

La déformation des roches

Loïc Labrousse

Professeur à Sorbonne Université

Philippe Yamato

Professeur à l'université de Rennes

Préface de **Laurent Jolivet**

Professeur à Sorbonne Université, membre de
l'Institut universitaire de France

DUNOD



Ressources numériques. Comment y accéder ?

Pour aller plus loin et mettre toutes les chances de votre côté pour réussir l'examen, des compléments sont disponibles sur le site www.dunod.com/EAN/9782100854219.

Connectez-vous à la page de l'ouvrage (grâce aux menus déroulants, ou en saisissant le titre, l'auteur ou l'ISBN dans le champ de recherche de la page d'accueil). Sur la page de l'ouvrage, cliquez sur le logo « Les + en ligne ».



○ Table des matières

Préface de Laurent Jolivet	VIII
----------------------------	------

Avant-propos	X
--------------	---

Partie I

Les marqueurs de la déformation : observation et terminologie

1 Les marqueurs de la déformation « cassante »	1
1. Les failles	1
2. Les fentes de tension et les veines : indices de précipitation	14
3. Les stylolithes : marqueurs de dissolution	17
2 Les marqueurs de la déformation « ductile »	19
1. Schistosité et linéation : les marqueurs des directions de déformation finie	19
2. Le cisaillement dans la déformation ductile	24
3. Les critères de cisaillement	29
4. Les gradients de déformation : indices des mécanismes de localisation de la déformation	35
3 Les déformations « périodiques »	39
1. Les plis	40
2. Les boudins et les mullions	52

Partie II

La mesure de la déformation à toutes les échelles

4 Définir la déformation	56
1. Déformation et déplacement	56
2. Finie, instantanée, incrémentale, vraie... de si nombreuses déformations	59

3.	Du champ de déplacement au champ de déformation	62
4.	Déformation rotationnelle ou coaxiale	77
5.	Des coefficients de la matrice de déformation aux paramètres du tenseur des déformations	81
5	Quantifier la déformation instantanée	84
1.	Les données des séismes	84
2.	Les données de terrain : estimations ponctuelles et complètes	90
3.	Les données de géodésie spatiale	92
4.	Les données d'interférométrie : des estimations régionales mais partielles	97
5.	Les différents types de glissements sur les failles	98
6	Quantifier la déformation long terme	103
1.	Détermination de l'orientation des axes principaux de la déformation	103
2.	Détermination des rapports d'aspects des axes de l'ellipsoïde de la déformation finie	107
3.	Détermination de la part rotationnelle de la déformation	112
7	Quantifier la déformation à l'échelle des minéraux	116
1.	Méthodes de mesure des orientations cristallographiques	117
2.	Quantification des fabriques grâce à l'analyse EBSD	121
3.	Estimation de la déformation finie à l'échelle des agrégats	124
8	Quantifier la vitesse de déformation	127
1.	Définitions et grandeurs utiles	127
2.	La vitesse des déformations court terme	130
3.	Les vitesses de la déformation long terme	132

Partie III

De la déformation aux états de contrainte

9	Définitions et représentation des contraintes	136
	1. Contrainte et état de contraintes	136
	2. Représentation des contraintes : le diagramme de Mohr	144
10	Méthodes et données de rhéologie expérimentale	146
	1. Les différents appareils expérimentaux	146
	2. Les données obtenues	153
	3. Les courbes déformation-contrainte différentielle	156
11	Les comportements mécaniques	159
	1. Déformation réversible et comportement élastique	159
	2. Les comportements associés à la déformation irréversible	163
	3. Le comportement complexe des roches	166

Partie IV

Les processus de déformation des roches

12	Les paramètres de contrôle des résistances des agrégats minéraux	178
	1. Effets de la pression et de la température dans le domaine élastique	179
	2. Effets de la pression et de la température dans le domaine frictionnel	184
	3. Effets de la pression et de la température dans le domaine du fluage	186
	4. Le régime des fluides	188
	5. La taille des grains	190

