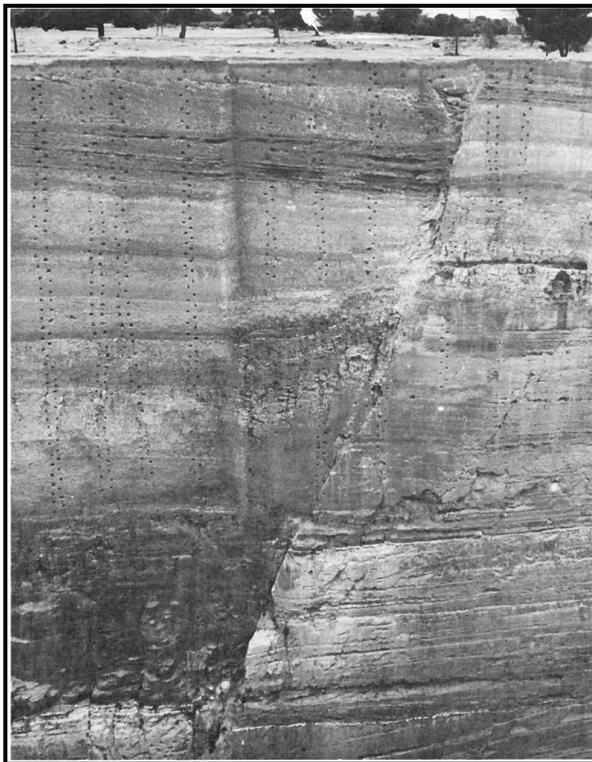


Fig. 1 – Faille dans la tranchée du canal de Corinthe

Sur cette photo prise dans la tranchée du canal de Corinthe, on remarque une **faille perpendiculaire** à la coupe, qui a déplacé les différentes strates. La hauteur de la tranchée est d'environ **70 m** et le rejet global de la faille atteint plus de **10 m**.

Cette image permet de se remémorer les différentes familles de failles reprises dans le schéma suivant : **faille normale**, **faille inverse** et **faille de décrochement** ou à coulissage latérale (fig. 2).

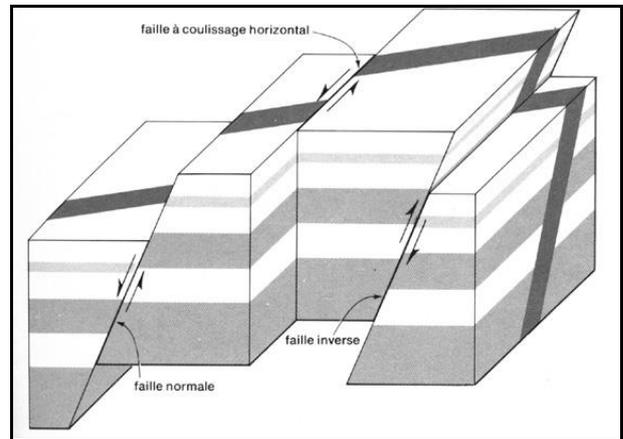


Fig. 2 – Récapitulatif des différentes familles de failles

B. Faille près d'El Asnam – Algérie (Fig. 4)

Ce bel exemple de **faille normale** est le résultat du **séisme de magnitude 7,3**, qui s'est produit **le 10 octobre 1980** près de la ville algérienne de El Asnam. Cette cassure s'étire suivant une direction E – N-E sur **plus de 6 Km** et a un **rejet de plus de 2 m**. Elle n'est pas la seule à s'être produite lors de ce tremblement de terre. La plus importante se développe sur **près de 20 Km** en direction N-E – S-O. Dans ce cas, le rejet des deux compartiments est principalement horizontal, et atteint à certains endroits **près de 2,7 m**. Le schéma de la fig. 3 rappelle succinctement la nomenclature des failles.

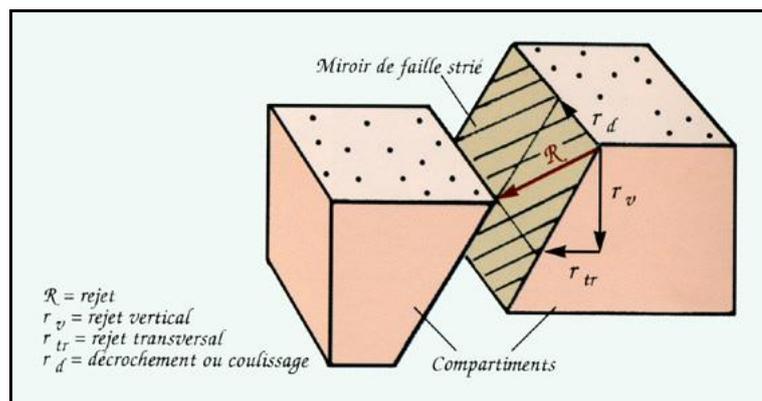


Fig. 3 – Nomenclature d'une faille (schéma M. Mattauer)

