

## TP/TD : DYNAMIQUE DES FAILLES : DÉTERMINATION DE LA RELATION DES FAILLES AVEC LES DIRECTIONS DES CONTRAINTES

1. L'interprétation dynamique des failles : Le modèle d'Anderson (TP/TD 4 &5)
2. Détermination de l'orientation des contraintes dans les systèmes de failles, (TP/TD 4 &5)
3. Interprétation des orientations des failles à partir des directions de contraintes (TP/TD 6)
4. Cas où une ou plusieurs des directions de contraintes principales sont inclinées (TP/TD 7)

### TP/TD 4 & 5

Les interprétations dynamiques les plus simples des déformations cassantes naturelles reposent sur l'hypothèse que celles-ci s'initient dans un milieu homogène, isotrope (déformation non rotationnelle), non affecté de fractures préexistantes, et que **les critères de rupture rendent compte de la géométrie des failles, des joints de cisaillement et des fentes de tension.**

#### 1. L'interprétation dynamique des failles, le modèle d'Anderson (1951) :

Anderson (1905 et 1951) a suggéré que les failles pouvaient être interprétées par un modèle mécanique simple de rupture par cisaillement (Fig. 1).

On peut avoir 6 systèmes de failles possibles, conjuguées deux par deux (figure 1) :

- Si dans le plan horizontal il y a ajout de **contraintes tectoniques compressives** ( $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ), plus fortes suivant une direction ( $S_{xx}$ ),  **$\sigma_1$  et  $\sigma_2$  sont dans le plan horizontal et  $\sigma_3$  est vertical** (Fig. 1 a). À la rupture, il se formera **deux plans de cisaillement conjugués qui correspondent à des failles inverses** ayant **pour intersection l'axe  $\sigma_2$**  et inclinées d'environ  **$30^\circ$**  sur le plan horizontal.

- Si dans le plan horizontal, il y a ajout de **contraintes extensives** ( $S_{xx}$ ,  $S_{yy}$ ) plus fortes suivant une direction ( $S_{xx}$ ),  **$\sigma_3$  et  $\sigma_2$  sont dans le plan horizontal et  $\sigma_1$  est vertical** (Fig. 1 b). À la rupture il se formera **deux plans de cisaillement conjugués qui correspondent à des failles normales** inclinées de  **$60^\circ$**  sur le plan horizontal.

- Si dans le plan horizontal il y a ajout d'**une contrainte compressive** suivant une direction ( $S_{yy}$ ) et extensive suivant la direction ( $S_{xx}$ ) orthogonale à la précédente,  **$\sigma_1$  et  $\sigma_3$  sont dans le plan horizontal et  $\sigma_2$  est vertical** (Fig. 1 c). À la rupture il se formera des **failles verticales décrochantes conjuguées, dextres et senestres.**

Ainsi si l'on mesure sur le terrain la direction et le pendage de failles conjuguées, on peut par construction stéréographique déterminer les directions de contraintes principales en utilisant le modèle d'Anderson (Fig. 1).

**L'intersection** des plans de failles F1 et F2 donne la direction  **$\sigma_2$**  ; le plan orthogonal à  **$\sigma_2$**  est le plan ( **$\sigma_1$ ,  $\sigma_3$** ),  **$\sigma_1$  est la bissectrice de l'angle aigu** formé par les plans de failles,  **$\sigma_3$  est la bissectrice de l'angle obtus.**

Toutefois, il faut toujours garder en mémoire que **l'utilisation de ce modèle** admet implicitement (ou sous-entend) (1) que les failles sont conjuguées (elles se sont formées en même temps), (2) qu'elles n'ont pas subi de rotation interne telle que le dièdre  $2\theta$  initialement

aigu soit devenu obtus. En vérité, comme la croûte continentale garde en héritage les failles formées au cours du temps, on est rarement assuré que des failles soient conjuguées ce qui en pratique **limite considérablement l'intérêt de la méthode d'Anderson**. En tout cas, la condition nécessaire mais non suffisante à l'utilisation de cette méthode est de s'assurer que les **vecteurs glissements S1 et S2** sont contenus dans le plan orthogonal à l'intersection des plans de failles (Fig. 1, voir projections stéréographiques).

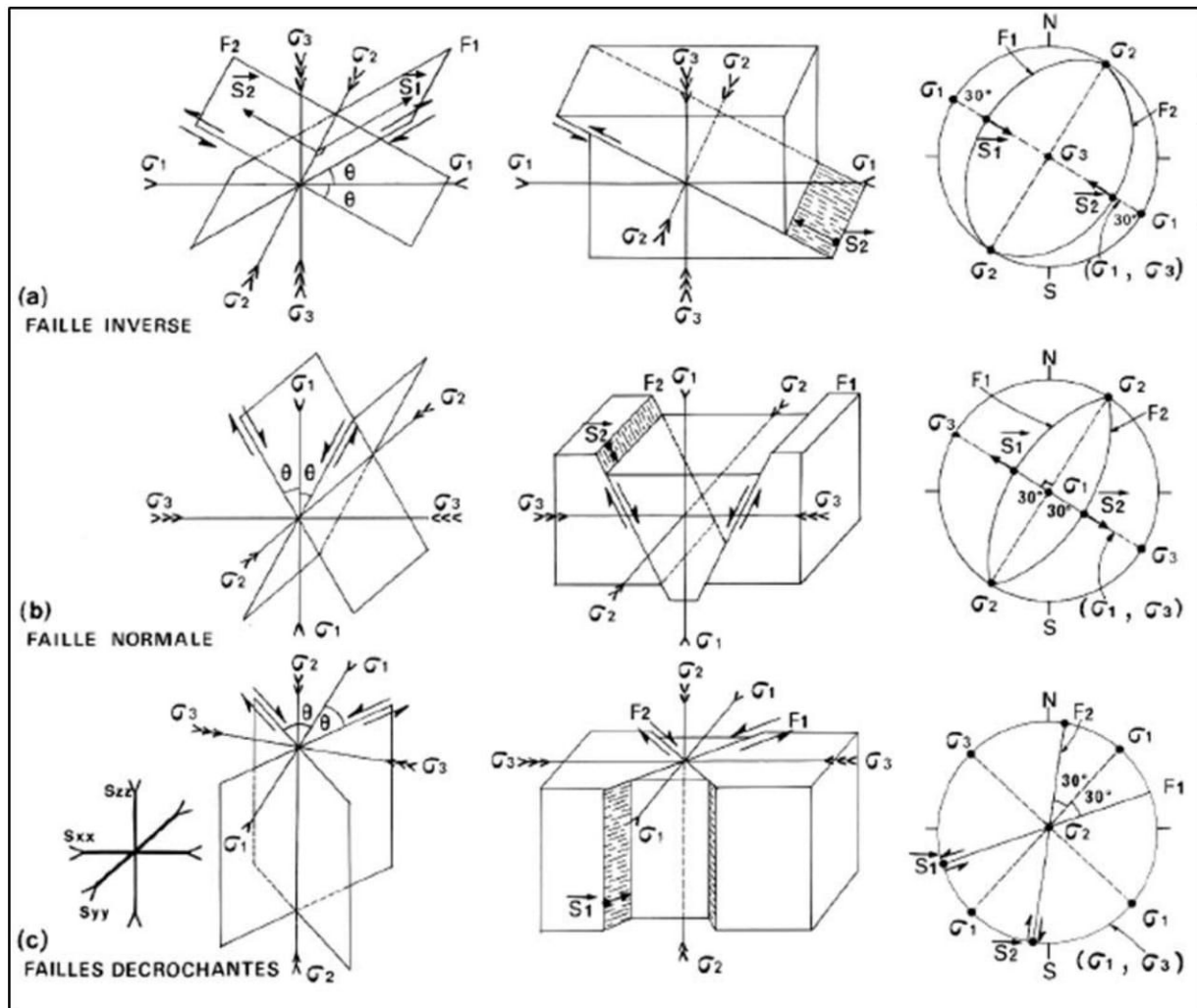


Figure 1 : Interprétation dynamique des failles par le modèle d'Anderson avec leur représentation stéréographique (projection sur l'hémisphère inférieur). Faille inverse :  $\sigma_3$  verticale, Faille normale :  $\sigma_1$  verticale, et Décrochement :  $\sigma_2$  verticale