13	Les mécanismes de déformation à l'échelle de l'agrégat et leurs signatures	192
1.	De la fracturation des agrégats au frottement sur les failles	193
2.	Le comportement plastique : critères et lois de fluage	202
3.	Le fluage-dislocation à haute température et fortes vitesses de déformation	210
4.	Le fluage-diffusion à hautes températures et basses vitesses de déformation	219
5.	La dissolution-précipitation en présence de fluides	222
6.	Cartes de déformation, transitions et comportement des mélanges	224
14	Quantifier les états de contrainte	231
1.	Les minéraux en inclusions gardent une déformation élastique	232
2.	La reconstitution des états de contraintes à partir de la déformation active	238
3.	La reconstitution des tenseurs des contraintes à partir des populations de faille	240
4.	Retrouver l'amplitude de la contrainte différentielle long terme : les paléopiézomètres	243
15	Les transformations des roches au cours de la déformation	248
1.	Les transformations des roches sont contrôlées par la déformation	249
2.	Les transformations modifient la résistance des agrégats	259
3.	Couplages thermo-mécaniques entre déformation et transformation des roches	270

Partie V

De la modélisation de la déformation à la définition mécanique de la lithosphère

16	La modélisation de la déformation des roches	278
1.	Différents types de modèles	278
2.	Conditions initiales et conditions aux limites	282
3.	La modélisation analogique	282
4.	La modélisation numérique	287
17	La dynamique des déformations	296
1.	La dynamique du glissement co-sismique	296
2.	La croissance des failles	303
3.	L'évolution des bandes de cisaillement	303
4.	L'amplification des déformations périodiques	308
18	Les modèles mécaniques de la lithosphère	314
1.	Plusieurs définitions pour la lithosphère	314
2.	La notion d'épaisseur élastique équivalente	316
3.	Les enveloppes rhéologiques de la lithosphère	321
4.	Correspondance entre épaisseur élastique équivalente et enveloppes rhéologiques	327
	Références bibliographiques	332
	Index	338

Préface de Laurent Jolivet

La tectonique aujourd'hui se confond progressivement avec la géodynamique. D'une discipline focalisée sur la description des structures, donc sur la déformation et les déplacements, elle a intégré l'étude des forces gouvernant la formation des chaînes de montagnes ou des océans. Un tectonicien au xxi^{e} siècle se doit de chercher à comprendre le moteur de la tectonique et les interactions entre la convection mantellique, les mouvements des plaques et les déformations des roches qui en résultent. Il doit maîtriser à la fois les techniques d'observations sur le terrain, les méthodes d'analyse fournissant des informations sur l'histoire pression-température des unités tectoniques, ainsi que les processus physiques mis en jeu. Il doit surtout être capable de parler et d'interagir avec ses collègues des autres disciplines que sont la sismologie, la géodésie spatiale, la pétrologie... La tectonique a de tout temps été intégratrice des avancées de ces autres disciplines des sciences de la Terre. Sans stratigraphie, il n'y aurait pas eu de tectonique, pas de découvertes des nappes de charriage à la fin du xix^{e} siècle. Sans géophysique marine, la tectonique des plaques n'aurait pu voir le jour dans les années soixante. Sans déformation expérimentale en laboratoire, on n'aurait pu montrer que les roches se comportent comme des fluides sur les longues durées des temps géologiques et que le manteau est capable de convecter.

Ce nouvel ouvrage de Loïc Labrousse et Philippe Yamato associe avec une pédagogie efficace les différentes facettes du métier d'un tectonicien, des observations sur le terrain à la modélisation numérique et analogique, de la géométrie des structures ductiles et cassantes à la thermodynamique des transformations des roches pendant la déformation. On y trouvera aussi bien des informations de base sur les failles et les structures ductiles que sur l'approche de la déformation à l'aide des séismes et de la géodésie spatiale, ou sur les expériences de déformation à différentes conditions de pression et température en laboratoire, ou encore sur les lois rhéologiques qui servent de base à la modélisation numérique.

Ce livre est donc original dans le paysage actuel des manuels destinés aux étudiants et formateurs et il remplit parfaitement son office. Le texte est rédigé de façon simple et efficace et les figures sont remarquablement didactiques. Les encarts et exercices sont utiles et efficacement présentés pour aller plus loin dans la compréhension des processus physiques à l'œuvre. La grande expérience d'enseignants et de chercheurs des deux auteurs est magnifiquement mise à profit pour nous donner une vision complète de l'approche de la déformation et des

contraintes. On en ressort avec une vue synthétique et simple de l'étude des processus complexes qui régissent le fonctionnement de la lithosphère en tant qu'objet tectonique.