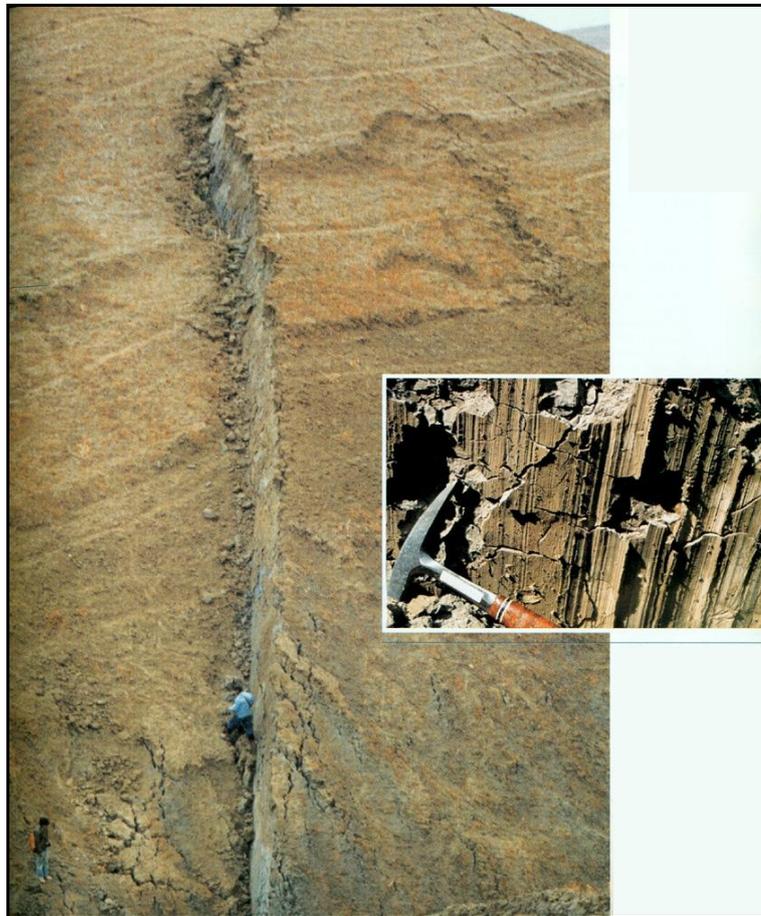


Fig. 4 – Faille normale près d'El Asnam (Algérie) (photo M. MATTAUER)

On peut se poser la question de savoir jusqu'à quelle profondeur une faille principale peut se développer. Les sismologues nous donnent la réponse grâce à leurs instruments. Dans cette situation, ils ont déterminé la profondeur du foyer du séisme, à l'aplomb de l'épicentre. La rupture s'est passée à 10 Km de profondeur et s'est propagée en quelques secondes jusqu'à la surface, tout en s'étendant latéralement. Sur la base des longueurs des failles principales, ils ont pu calculer la surface totale du plan de faille qui est de l'ordre de 300 Km². L'encart de la fig. 4 montre les stries sur le miroir de faille qui matérialisent le déplacement des deux compartiments mais ne donnent pas le sens du déplacement.

On remarque également les éboulis au pied du relief. Le terrain de part et d'autre de la fissure est constitué de marne, roches facilement érodées, ce qui fait que le relief s'émoûssera rapidement et qu'à l'heure actuelle le rejet n'est peut-être plus visible et se limite à un ressaut arrondi.

C. Faille inverse dans la région de Spitak – Arménie (fig. 5)

La fig. 5 montre un relief de faille apparu lors du tremblement de terre de magnitude 6,9 qui a frappé l'Arménie le 7 décembre 1988 (30.000 morts dans la région de Spitak). Nous sommes ici en présence d'une faille inverse dont le plan de faille plonge vers la gauche d'environ 70°. Le rejet vertical est de 1,6 m, tandis que le rejet transversal n'est que de 70 cm. On voit que le compartiment supérieur s'est écroulé en partie. Nous avons affaire ici à une compression qui raccourci la croûte terrestre. Par symétrie, un étirement fera apparaître des failles normales provoquant un allongement de la croûte.



Fig. 5 – Faille inverse dans la région de Spitak (Arménie) (photo M. MATTAUER)

D. Faille inverse ductile dans les Pyrénées (fig. 6)

Nous sommes en présence d'une situation un peu particulière. Ces roches torturées traduisent la présence d'une vieille **faille inverse ductile** qui s'est formée il y a plus de **350 Ma** lors de l'**orogénèse hercynienne** à grande profondeur. L'érosion est responsable de son apparition en surface. Dans un premier temps, l'érosion a arasé les reliefs de la chaîne hercynienne, sans découvrir ses racines. Ensuite, le relief a été recouvert en discordance par des sédiments du **Secondaire**. Puis, la surrection des Pyrénées a provoqué la remontée des roches profondes et l'érosion a repris son travail mettant à nu ces très anciennes roches. En profondeur, les roches ne se rompent pas mais se déforment car elles se trouvent à **15 Km de profondeur** et ont une **température de 400 à 500 °C**. La déformation se traduit de plus par une **schistosité** dont le pendage tend vers l'horizontale à la base de la déformation.

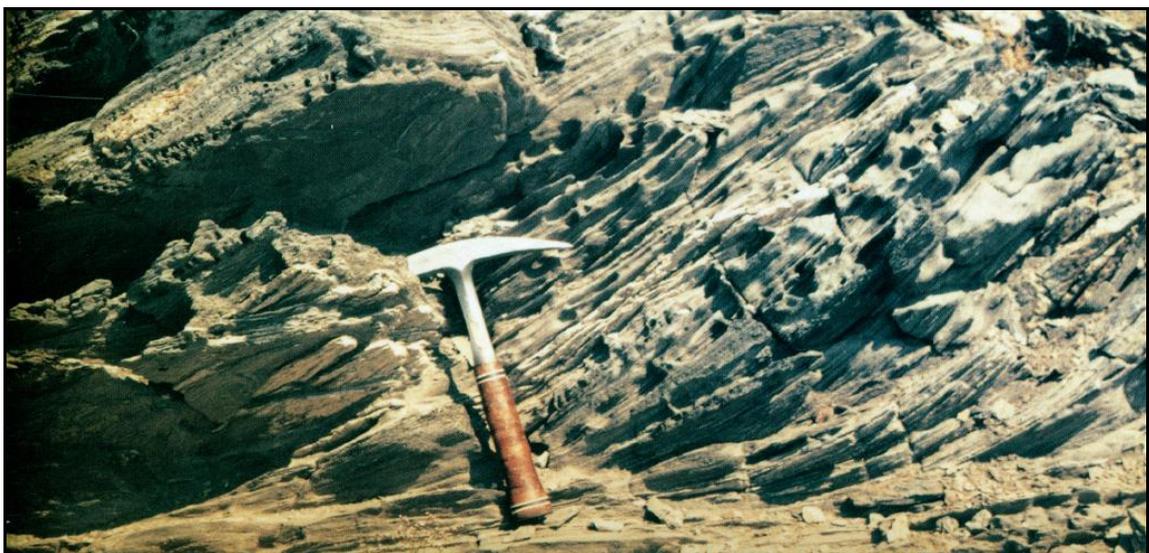


Fig. 6 – Faille inverse ductile dans les Pyrénées (photo M. MATTAUER)

Le schéma suivant (fig. 7) donne l'explication complète de l'allure d'une faille inverse depuis la partie profonde illustrée par la fig. 6 et la zone supérieure traduite dans la fig. 5. La réponse des roches à la compression varie en fonction de la profondeur et de la température. Dans la zone supérieure, relativement froide, les roches se cassent franchement. Au fur et à mesure que l'on s'enfonce, elles deviennent plus malléables et la faille devient ductile. A grande profondeur, (vers 10 Km) une schistosité importante apparaît autour de la faille. Et la déformation ne se fait pas d'une manière saccadée lors des tremblements de terre, comme dans la partie supérieure, mais d'une manière continue.