**Peu importe le type de faille, les quatre relations suivantes tiennent toujours pour un régime de déformation fragile.**

- 1) l'orientation de  $\sigma_2$  est parallèle à l'intersection entre deux failles conjuguées (figure 1), et nécessairement compris sur chacun des plans de faille, à 90 de la direction du mouvement ;
- 2)  $\sigma_1$  est la bissectrice de l'angle aigu formé par deux failles conjuguées (figure 1) et correspond au pôle du plan ( $\sigma_2 \sigma_3$ ) ;



- 3) la direction de glissement **S** sur le plan de faille est parallèle à l'intersection entre le plan de faille et le plan  $\sigma_1/\sigma_3$  (figure 1), et correspond à l'**orientation des stries** sur un plan de faille ;
- 4) le sens du mouvement sur la faille est contrôlé par la direction de la contrainte principale maximale  $\sigma_1$ , de sorte que le biseau de matériel limité par les failles et situé dans l'angle aigu, s'éloigne de  $\sigma_1$  (figure 1).

## 2. Détermination de l'orientation des contraintes dans les systèmes de failles (utilisation des failles pour l'interprétation des contraintes)

Au cours d'une analyse structurale orientée sur le terrain (dont les mesures ont été prises sur le terrain), *supposons que nous voulions interpréter les directions des contraintes principales sur la base des orientations de deux failles conjuguées.*

La détermination de l'orientation des contraintes dans des systèmes de failles conjuguées obéit donc à certaines règles :

- L'intersection de deux (02) familles de failles conjuguées définit l'orientation de  $\sigma_2$
- L'angle aigu entre deux failles conjuguées correspond à l'angle  $2\theta$  (angle de rupture) et admet  $\sigma_1$  comme bissectrice ;
- La **direction de glissement** est définie par l'intersection du plan de faille et du plan ( $\sigma_1/\sigma_3$ )

### ➤ Procédure :

Lorsqu'il s'agit de déterminer les orientations des contraintes principales dans un système de failles conjuguées, on procède comme suit :

- Projeter sur le stéréogramme les plans de failles, l'intersection entre les plans de failles détermine automatiquement  $\sigma_2$  ;
- Tracer le grand cercle dont  $\sigma_2$  est le pôle. Ce grand cercle correspond au plan ( $\sigma_1 \sigma_3$ ). L'intersection de ce plan avec les plans de failles donne les directions de glissement. La bissectrice de l'angle aigu des directions de glissement sur le plan ( $\sigma_1 \sigma_3$ ) permet de déterminer  $\sigma_1$ .  $\sigma_3$  se situe sur le plan ( $\sigma_1 \sigma_3$ ) à  $90^\circ$  de  $\sigma_1$  ;
- L'angle de rupture (ou de cisaillement) entre les directions de glissement et  $\sigma_1$  est l'angle  $2\theta$
- L'angle de frottement interne (ou de friction interne) est l'angle  $\zeta = 90^\circ - 2\theta$

### ➤ Applications :

Soient deux failles inverses conjuguées : F1 : N30 30°NW, F2 : N30 30°SE (figures 2 et 3). Déterminer les relations de ces failles avec les directions des contraintes.

- Projection sur le stéréogramme les plans de failles. Ces failles conjuguées F1 : N30 30°NW et F2 : N30 30°SE sont inverses donc la contrainte principale minimale  $\sigma_3$  est verticale
- L'intersection de ces plans de failles F1 et F2 détermine  $\sigma_2$
- Le grand cercle dont  $\sigma_2$  est le pôle correspond au plan ( $\sigma_1/\sigma_3$ ).
- Le plan  $\sigma_1/\sigma_3$  a pour attitudes N120 90
- L'intersection de ce plan avec les plans de failles F1 et F2 donne respectivement les directions de glissement S1 et S2 : S1 : 300 30° et S2 : 120 30°
- La bissectrice de l'angle aigu des directions de glissement sur le plan ( $\sigma_1/\sigma_3$ ) permet de déterminer  $\sigma_1$ ,  $\sigma_1$  : N120 0°
- $\sigma_3$  se situe sur le plan ( $\sigma_1/\sigma_3$ ) à 90° de  $\sigma_1$  ;  $\sigma_3$  est verticale

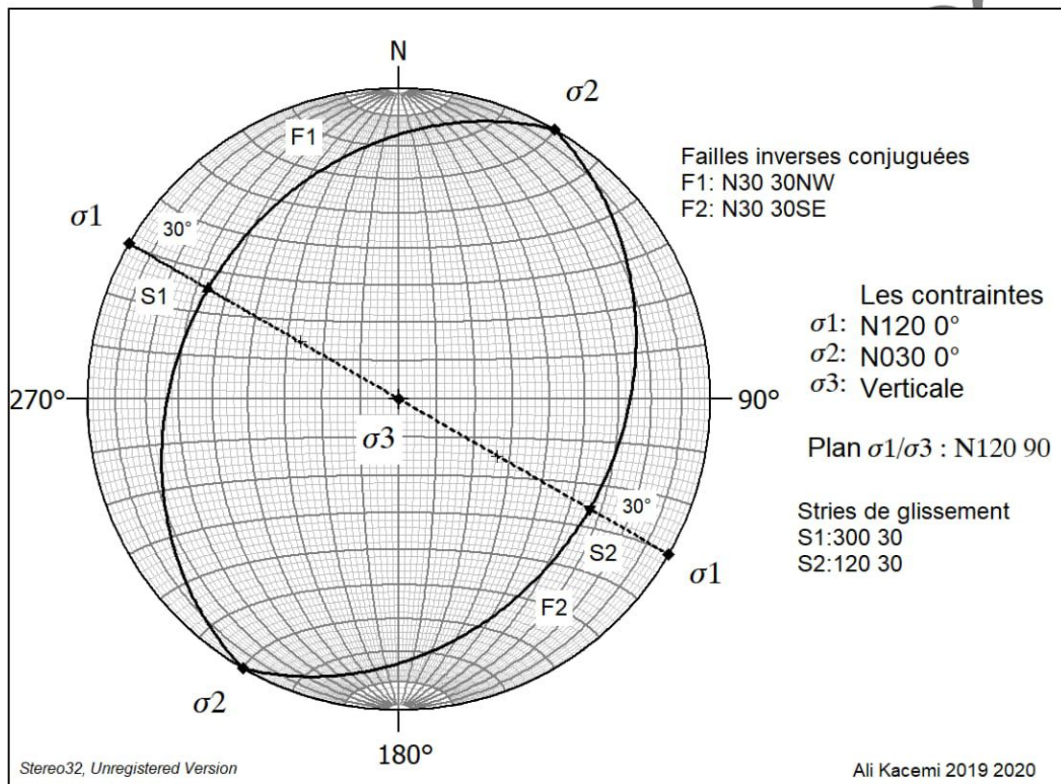


Fig. 2 : Projection stéréographique des failles inverses conjuguées F1 et F2 et les différentes relations de ces failles avec les directions des contraintes (Canevas de Schmidt hémisphère inférieur)