Ce nouveau manuel donnera au lecteur, étudiants et formateurs, toutes les informations nécessaires pour se lancer dans des études de tectonique avec les outils d'aujourd'hui ou pour transmettre à leur tour ce savoir, sans oublier les méthodes traditionnelles. Les nombreuses innovations des dernières décennies dans les méthodes d'analyse des roches et de leurs structures, ainsi que la puissance des ordinateurs et des satellites, ne doivent pas nous faire oublier l'importance d'observations fiables acquises sur le terrain. On a trop souvent tendance à ne privilégier que ce qui est nouveau et à laisser de côté ce qui fait la base de notre travail, l'observation sur le terrain, avec les méthodes des structuralistes ou celles des géophysiciens, la seule source de questions scientifiques de premier ordre. Le grand mérite de ce livre est de tenir les deux extrémités du spectre de très belle façon. Il est, à mon sens, le reflet de ce qu'est devenue aujourd'hui la tectonique et de ce que devrait connaître tout étudiant se lançant dans une carrière de chercheur dans ce domaine complexe si synthétique.

Remerciements

Nous, les auteurs, tenons à remercier nos collègues de Rennes, Paris et d'ailleurs pour les nombreuses discussions sur le terrain ou au labo qui nous ont permis de nous lancer dans l'aventure de l'écriture du présent ouvrage. Merci aussi et peut-être surtout à nos étudiants de tous niveaux, qui de questions en questions nous ont forcés à préciser (et corriger souvent) notre compréhension de la déformation des roches. Citer des noms serait trop long et nous exposerait au risque fatal de l'oubli. Merci aux éditeurs pour leur patience et leurs méticuleuses corrections. Merci à nos familles d'avoir supporté nos efforts au-delà de l'attendu et dans tous les sens du terme, et merci enfin à Laurent Jolivet d'avoir bien voulu préfacier cet ouvrage.

Avant-propos

Cet ouvrage a été pensé pour les étudiants de Licence et Master en Géosciences, mais aussi pour les enseignants à la recherche de supports pédagogiques solides. Il tente de faire le lien entre des notions de géologie structurale et les notions de mécanique des solides, aujourd'hui indispensables à la compréhension du fonctionnement de la tectonique des plaques terrestre. Il commence par une description des objets naturels observables et mesurables sur le terrain, qui permet d'établir la terminologie des structures révélatrices des déformations. Les parties suivantes empruntent à la mécanique des milieux continus pour la formalisation des notions de déformation et de contrainte et aux sciences expérimentales pour la caractérisation des lois de comportement mécanique. Une approche physique permet la détermination des mécanismes de déformation à l'échelle des grains et des agrégats. Enfin, les méthodes de modélisation analogique et numérique sont introduites pour le transfert d'échelle vers celle de la lithosphère, enveloppe de la Terre sur laquelle nous vivons. Quelques considérations nous emmènent vers la sismologie, la géodésie, ou encore la thermodynamique et permettent de placer la tectonique au croisement de toutes ces disciplines.

L'ouvrage s'appuie sur quelques exercices corrigés et de nombreuses illustrations élaborées à partir de scripts Python (accessibles en ligne sur la page de présentation de l'ouvrage sur dunod.com et assortis d'une notice qui précise l'environnement numérique optimal pour leur utilisation) et de données issues d'études de référence, qui sont autant d'exemples concrets de mise en œuvre des méthodes et concepts détaillés dans le texte. Le corps du texte est complété de suppléments en ligne qui développent des aspects plus pointus ou des digressions par rapport à la trame du livre.

Notre objectif ultime est de donner à voir, à la fois des objets naturels, des résultats expérimentaux et des résultats de simulations pour *in fine* appréhender la signification physique des paramètres qui décrivent les comportements mécaniques des roches et en connaître les ordres de grandeur. L'issue du présent ouvrage est la discussion des définitions mécaniques de la lithosphère, qui découlent des propriétés et processus décrits au cours de ses pages. La description exhaustive des structures et des dynamiques des limites de plaques lithosphériques est au-delà des ambitions des auteurs, et nécessiterait un ouvrage dédié du même volume au moins. Une liste de lectures complémentaires est suggérée en fin d'ouvrage dans cette perspective. En espérant éclairer un peu et surtout donner à d'autres le goût que nous avons pour tous ces schémas et calculs simples ou plus complexes qui permettent aux géologues de mesurer le monde.