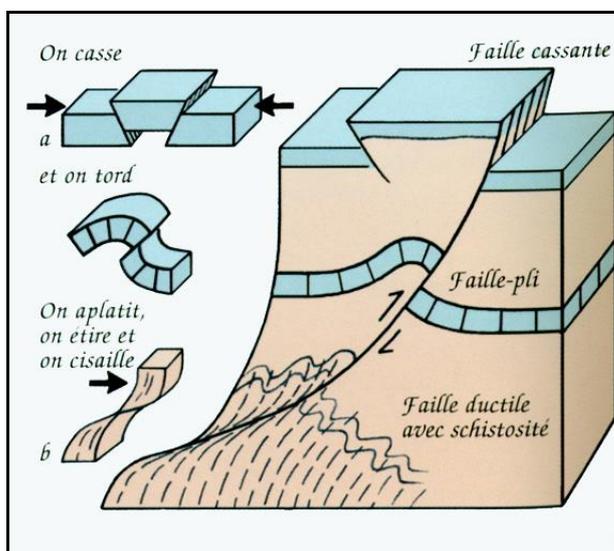


Fig. 7 – Géométrie d'une faille inverse
 En a : allure théorique des failles inverses « conjuguées » (produites en même temps et affectant un même compartiment) et relation avec la direction de la compression ; en b : allure de la déformation dans la partie profonde, ductile, de la faille. (shéma M. MATTAUER)

E. Décrochement au nord de Manille – Philippines (fig. 8)

La photo suivante (fig. 8) montre une route, à 150 Km au nord de Manille, affectée par le séisme du 16 juillet 1990. Nous sommes en présence d'une faille à rejet horizontal, faille de décrochage ou décrochement. La route s'est décalée de 3,60 m dans le sens senestre, puisque la partie arrière s'est déplacée vers la gauche par rapport à la zone avant.

Ce décrochement s'étend sur plus de 120 Km et le rejet maximum observé était de 5,50 m.

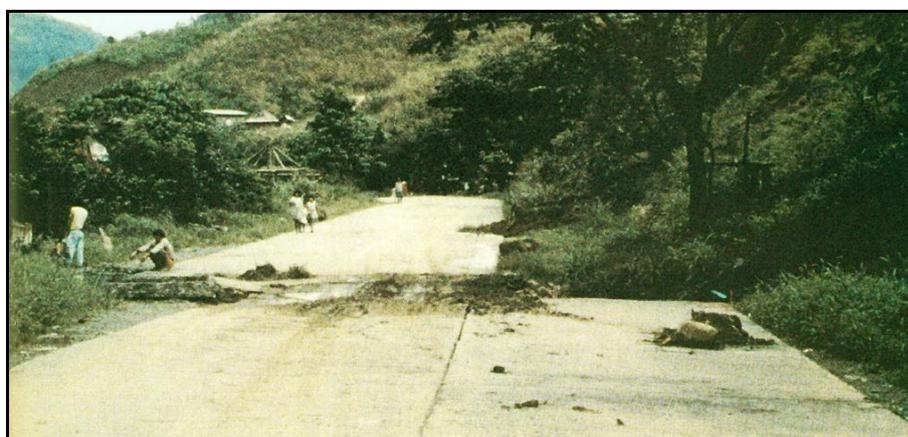


Fig. 8 – Exemple de décrochement senestre (Philippines)

F. Faille vertical dans le Haut-Atlas marocain (fig. 9)

Ici, ce plan de faille a été exposé grâce à l'érosion et il correspond à ancien **décrochement** comme l'indique les stries horizontales que l'on aperçoit dans la coupe. Cette portion a dû, à l'origine, se former à environ **un ou deux kilomètres de profondeur**, où la faille est encore cassante et non ductile. Les roches rouges coupées par la faille de décrochage seraient du **Crétacé inférieur (130 Ma)**, et le **décrochement** serait intervenu **il y a 20 ou 30 Ma**.

A gauche du personnage on peut voir une faille postérieure au décrochement qui a décalé les stries verticalement.