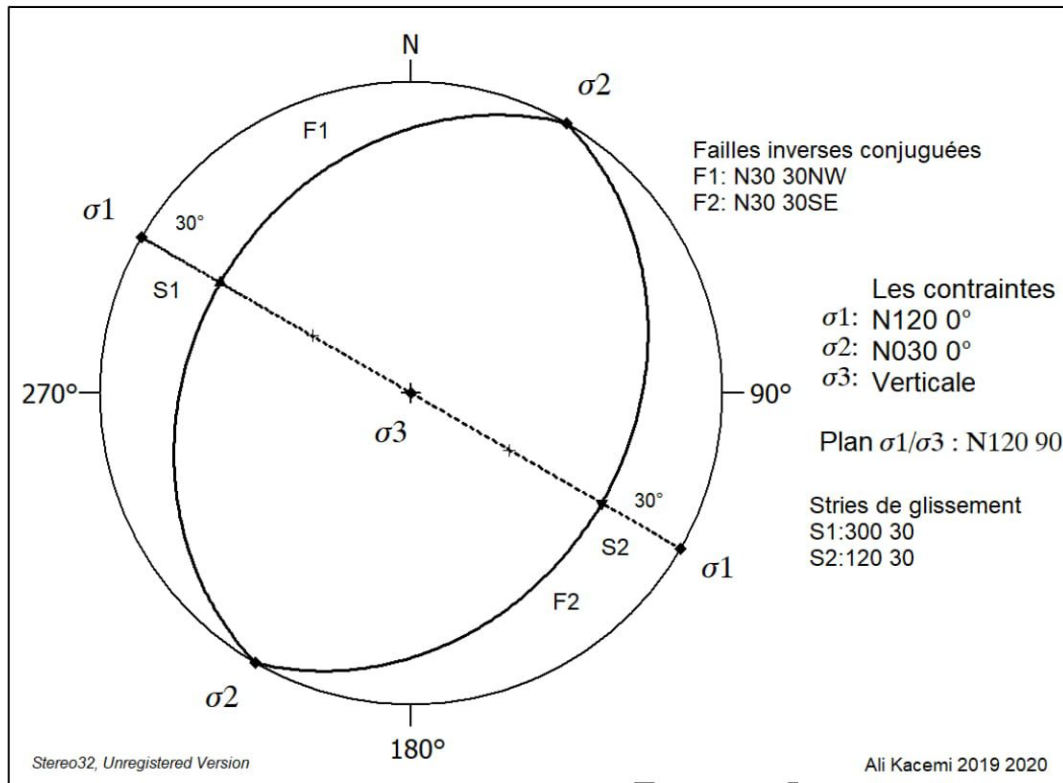


Fig. 3 : Stéréogramme de la représentation des failles inverses conjuguées F1 et F2 et différentes relations de ces failles avec les directions des contraintes.

- L'angle de rupture (ou de cisaillement) entre les directions de glissement et  $\sigma_1$  est l'angle  $2\theta$  qui est égale à  $2 \times 30^\circ = 60^\circ = 2\theta$
- L'angle de frottement interne (ou de friction interne) est l'angle  $\phi = 90^\circ - 2\theta$

➤ **Exercices :**

**EXO 1 :** Soient deux failles conjuguées : F1 : N30 60°NW, F2 : N30 60°SE. Déterminer les relations de ces failles avec les directions des contraintes.

**EXO 2 :** Soient deux failles décrochantes conjuguées : F1 : N70 90° Senestre, F2 : N10 90° Dextre. Déterminer les relations de ces failles avec les directions des contraintes.



## TP/TD N°6

### 3. Interprétation des orientations des failles à partir des directions de contraintes

Il est courant de travailler à l'envers sur ce problème d'analyse structurale des systèmes de failles, comme un problème inverse. *Supposons que nous voulions interpréter les orientations de deux failles conjuguées sur la base des directions des contraintes principales.*

Les orientations probables des failles qui devraient se former dans un champ de contraintes donné peuvent être évaluées stéréographiquement, à condition que l'angle de frottement interne soit connu. Pour l'interprétation des orientations de failles probables, nous supposons que les roches sont homogènes et isotropes.

#### ➤ APPLICATIONS

Examinons quels types de failles devraient se développer dans un champ de contraintes où :  $\sigma_1 = N20^\circ$ ,  $\sigma_2 = N110^\circ$ ,  **$\sigma_3 = \text{Verticale (plongement } 90^\circ)$**

*Rappelons que normalement le pôle par rapport à un plan de faille fait un angle de  $\theta = 60^\circ$  par rapport à la direction de la contrainte principale maximale ( $\sigma_1$ ). Supposons dans cet exemple qu'en effet  $\theta = 60^\circ$ .*

**Nous savons que les failles inverses devraient se former simplement sur la base de l'orientation verticale de  $\sigma_3$ .** Les orientations probables des contraintes peuvent être prédites en appliquant ce que nous avons appris **au TP/TD précédent N°5, sur l'analyse structurale d'un système de failles conjuguées.** Les failles conjuguées se recoupent en  $\sigma_2$ . La trace de chaque faille, vue dans le plan  $\sigma_1/\sigma_3$ , est orientée selon un angle de  $30^\circ$  par rapport à  $\sigma_1$ .

#### ➤ PROCEDURE

Pour donner à ces relations une réalité géométrique :

1) nous traçons stéréographiquement des points qui représentent les orientations des directions des contraintes principales (**figure 4 a**).