Les marqueurs de la déformation « cassante »

Introduction

La première partie de cet ouvrage (Chapitres 1 à 3) est consacrée à la description des différentes structures tectoniques qu'il est possible d'observer sur le terrain. Ces structures sont le résultat de la déformation subie par les roches qui n'enregistrent que la partie irréversible ou permanente de la déformation. L'objectif est de poser la terminologie et de définir les grandeurs qui permettent de caractériser ces structures. Dans le chapitre 1 sont présentés les marqueurs de la déformation dite « cassante » : failles, fentes de tension et stylolithes.

Objectifs

- Définir** la terminologie utilisée pour décrire la déformation cassante.
- Identifier** les structures observées sur le terrain.
- Mesurer** les grandeurs caractéristiques relatives à chacune des structures.

Plan

- 1 Les failles
- 2 Les fentes de tension et les veines : indices de précipitation
- 3 Les joints stylolithes : marqueurs de dissolution

1 Les failles

Les failles sont les structures emblématiques de la déformation « cassante ». Elles correspondent, sur le terrain, à des discontinuités (**Figure 1.1**) où la déformation est localisée sur une zone restreinte que l'on assimile le plus souvent à un **plan de faille** (Section 1.3). Celui-ci contient le vecteur glissement, ou de déplacement relatif des deux blocs.

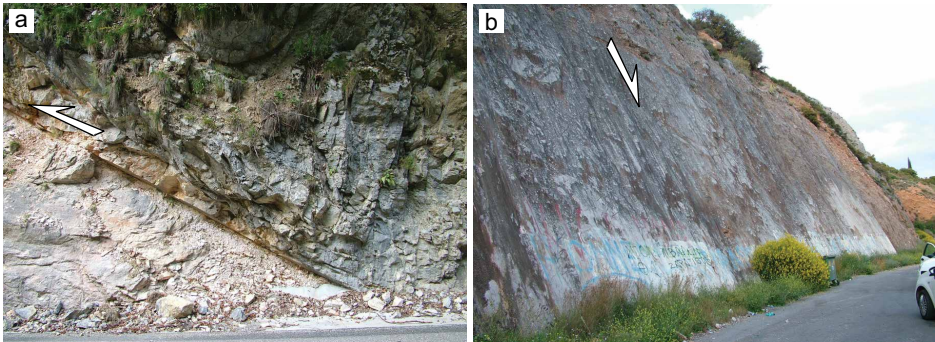


Figure 1.1 – Failles à l’affleurement.

a) Exemple d’une faille inverse (Vercors, France) ; **b)** Miroir de faille normale (Corinthe, Grèce) ; les flèches indiquent le sens de déplacement du toit.

En carte, les failles sont des contacts tectoniques qui sont le plus souvent matérialisés par un trait épais à la différence d’un contact stratigraphique généralement délimité par un trait fin (**Figure 1.2**).

1.1 Terminologie : jeu et rejet d’une faille

Comme tout plan, une faille se caractérise dans l’espace par une **direction** et un **pendage** (cf. Méthode « Détermination de l’orientation et du pendage d’une faille »). Le plan de faille, aussi appelé **miroir de faille** lorsqu’il affleure, délimite donc deux blocs qui se sont déplacés l’un par rapport à l’autre (**Figure 1.3**). Le bloc situé au-dessus du plan de faille est appelé le **toit**. Le bloc situé en dessous constitue le **mur**. L’orientation du vecteur glissement définit le **jeu** de la faille.

Les vecteurs glissements des **failles normales** et **inverses** sont proches de la ligne de plus grande pente du plan de faille (en anglais *dip-slip*). Dans le cas d’une faille normale, le toit descend ; il monte dans le cas d’une faille inverse. Lorsque le vecteur glissement est proche de l’horizontale (*strike-slip* en anglais), on parle de **faille décrochante**. Dans ce cas, deux sens de déplacement sont possibles : si, lorsqu’on se positionne sur l’un des blocs face au plan de faille, le bloc situé de l’autre côté se déplace vers la gauche, on parle de **faille senestre**. En revanche, si le bloc situé de l’autre côté du plan de faille se déplace vers la droite, on parle de **faille dextre**.