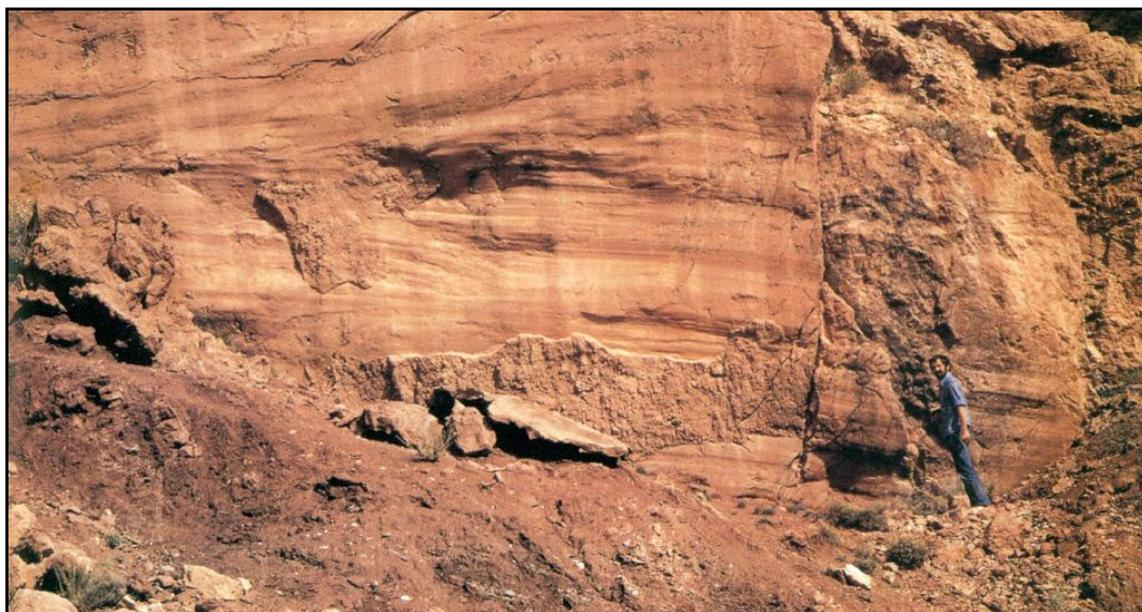


Fig. 9 – Ancien décrochement dans le Haut-Atlas marocain

A nouveau, les schémas suivants (fig. 10) permettent de mieux comprendre la situation sur le terrain. Comme pour les failles inverses, les **décrochements** présentent des allures différentes selon la profondeur. Ils sont **cassants en surface** et deviennent **ductiles en fonction de la profondeur (à partir de 10 Km)**, où les roches s'étirent horizontalement, comme le montre le schéma a. Dans un décrochement ductile, les roches ne sont pas seulement étirées mais elles peuvent changer de nature. Ainsi le granite se transforme en gneiss et les roches sédimentaires en micaschistes.

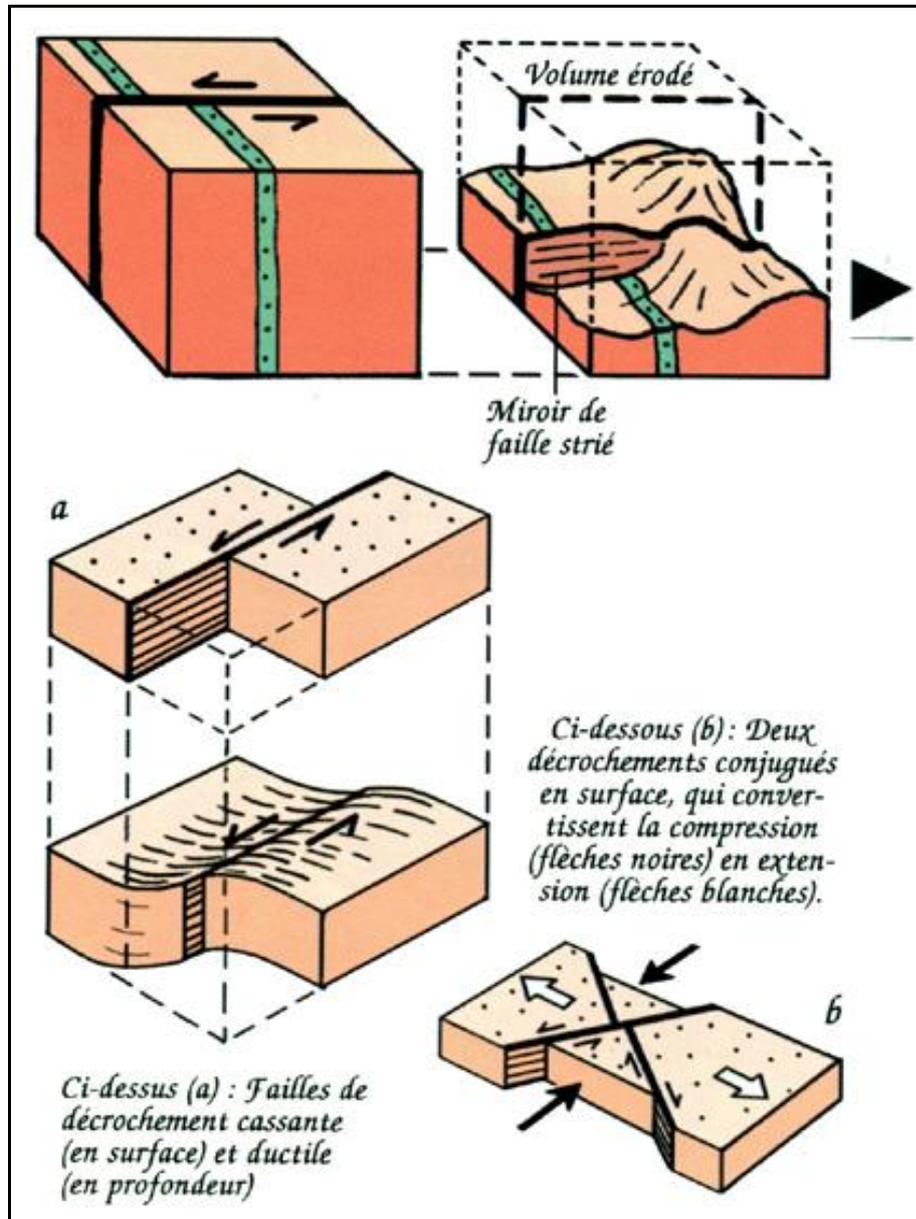


Fig. 10 – Schémas explicatifs des décrochements

Le schéma du haut représente la situation de la figure 9. On y a représenté le volume érodé et le dégagement du miroir de faille qui en découle.

Quant au petit schéma b, il montre ce qui se passe lorsqu'une région est comprimée dans une direction et étirée dans la direction perpendiculaire. Nous sommes dans ce cas en présence de deux décrochements conjugués.

G. Miroir de faille aux environs de Castrovillari en Calabre (fig. 11)



Fig. 11 – Faille normale près de Castrovillari (Calabre)

Cette photo montre le **compartiment droit d'une faille normale**. Le compartiment gauche n'est pas visible ; il affleure plus bas sous la forme de conglomérats récents. Sur ce **miroir de faille** on aperçoit des stries qui suivent à peu près la ligne de plus grande pente. Les roches à l'avant-plan correspondent à une petite écaille restée coincée entre les deux compartiments. Le **rejet total** dans ce cas est de **près de 100 m**.