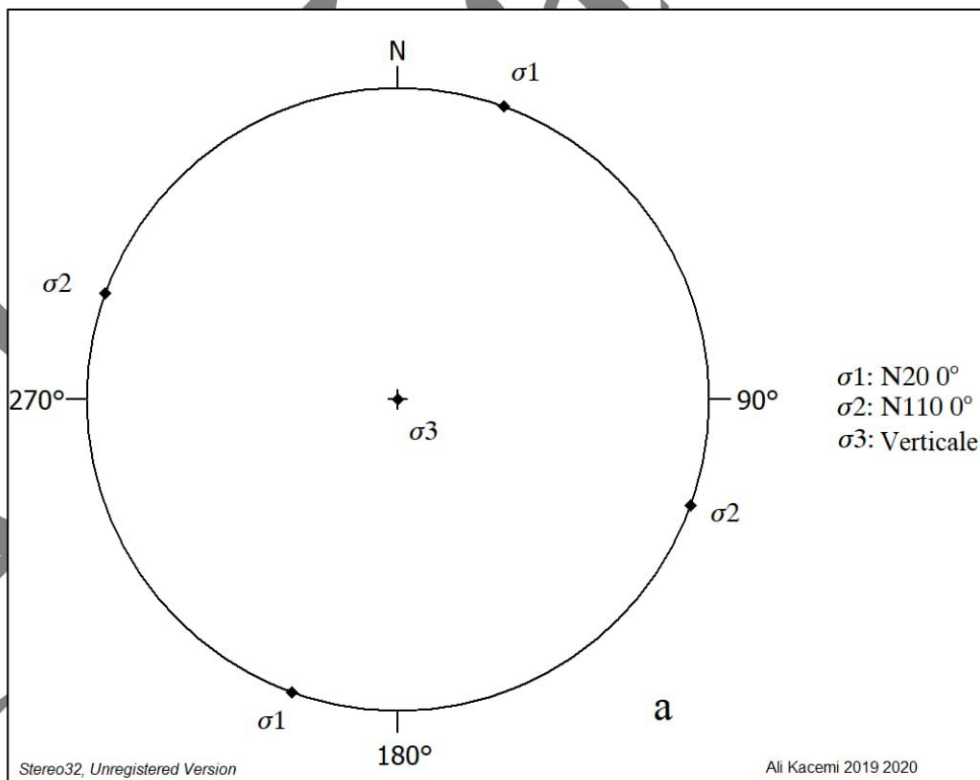
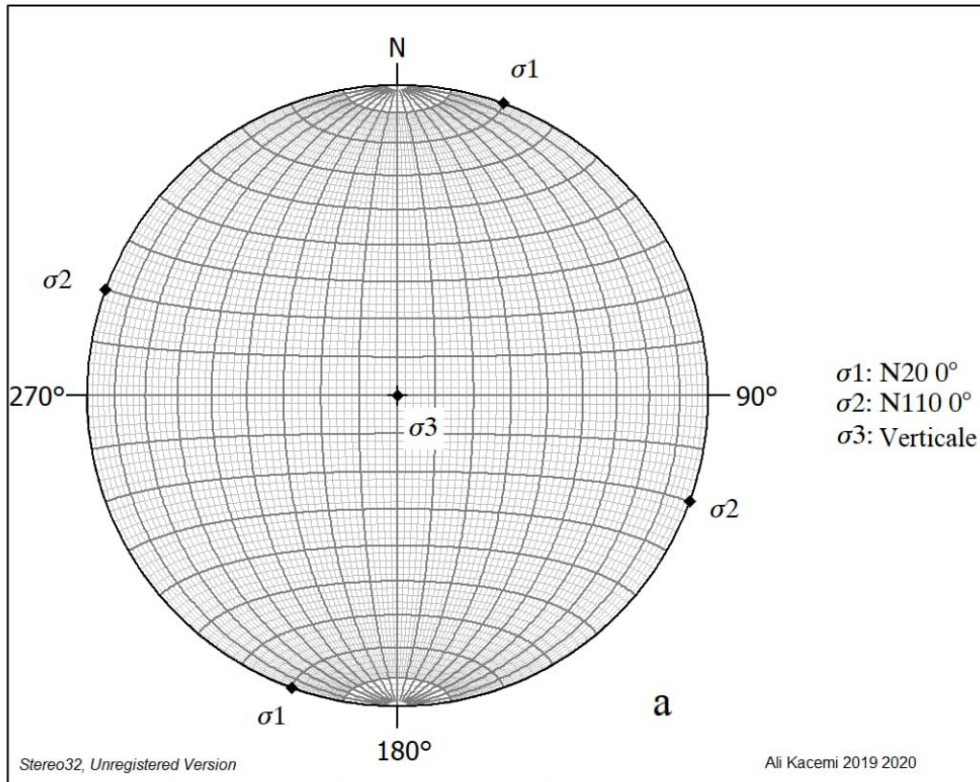
2) Nous définissons (identifions) ensuite le plan principal ( $\sigma_1/\sigma_3$ ) en ajustant  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  sur un grand cercle commun (**figure 4. b**).

3) En comptant  $30^\circ$  le long du grand cercle de  $\sigma_1$ , nous localisons deux points de référence (1 et 2) qui représentent **l'intersection des plans de faille avec le plan principal ( $\sigma_1/\sigma_3$ )** (**figure 4. b**).

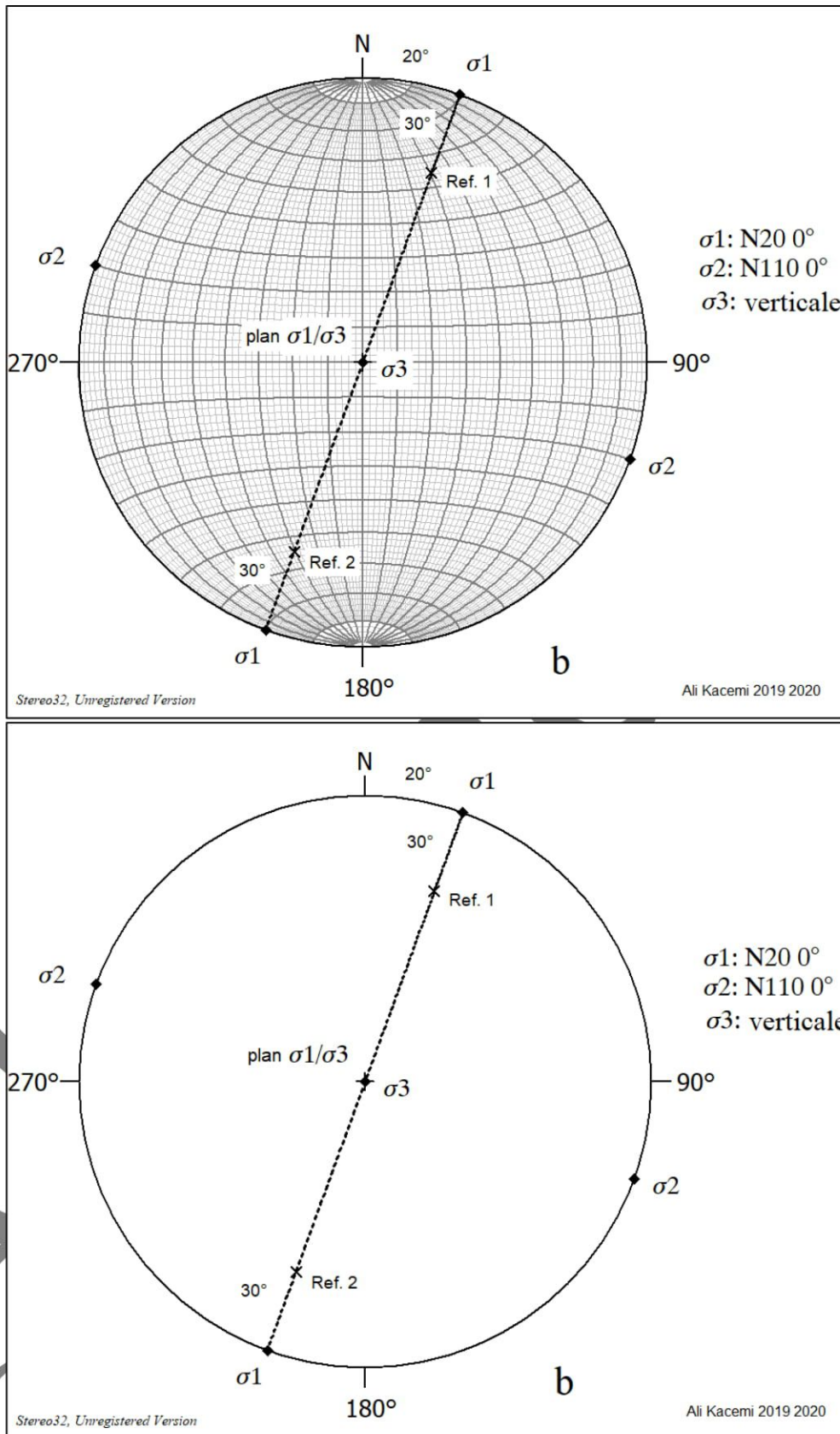
4) En ajustant  $\sigma_2$  et le point de référence 1 sur un grand cercle commun, l'une des failles inverses (**F1**) est définie (**figure 4. c**).