Dans le cas où une fracture ne montre pas de déplacement (rejet nul), on parle de **diacalse**. Il est à noter que les failles normales néoformées sont à fort pendage ($\sim 60^\circ$), alors que les failles inverses présentent un faible pendage ($\sim 30^\circ$). La signification de cette caractéristique sera discutée ultérieurement (cf. Section 1.3 du Chapitre 13)

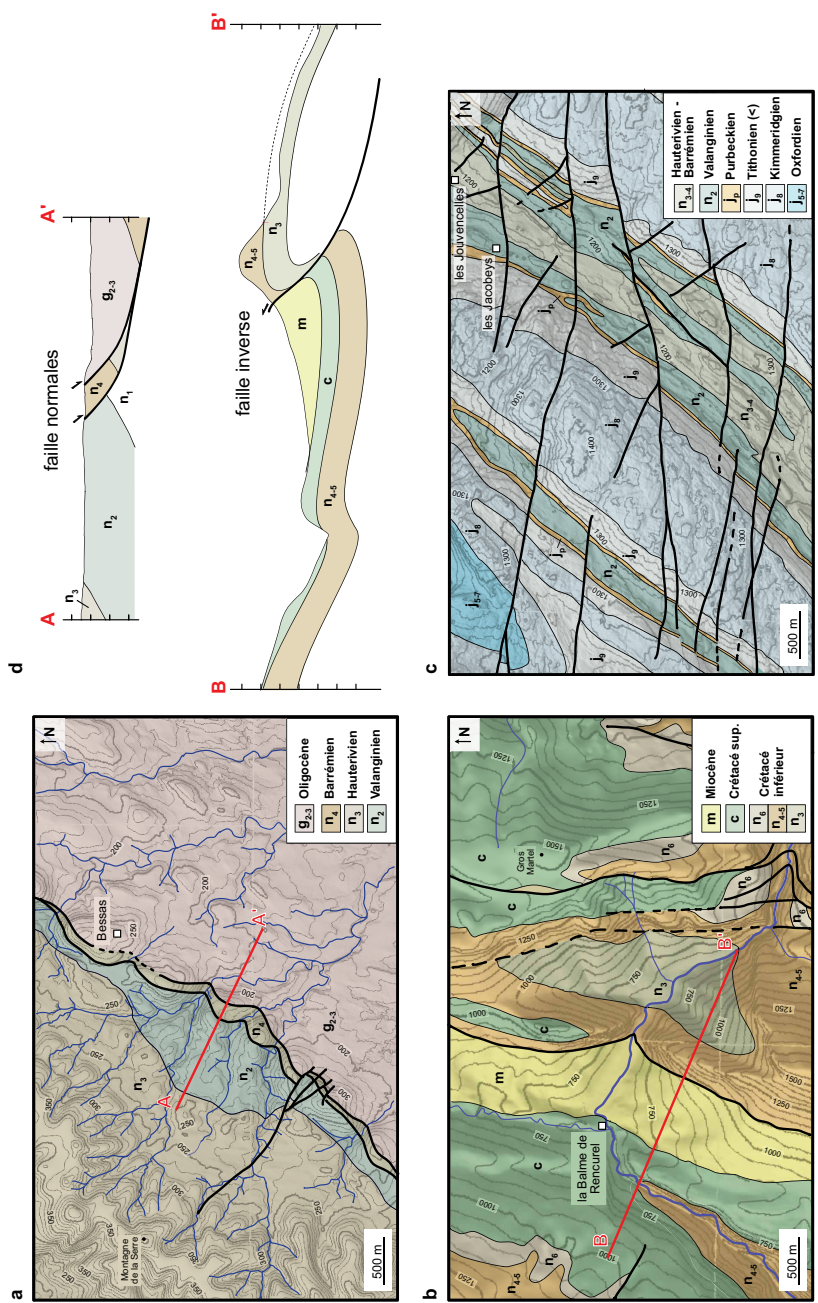


Figure 1.2 – Les différents types de failles en carte.

a) Faille normale (Mas de la Rude à Vallon-Pont-d'Arc) ; **b)** Faille inverse (La Balme de Rencurel) ; **c)** Faille décrochante (Jura, entre Lamoura et Prémanon) ; **d)** Coupes A-A' passant par des failles normales (cf. **a**) et B-B' passant par une faille inverse (cf. **b**) ; Données topographiques issues de RGE ALT® à 5 m de l'IGN et Géologie simplifiée d'après les cartes BRGM.