Fig. 12 – Stries à faible pendage de miroir de faille

La figure 12 nous montre également les **stries d'un miroir de faille**. Mais contrairement à l'image précédente, elles ont un faible pendage. Ceci indique que le **rejet horizontal est plus important que le rejet vertical**. La terminaison

brutale de certaines de ces stries nous permet de conclure que le déplacement du compartiment avant a eu lieu vers la droite. Nous sommes donc en présence d'une faille normale décrochante senestre.

Les deux photos précédentes montrent l'importance de repérer les stries des miroirs de faille pour déterminer le déplacement d'un compartiment par rapport à l'autre. C'est ce que tente de montrer les schémas de la figure 13. En effet, les deux plans de faille ne se distinguent que par leurs stries qui révèlent des directions d'extension différentes.

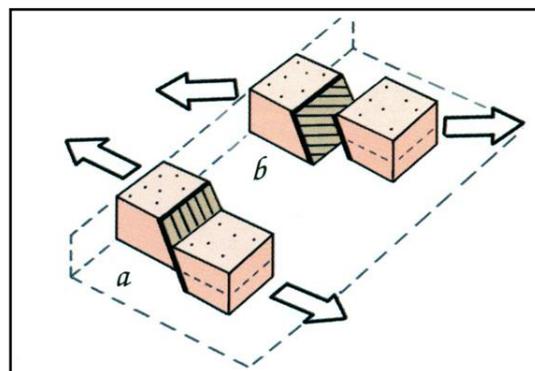


Fig. 13 – Importance des stries de miroir de faille

Comme pour les failles inverses, on peut se poser la question de savoir comment une faille normale réagit en profondeur. Nous sommes en zone d'étirement. En surface, la roche est cassante. A partir d'une dizaine de kilomètres de profondeur, la roche devient ductile et le poids de la roche sus-jacente se conjugue à l'étirement de la croûte.

Il se crée un feuillage horizontal (schistosité), alors que dans les zones de compression, il est plus ou moins perpendiculaire à la faille (voir fig. 7). La figure 14 résume cette situation.

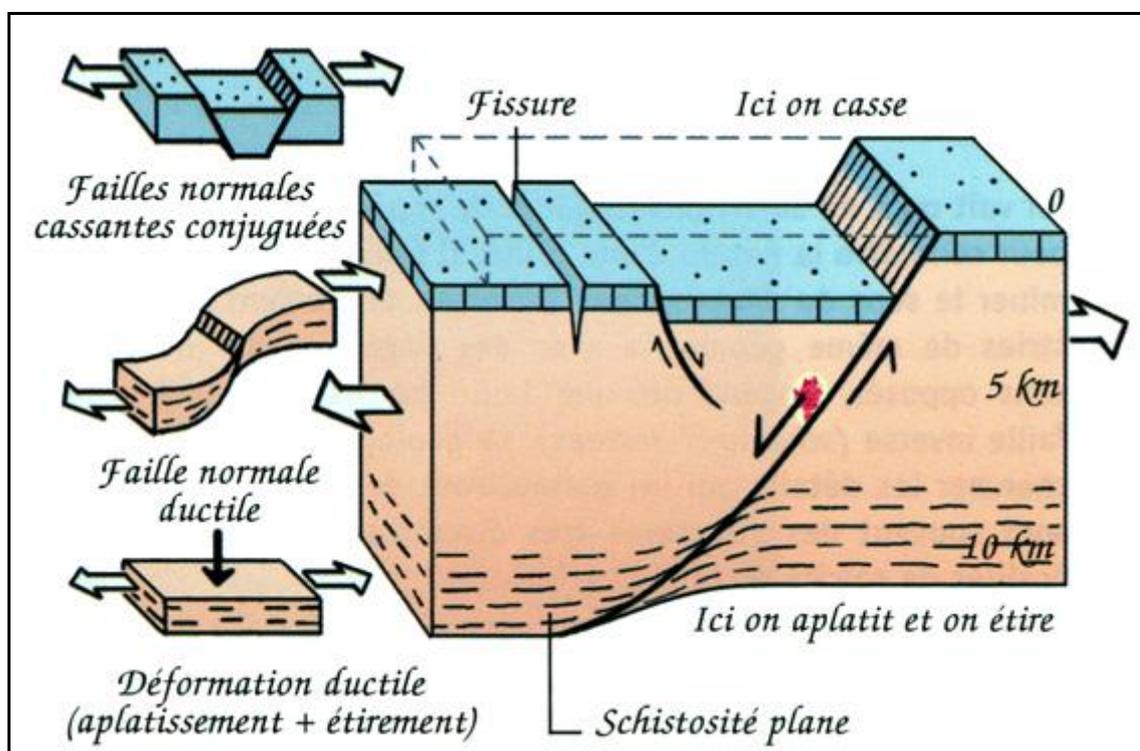


Fig. 14 – Articulation entre les parties cassante et ductile d'une faille normale

H. Miroir de faille dans le Tibet oriental (fig. 15)

Comment réagir devant une surface striée comme celle de la figure 15 ? Dans quel sens a joué la faille ?

Parfois, le repérage des stries ne suffit pas pour déterminer la nature d'une faille. Sur la photo d'une faille coupant des calcaires, dans le Tibet oriental entre Litang et Batang, on remarque perpendiculairement aux stries des **ressauts surmontés de petites plaques de calcite blanche**. Grâce à ces indices, il nous sera possible de dire si nous sommes en présence d'une faille normale ou inverse. Comment se forment ces structures ? La figure 13 nous en donne l'explication. La faille peut localement changer de pendage (schéma a). Lors du déplacement une cavité parallélépipédique s'ouvre. Nous l'avons vu, les roches sont ici des calcaires, donc solubles, aussi les eaux d'infiltration vont-elles y déposer de la calcite dissoute qui cristallise en remplissant la cavité. Si le compartiment supérieur disparaît, on observe une écaille de calcite qui se termine de façon abrupte.



Fig. 15 – Miroir de faille dans le Tibet oriental (photo M. MATTAUER)

Souvent, les failles jouent plusieurs fois et les écailles de calcite finissent par être également striées comme sur le schéma b de la figure 13. La configuration du

palier fait obstacle au déplacement. La surpression qui en résulte favorise la dissolution locale du calcaire et le mouvement continue lentement provoquant des digitations appelées **stylolithes**. Tous ces indices permettent ainsi de déterminer le sens du déplacement.