5) En ajustant le point de référence 2 et  $\sigma_2$  sur un grand cercle commun, la deuxième faille inverse (**F2**) de l'ensemble conjugué est établie (**figure 4. c**).

6) Les orientations réelles des failles sont ensuite déterminées par les procédures stéréographiques normales (**figure 4. c**).

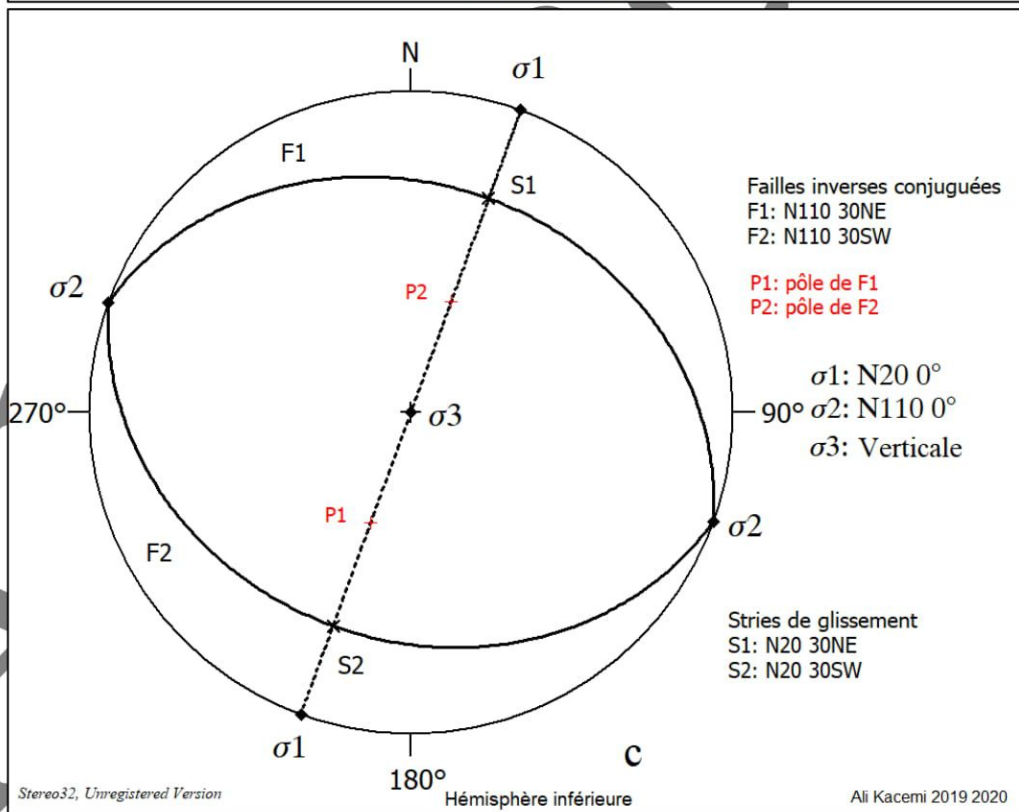
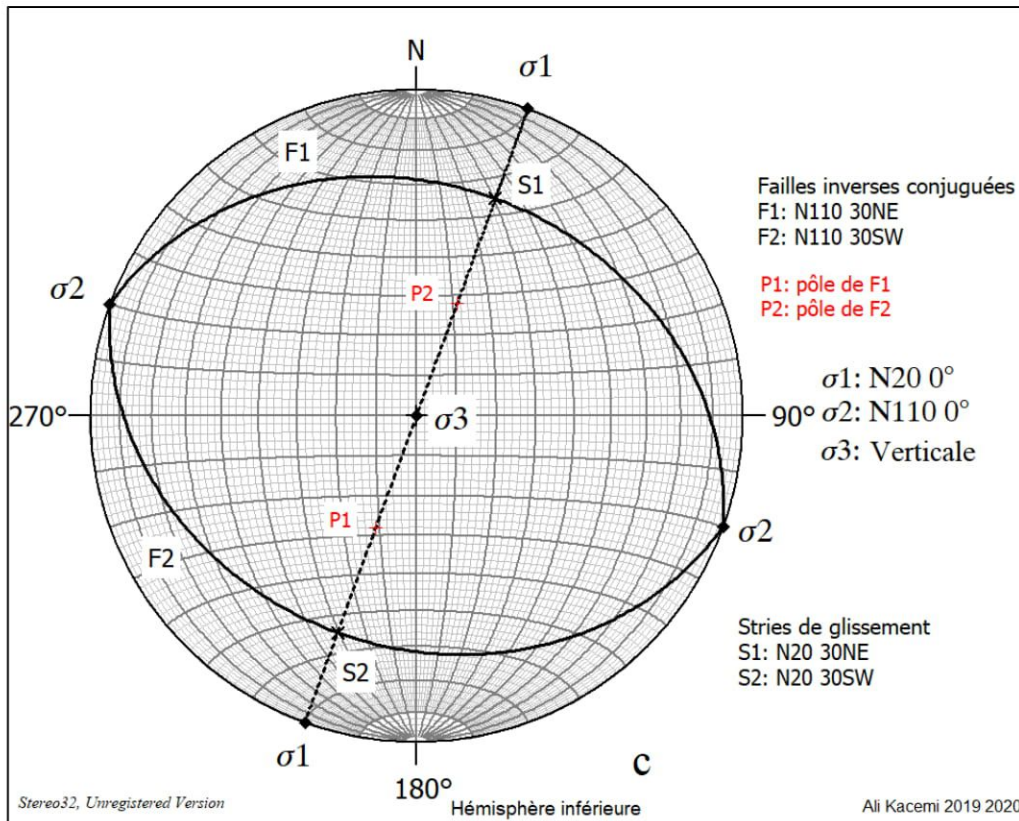


**Fig. 4.a : Représentation stéréographique des directions des contraintes, sur canevas de Schmidt (hémisphère inférieure).  $\sigma_1 = N20\ 0^\circ$ ,  $\sigma_2 = N110\ 0^\circ$  et  $\sigma_3$  verticale.**  
 En bas : Stéréogramme représentant la projection des directions des contraintes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$



**Fig. 4.b :** Canevas d'identification du plan ( $\sigma_1/\sigma_3$ ) et le tracé des points de référence 1 et 2, d'un angle de 30° de  $\sigma_1$  sur le grand cercle ( $\sigma_1/\sigma_3$ ), ( $\sigma_1 = N20 0^\circ$ ,  $\sigma_2 = N110 0^\circ$  et  $\sigma_3$  verticale). En bas, Stéréogramme d'identification du plan  $\sigma_1/\sigma_3$  et des points de référence (1 et 2) situés à 30° de  $\sigma_1$  sur le grand cercle  $\sigma_1/\sigma_3$ , ( $\sigma_1 = N20 0^\circ$ ,  $\sigma_2 = N110 0^\circ$  et  $\sigma_3$  verticale).