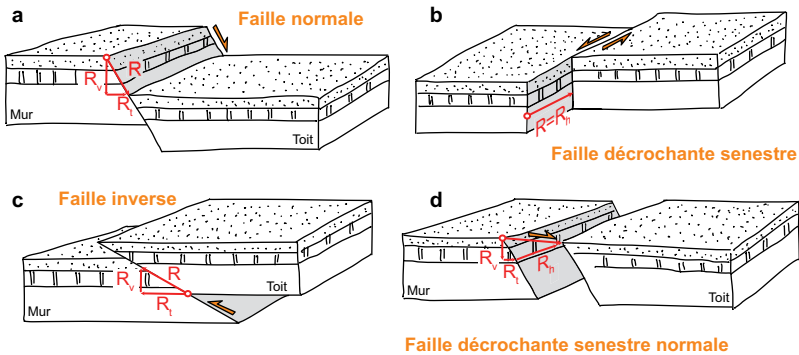


Figure 1.3 – Terminologie des failles.

- a) Schéma d'une faille normale. Le toit est descendu par rapport au mur. Le rejet de la faille correspond à la somme du rejet vertical (R_v) et du rejet transversal (R_t).
- b) Schéma d'une faille décrochante senestre. Le rejet de la faille est ici uniquement horizontal (R_h).
- c) Schéma d'une faille inverse. Le toit est monté par rapport au mur.
- d) Schéma d'un cas composite où le rejet est décomposé selon les trois composantes R_v , R_h et R_t ; Le miroir de faille est présenté pour chacun des cas en grisé.

MÉTHODE : DÉTERMINATION DE L'ORIENTATION ET DU PENDAGE D'UNE FAILLE

Définition

Comme tout plan dans l'espace, une faille se caractérise par une orientation et un pendage :

- la **direction** correspond à l'angle entre le nord et la droite horizontale contenue dans le plan que l'on cherche à mesurer. Dans la convention française, cet angle est donné entre 0° et 180° (des directions de 210° ou 30° sont alors équivalentes) ;
- le **pendage** correspond à l'angle entre l'horizontale et la ligne de plus grande pente du plan. Cet angle varie entre 0° (pour un plan horizontal) et 90° (pour un plan vertical).

Dans la convention française, il est en outre nécessaire de préciser la **direction de pendage**. En effet, un plan de direction nord-sud peut pendre soit vers l'ouest, soit vers l'est pour un pendage donné. Seule l'indication d'une direction de pendage permet de caractériser le bon plan sans ambiguïté. Un plan se définit donc comme suit : N [direction entre 0 et 180°] [pendage entre 0 et 90°] [direction de pendage] ; par exemple : N 030° 60° SE.

Il est à noter que deux autres conventions (qui ne requièrent pas de direction de pendage) existent :

- direction et pendage avec règle de la main droite (*right hand rule* en anglais), utilisée en Amérique du Nord : la direction de plan est alors donnée entre 0° et 360° avec le plan pendant vers la droite ;
- on peut aussi mesurer le pendage et la direction de la ligne de plus grande pente, donnée aussi entre 0° et 360° .

Détermination sur le terrain : en utilisant la boussole (Figure 1.4)

La mesure de la direction se fait en positionnant la boussole à l'**horizontale contre le plan** dont on cherche à mesurer l'orientation (pour cela, il est possible de s'aider d'un niveau à bulle). La mesure du pendage se fait en venant poser le clinomètre dans le plan vertical et sur le plan **le long de sa plus grande pente**.