On peut dire que la **faille** qui nous occupe ici est **inverse** et probablement d'**âge tertiaire**. Les stries se sont vraisemblablement formées à une profondeur de **un à deux kilomètres de profondeur**, car c'est à ces profondeurs que les eaux d'infiltration chaudes et sous pression ont le plus de chance de déposer de la calcite. Le soulèvement général de la région et l'érosion ont amené ce miroir de faille à la surface.

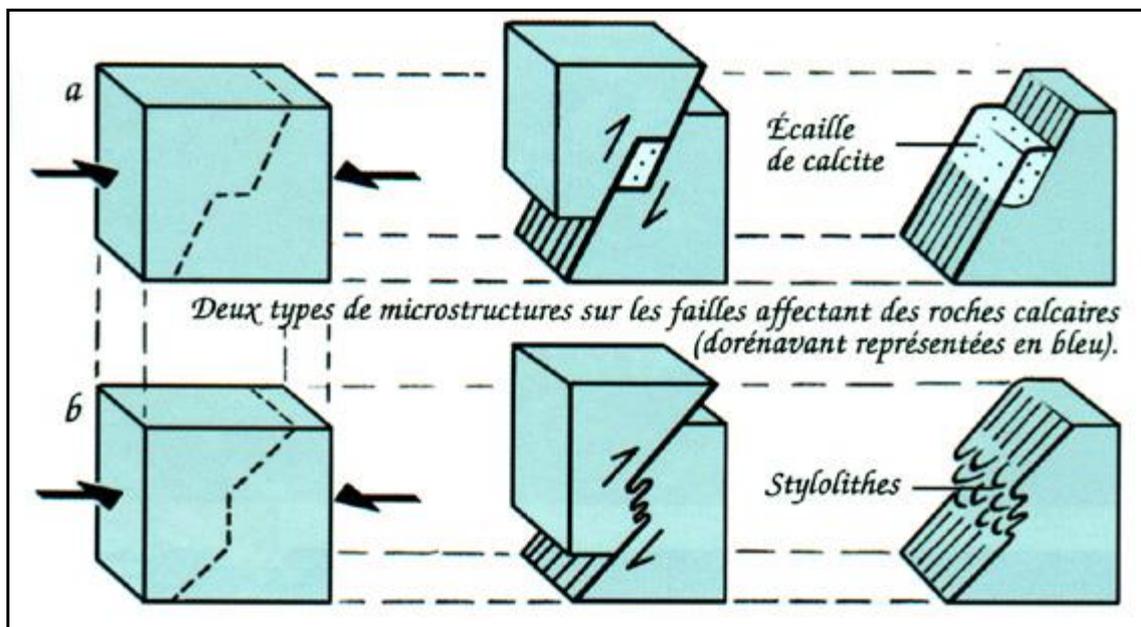


Fig. 16 – Microstructures sur les miroirs de faille (schéma M. MATTAUER)