**Fig. 4.c :** L'orientation de l'une des failles inverse (F1) est représentée par un grand cercle passant par les points de référence 1 (S1) et  $\sigma_2$ . L'orientation de la deuxième faille inverse (F2) est définie par le grand cercle passant par les points de référence 2 (S2) et  $\sigma_2$ .

Représentation des orientations réelles des failles et des stries de glissement S1 et S2 "slickenline" ou (slickenside) qui se produisent le long des failles F1 et F2.

**RESULTATS :**

Examinons quels types de failles devraient se développer dans un champ de contraintes

où :  $\sigma_1 = N20\ 0^\circ$ ,  $\sigma_2 = N110\ 0^\circ$ ,  $\sigma_3 = \text{Verticale (plongement } 90^\circ)$

- $\sigma_3$  Verticale il s'agit d'une faille inverse conjugué (F1 et F2)
- Angles  $\alpha_1 = 60$ ,  $\alpha_2 = 120^\circ$  l'angle de rupture  $2\theta = 60$
- $\sigma_2 = 20\ 0^\circ$
- Plan principal  $\sigma_1/\sigma_3$  : N200 90 W
- S1 : 020 30°NE
- S2 : 20 30°SW
- F1 : N110 30NE
- F2 : N110 30SW

➤ Des solutions comparables pour définir les orientations des failles normales et les décrochements sont présentées respectivement dans les **figures 5 et 6**.

❖ **Pour les failles normales conjuguées (figure 5) :**

Examinons quels types de failles devraient se développer dans un champ de contraintes

où :  $\sigma_1 = \text{verticale}$ ,  $\sigma_2 = N140\ 0^\circ$ ,  $\sigma_3 = N50\ 0^\circ$

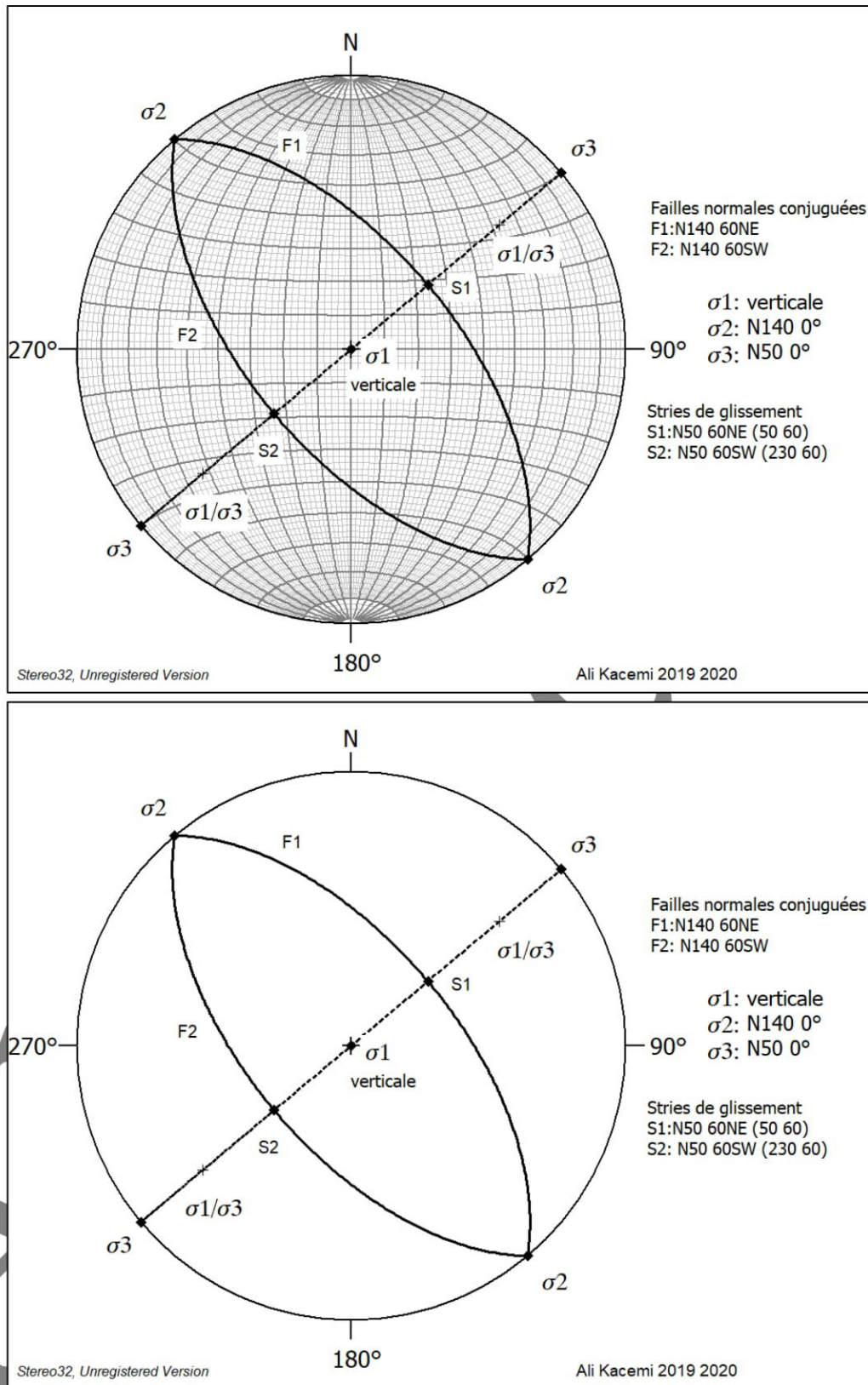
❖ **Pour les décrochements conjugués (figure 6) :**

Examinons quels types de failles devraient se développer dans un champ de contraintes

où :  $\sigma_1 = N115\ 0^\circ$ ,  $\sigma_2 = \text{verticale}$ ,  $\sigma_3 = N25\ 0^\circ$