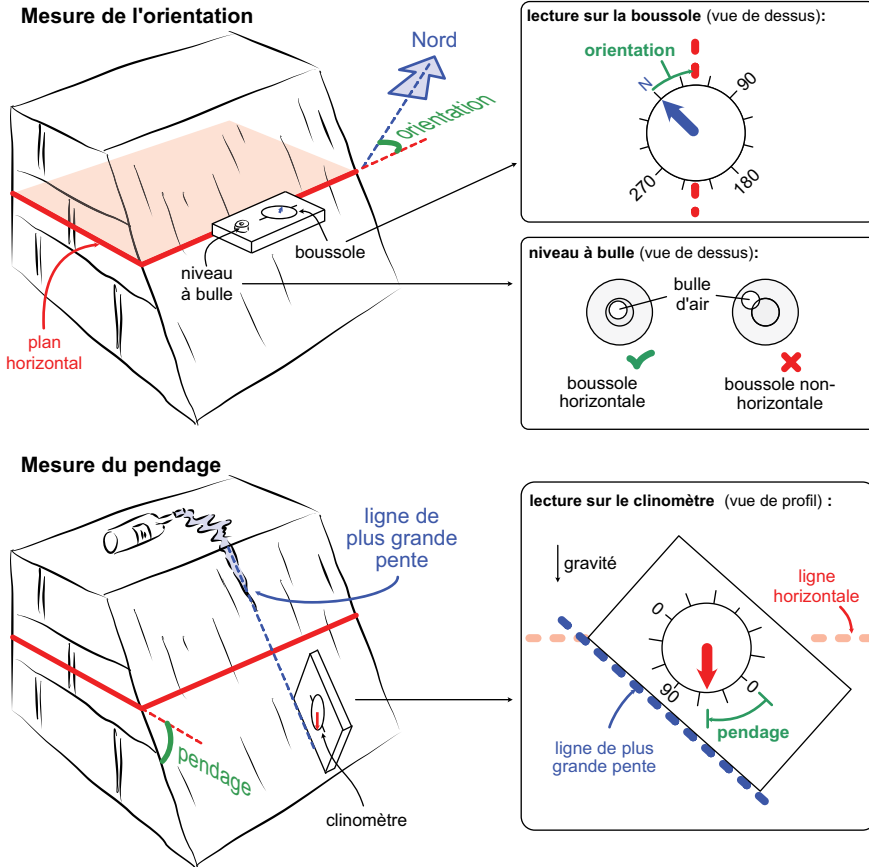


Figure 1.4 – Mesure de la direction et du pendage d'un plan à l'aide d'une boussole.

Détermination en carte : la méthode du « V » dans la vallée (Figure 1.5)

La trace d'une faille en carte, comme de tout autre plan, est la courbe à l'intersection de ce plan et de la surface topographique. Les courbes de niveau sont les intersections de plans horizontaux successifs avec cette topographie ; un plan horizontal (P1) a donc une trace qui suit ces courbes de niveau. Une vue en carte est une projection dans le plan horizontal, la trace d'un plan vertical est donc une droite dont l'angle avec le nord est directement la direction de ce plan (P2). Pour les plans présentant

un pendage intermédiaire, la construction de la trace du plan peut se faire à partir des intersections successives de ce plan avec les courbes de niveau, dans une vallée par exemple. La droite qui relie deux points d'intersection i_1 et i_2 entre la faille et une courbe de niveau donnée est horizontale et appartient au plan, son angle avec le nord est donc la direction du plan. La droite ($i_3 - i_4$) dessinée à la courbe de niveau suivante est parallèle à ($i_1 - i_2$), et leur écartement (d) en carte permet de déduire le pendage du plan (p) si on connaît l'équidistance (e) entre les courbes de niveau. Les plans à fort pendage (P4) dessinent donc un V très ouvert dans les vallées ; les plans à faible pendage dessinent un V plus marqué, proche de celui que dessinent les courbes de niveau. La pointe du V indique la direction de pendage. Les pendages et directions des failles n'étant pas précisés sur les cartes, ils sont rendus par ce tracé par les cartographes, et doivent donc se déduire à la lecture. L'utilisation des indices d'âges des formations de part et d'autre permet ensuite d'attribuer un jeu à la faille. L'amplitude de décalages de marqueurs permet en de rares occasions d'évaluer le rejet apparent (r_a) de la faille.