I. **Stylolithes aux environs de Montpellier** (fig. 17 et 18)

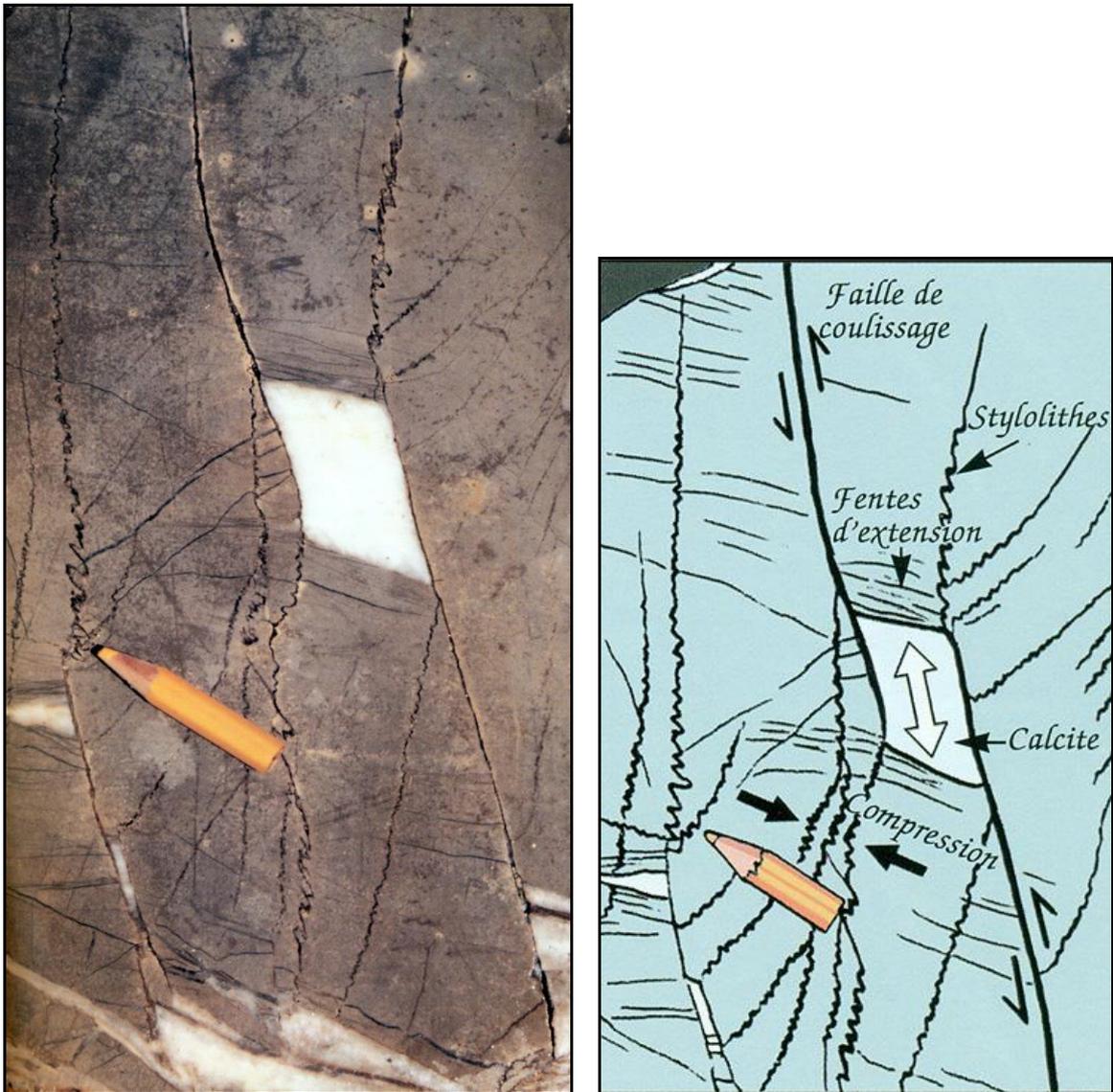


Fig. 17 et 18 – Décrochement dans des calcaires et sa représentation graphique (photo et schéma M. MATTAUER)

Nous sommes ici en présence d'un calcaire marin à grain fin de la région de Montpellier. Il présente des **microstructures de l'ordre du centimètre au décimètre** : **microfailles**, **digitations (stylolithes)**, **fentes**. Le tout est associé à un **losange de calcite** qui correspond à ce que l'on a vu dans l'exemple précédent. Le plan de la photo est horizontal au départ, ce qui correspond à un **décrochement au niveau du losange**. De plus, les sommets des **stylolithes** ont tous la **même orientation** (parallèles au crayon) ; ils donnent la **direction de la contrainte compressive** qui les a produits et fait jouer la faille.

Les calcaires ont **environ 150 Ma (Jurassique)** ; la **compression** à l'origine de ces microstructures date elle d'**environ 60 Ma**, lors de l'**orogénèse des Pyrénées**.

Ce phénomène à l'échelle microscopique peut se reproduire à très grande échelle, au point d'affecter la croûte continentale dans son entier. Un bel exemple est le **fossé d'effondrement de la mer Morte** qui se trouve **à 396 m en dessous du niveau de la Méditerranée** (fig. 19).

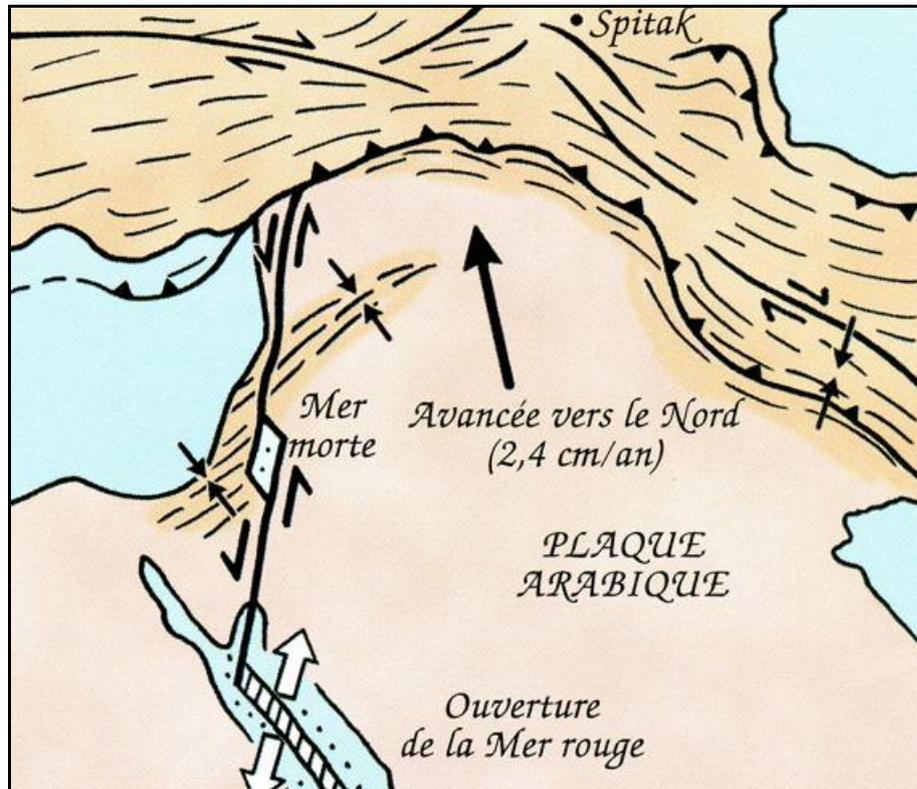


Fig. 19 – Formation du fossé d’effondrement de la mer Morte

Ce fossé qui correspond à notre losange de calcite, et qui se remplit de sédiments, s’est formé il y a **plusieurs millions d’années (20 Ma)** par le jeu de la **grande faille du Levant**, qui va du golfe d’Aquaba, au sud, jusqu’aux contreforts turcs de la chaîne alpine, au nord, et dont le **rejet horizontal senestre** s’étire sur **plus de 100 Km**. Ce **décrochement** est la conséquence de la **poussée de la plaque arabe vers le nord**, lié à l’**ouverture de la mer Rouge**. Il s’inscrit dans la succession des fossés qui constitue la mer Rouge, la dépression de l’Afar et le grand rift africain qui s’étire jusqu’au Mozambique.

J. **Formation du système de failles de San Andreas – Californie** (fig. 20)

Nous allons terminer ce parcours de quelques exemples de dislocations discontinues par l’une des plus célèbres failles : la fameuse **faille de San Andreas** qui traverse toute la Californie. Ce système géologique est le plus connu du grand public et le plus étudié au monde. Il est la conséquence de l’**ouverture de l’Atlantique** qui s’opère **depuis 100 à 150 Ma**. La **poussée de la plaque nord-américaine** vers l’ouest provoque la **subduction de la plaque basaltique du Pacifique**, plus lourde. Au niveau de la Californie, la plaque continentale recouvre, **depuis près de 30 Ma**, la dorsale médio-océanique mettant en place une des **faille décrochante** le plus active du globe : la faille de San Andreas. En fait, il s’agit plutôt d’un système de faille qui s’étend **sur plus de 1.300 Km de long et 140 Km de large** et qui se divise en différents segments qui accumulent une partie des contraintes tectoniques mises en jeu par la subduction. Le **déplacement relatif** des compartiments coulissants est **de 3,4 à 5,5 cm par an**. Chaque année, la région est secoué par **près de 200 séismes de magnitude 3 à 4** sur l’échelle de Richter.