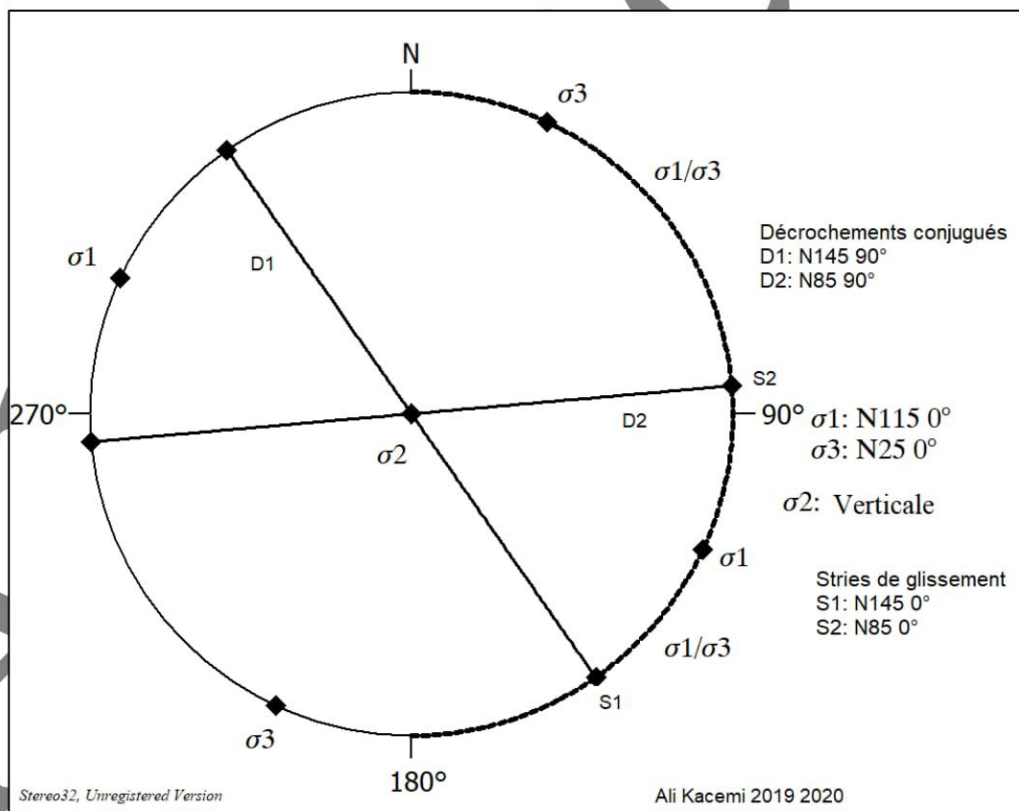
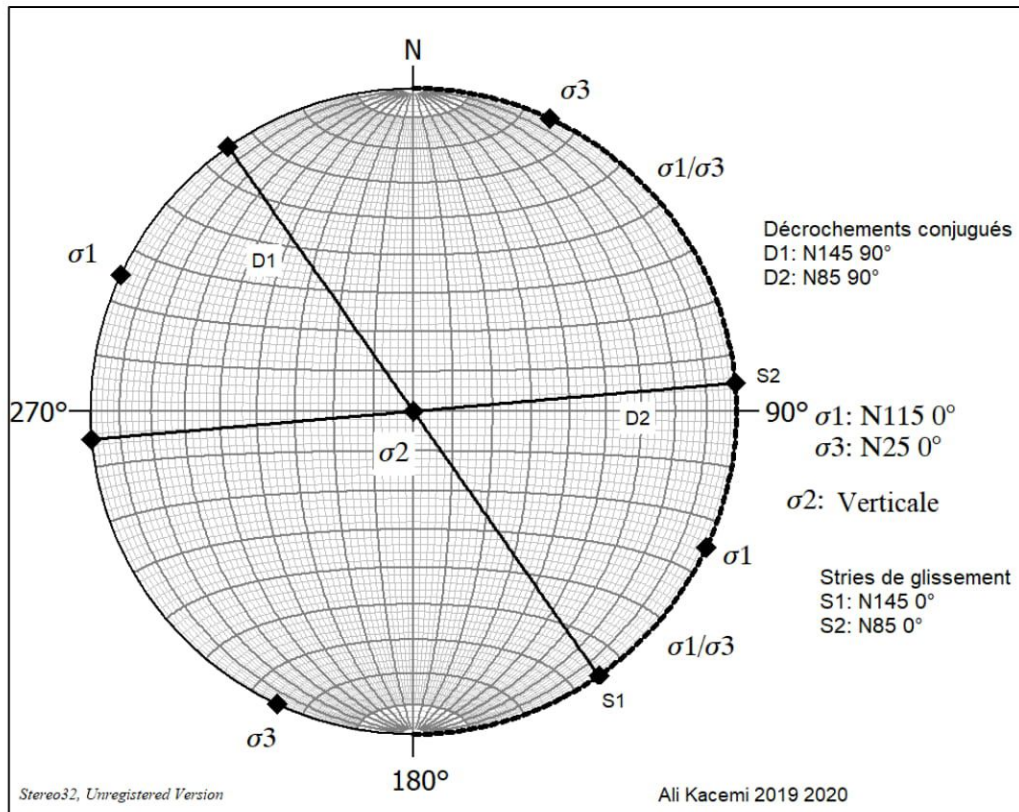
➤ **RESULTATS**

Les représentations et les résultats des deux applications sont incluses dans les figures 5 et 6.



**Figure 5 :** Représentation stéréographique de la relation entre **failles normales conjuguées** et directions de contraintes, dans un champ de contraintes où  $\sigma_1$  est verticale,  $\sigma_2 = N140^\circ 0^\circ$  et  $\sigma_3 = N50^\circ 0^\circ$ . Résultats : F1 : N140 60NE, F2 : N140 60SW- S1 : 50 60, S2 : 230 60.





**Figure 6 :** Représentation stéréographique de la relation entre **failles décrochantes conjuguées** et directions des contraintes, dans un champ de contraintes où **σ2 est verticale**, σ1 = N115° 0° et σ3 = N25 0°. Résultats : D1 : N145 90, F2 : N85 90- S1 : 145 0, S2 : 85 0. En bas Stéréogramme de la représentation.

**EXERCICES**

**EXO 1 :** Examinez quels types de failles devraient se développer dans un champ de contraintes où  $\sigma_1 = N230\ 0^\circ$ ,  $\sigma_2 = N320\ 0^\circ$  et  $\sigma_3$  est vertical. Déterminer les attitudes des stries de glissement S1 et S2.

**EXO 2 :** Examinez quels types de failles devraient se développer dans un champ de contraintes où  $\sigma_1$  = est vertical,  $\sigma_2 = N60\ 0^\circ$  et  $\sigma_3. N150\ 0^\circ$ , en déterminant les attitudes des stries de glissement S1 et S2.

**EXO 3 :** Examinez quels types de failles devraient se développer dans un champ de contraintes où  $\sigma_1 = N100\ 0^\circ$ ,  $\sigma_2 =$  est vertical et  $\sigma_3. N10\ 0^\circ$ , en déterminant les attitudes des stries de glissement S1 et S2.

## TP/TD N°7

## Utilisation des failles pour l'interprétation des contraintes :

## 4. Cas où une ou plusieurs des directions de contraintes principales sont inclinées

Si une ou plusieurs des directions de contraintes principales sont inclinées, la solution est plus difficile à visualiser, mais les opérations stéréographiques sont les mêmes. Considérons la situation générale dans laquelle aucune des directions de contraintes principales n'est verticale ou horizontale ; au contraire, tous sont inclinés (figure 7).

## ➤ APPLICATION

Soient deux failles conjuguées F1 et F2 qui se recoupent et ayant pour attitudes : **F1 : N144 28NE**, **F2 : N60 58NW**, quelles sont les relations de ce système de failles avec les différentes contraintes.

Comme précédemment, nous définissons le **plan principal  $\sigma_1/\sigma_3$  en ajustant  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  à un grand cercle commun, ayant pour pôle  $\sigma_2$** , puis nous plaçons la droite  $\sigma_1$  sur le grand cercle (plan  $\sigma_1/\sigma_3$ ) qui correspond à **la bissectrice de l'angle aigu**. **La bissectrice de l'angle obtus** correspond à  $\sigma_3$ . Les failles F1 et F2 intersectent (recoupent) respectivement le plan principal ( $\sigma_1/\sigma_3$ ) en **S1 et S2 (stries de glissement)**. Les orientations des plans de failles F1 et F2 sont définies chacune par les stries S1 ou S2 et  $\sigma_2$  (figure 7).