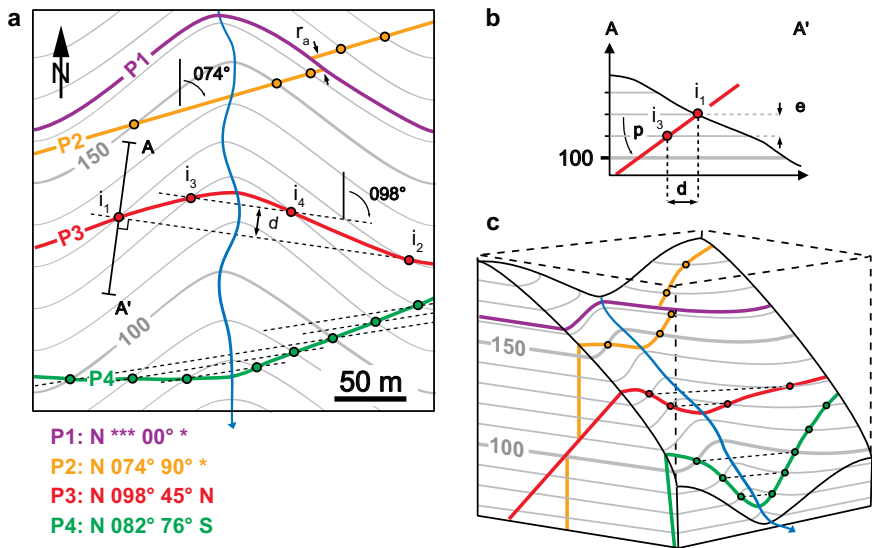


Figure 1.5 – Représentation des plans de faille (a) En carte (b) en coupe et (c) en 3D.

1.2 Miroir, cannelures et stries : les critères de détermination du jeu

Même si on assimile généralement le miroir de faille à un plan, celui-ci présente en réalité toujours une rugosité. Lors du glissement entre les blocs, des structures particulières (parfois aussi appelées « tectoglyphes ») se développent sur le plan de faille lui-même. Ces structures permettent de déterminer *a posteriori* comment une faille a joué. Parmi ces structures (Figure 1.6), on peut trouver les **stries** et les **rayures** dont les

longueurs et les largeurs varient en fonction de l'intensité de la déformation. Lorsque ces structures sont plus longues, on parle respectivement de **cannelures** et de **rainures**. Les alignements formés par ces structures indiquent la direction de jeu de la faille.

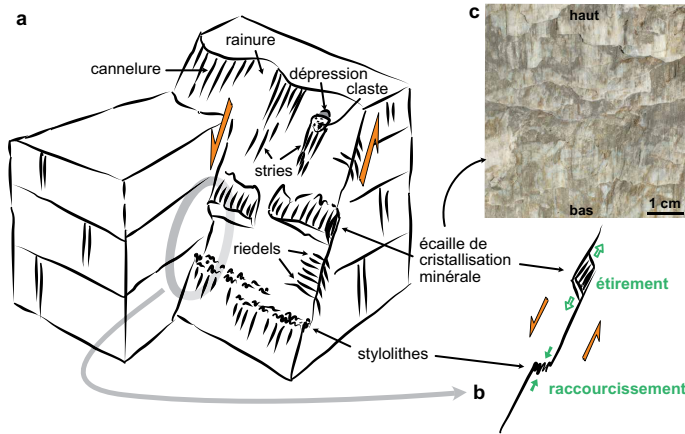


Figure 1.6 – Critères d'établissement du jeu d'une faille.

a) Bloc-diagramme illustrant les structures qui permettent de donner un sens de glissement dans le cas d'une faille normale. **b)** Schéma en coupe précisant la déformation associée aux écaïlles de calcite et aux stylolithes. **c)** Écaïlles de calcite sur un miroir de faille ; celles-ci indiquent que le toit (aujourd'hui dégagé) est descendu par rapport au mur photographié. La faille est donc normale.

Afin de déterminer un sens, d'autres critères peuvent être utilisés. Un claste plus résistant que la roche environnante peut creuser une dépression dans le plan. Derrière l'objet résistant, en revanche, la zone protégée forme un relief orienté dans le sens de glissement de la faille.

Deux autres structures sont particulièrement utiles pour retrouver le sens de glissement d'une faille :

- les **écaïlles de cristallisation**, le plus souvent de calcite, correspondent à des remplissages d'espaces créés lors du jeu de la faille. Ces zones sont le lieu de circulations de fluides qui permettent la croissance progressive de cristaux fibreux au gré des glissements successifs (**Figure 1.6b**). La « marche d'escalier » asymétrique formée par ces fibres permet *a posteriori* de retrouver le sens du glissement ;
- les **stylolithes** correspondent à des zones de dissolution localisée sous l'effet des contraintes subies par les roches (cf. Section 1.3). De telles zones de dissolution peuvent se développer sur un plan de faille et constituent alors un critère d'établissement du jeu de cette faille.