Le système comprend **trois parties indépendantes**, elles mêmes divisées en plusieurs segments. De ce fait, la probabilité qu’un séisme provoque la rupture complète de la faille est très faible. Cela n’empêche que le risque de dégâts très importants est réel et imprévisible.

Les trois sections du système de failles de San Andreas

- La **section nord** s'étend du cap Mendocino, pointe occidentale de la Californie, aux montagnes de Santa Cruz, chaîne côtière de 80 Km au sud de San Francisco. Particulièrement actif au XIX^{ème} siècle, c'est dans cette zone que s'est produit le séisme le plus meurtrier de l'histoire de la Californie, le 18 avril 1906. D'une magnitude de 7,8 sur l'échelle de Richter, il provoque un incendie qui ravagea une grande partie de San Francisco. En plus de la faille de San Andreas, le secteur comporte plusieurs failles parallèles, dont celle de Hayward à l'est de la baie de San Francisco. Après un demi siècle d'accalmie, l'activité sismique a repris légèrement en 1957.



Fig. 21 – Carte de la région montrant les forces de décrochement le long de la faille de San Andreas

Deux séismes d'importance se sont produits, l'un au cap Mendocino en 1980 et l'autre dans les monts de Santa Cruz en 1989. En prenant en compte la récurrence sismique et l'ensemble des failles actives du secteur, c'est la région de la baie de San Francisco qui a la plus forte probabilité (75%) de subir dans les 30 années à venir un séisme d'une magnitude supérieure à 6,5.

- La **section du centre** correspond à un **segment de la faille** qui glisse en « creep », c'est-à-dire de façon régulière sans produire de séismes importants. Elle marque la transition entre les secteurs nord et sud.
- La **section sud** s'étend du segment de Parkfield à la Vallée Impériale. Ce secteur est plus complexe que les deux autres du fait de la formation d'une zone de compression crustale à l'origine des chaînes montagneuses transversales au sud de Los Angeles. Ce secteur connut également un **séisme majeur en 1857**. Du fait des mouvements verticaux qui s'ajoutent au décrochement, la fragilité des failles est plus grande et, par conséquent, les séismes plus fréquents. Au sud, le système comporte à nouveau des failles parallèles dont celle de la Vallée Impériale qui marque la transition avec le golfe de Californie.

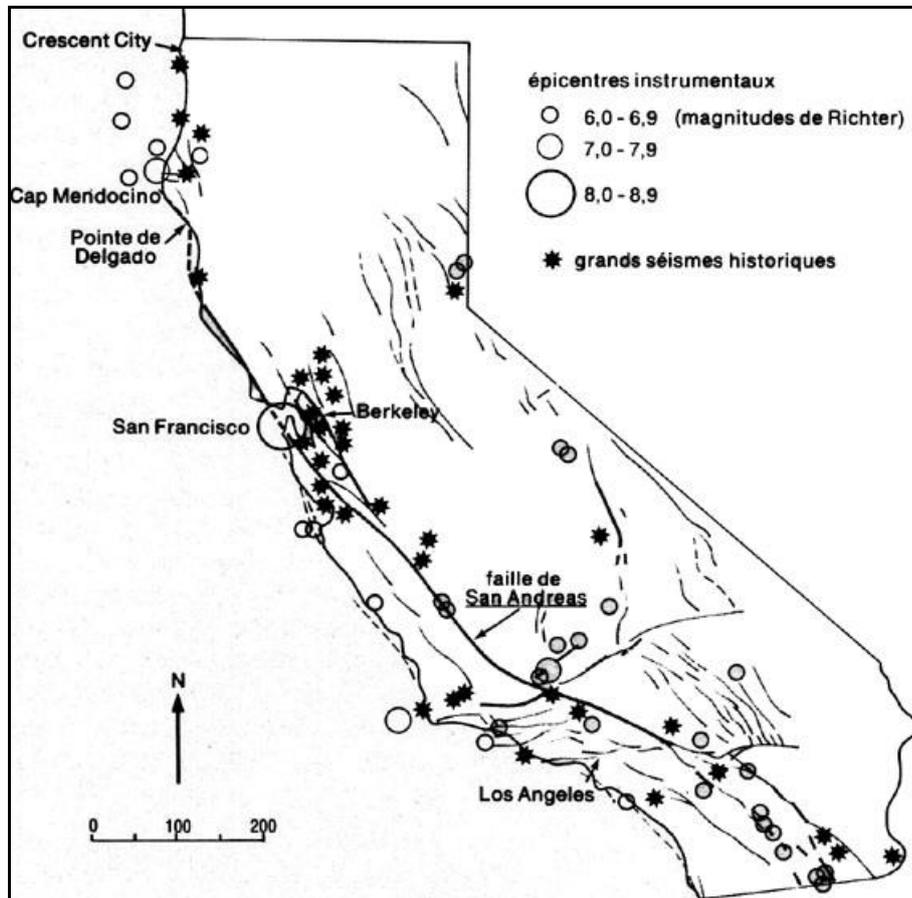


Fig. 22 – Carte montrant les épicentres des principaux séismes historiques en Californie entre 1800 et 1975



Fig. 23 – Un des aspect de la faille San Andreas à travers la plaine de Carrizo

II. BIBLIOGRAPHIE

- ❖ **BOLT B.A.** (1982) – *Les tremblements de terre*, Pour la Science.
- ❖ **FOUCAULT A., RAOULT J.-F.** (1980) – *Dictionnaire de géologie*, Masson.
- ❖ **MATTAUER M.** (1998) – *Ce que disent les pierres*, Pour la Science.



Fig. 24 – Effets de surface après le jeu d'une faille sous-jacente chevauchante lors du séisme de Meckering, le 14 octobre 1968, dans l'ouest de l'Australie