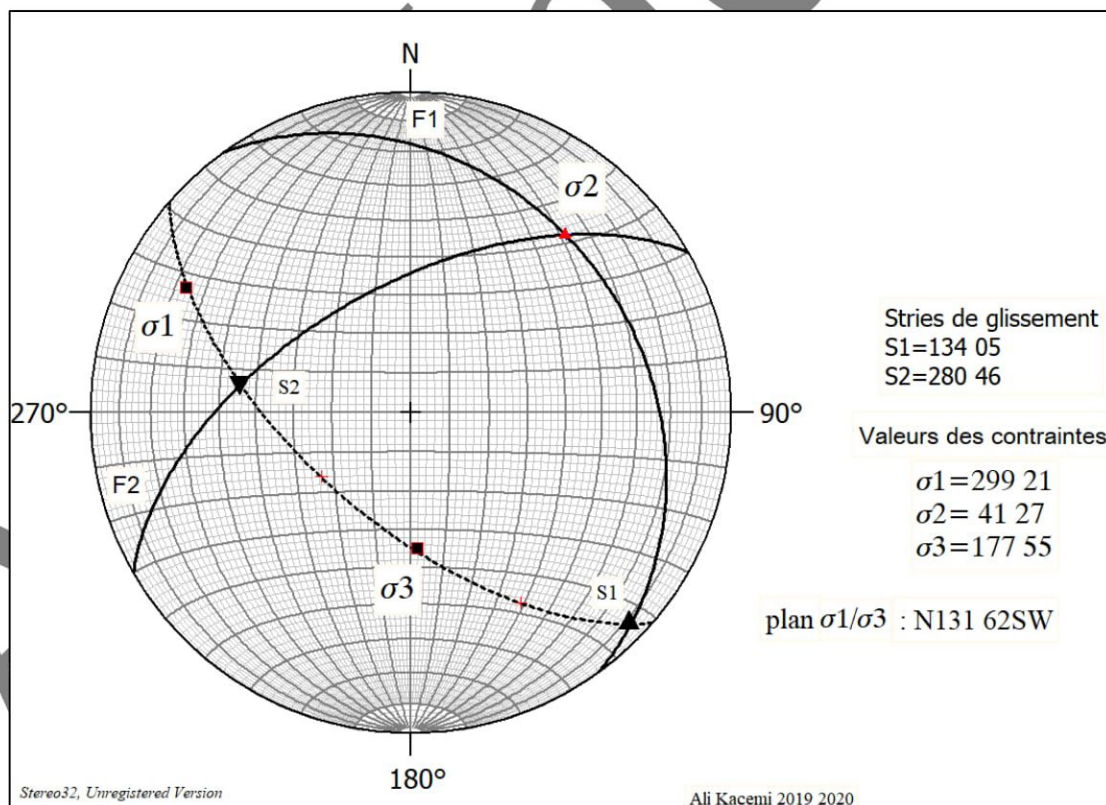


Figure 7 : projection stéréographique des failles F1 et F2 et détermination des relations de ces failles avec les contraintes (canevas de Schmidt hémisphère inférieure).



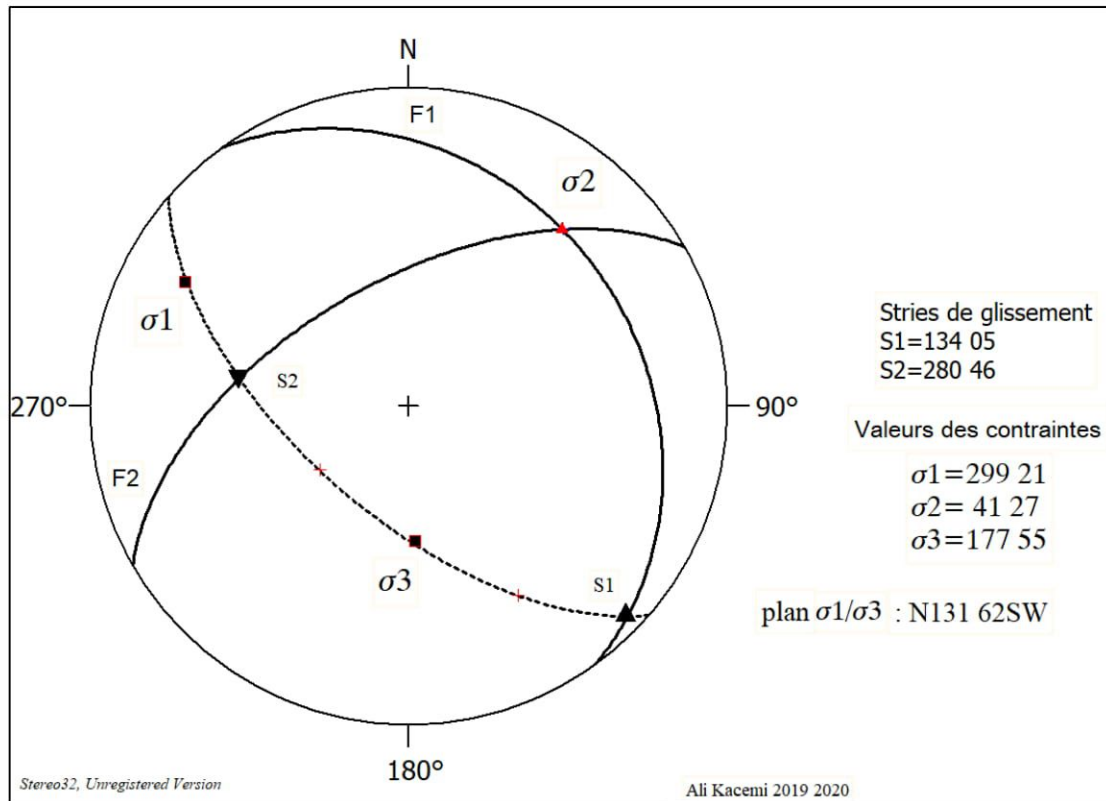


Figure 7 : Stéréogramme de la projection stéréographique des failles F1 et F2 et la détermination des relations de ces failles avec les contraintes

➤ **RESULTATS**

Les résultats sur la figure :

- L'intersection de F1 et F2 donne  $\sigma_2$  qui est égale à : 41 27
- Plan  $\sigma_1/\sigma_3$  : N131 62SW
- $\sigma_1$  correspond à la bissectrice de l'angle aigu : 299 21
- $\sigma_3$  correspond à la bissectrice de l'angle obtus : 177 55
- L'intersection du plan principal  $\sigma_1/\sigma_3$  avec les plans de failles F1 et F2 donne respectivement les directions de glissement S1 et S2 : S1 : 134 05° et S2 : 280 46°
- L'angle de rupture (ou de cisaillement) entre les directions de glissement et  $\sigma_1$  est l'angle  $2\theta$  qui est égale à  $2 \times 30^\circ = 60^\circ$

➤ **EXERCICES**

**EXO 1** : Soient deux failles conjuguées F1 et F2 qui se recoupent et ayant pour attitudes : F1 : N182 40W, F2 : N44 82NW, quelles sont les relations de ce système de failles avec les différentes contraintes.

**EXO 2** : Soient deux failles conjuguées F3 et F4 qui se recoupent et ayant pour attitudes : F3 : N156 42SW, F4 : N126 78NE, quelles sont les relations de ce système de failles avec les différentes contraintes.