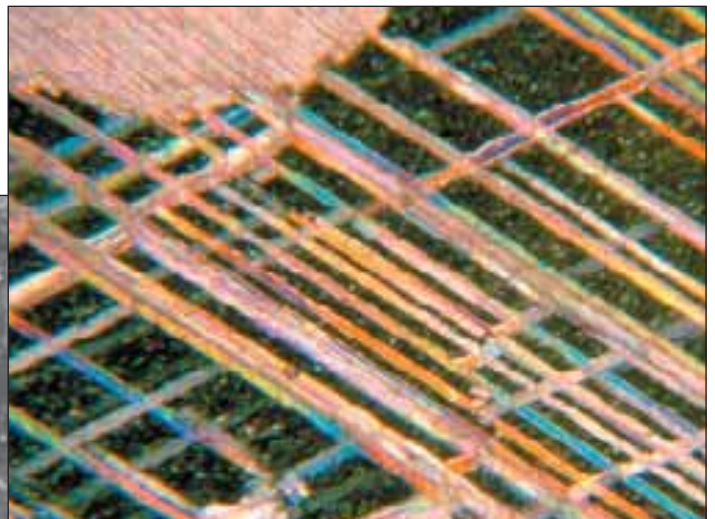
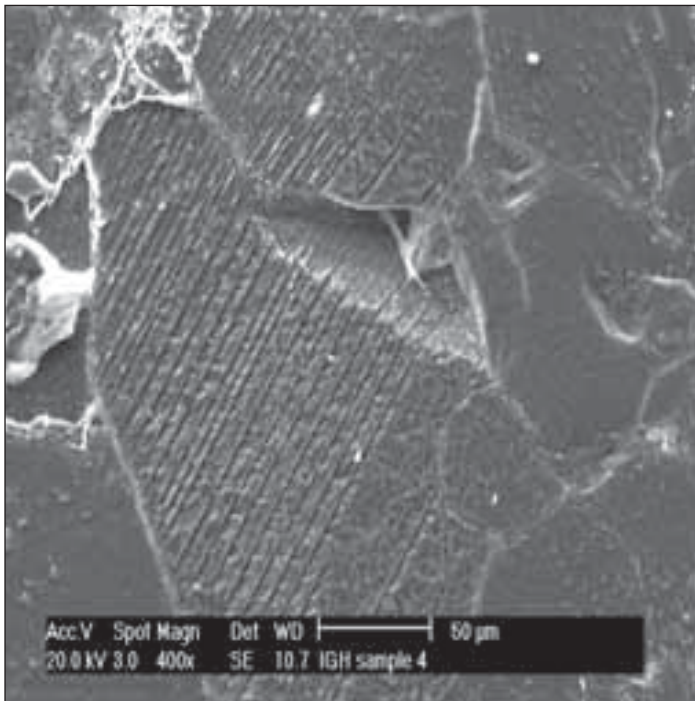


# Etude du cratère du Nördlingen-Ries (Allemagne) selon les macles de la calcite



## Travail de diplôme

Claude Girardin

Sous la direction du Pr. M. Burkhard

2006

## Résumé

Ce travail de diplôme porte sur l'étude des macles de la calcite autour du cratère du Nördlingen-Ries (Allemagne).

Ce cratère de météorite a un diamètre de 25 km environ et est âgé de 14.7 Ma. Celui-ci se situe dans le Jura Souabe et les roches affleurentes sont composées de calcaire d'âge jurassique.

Les macles sont utilisées pour déterminer les déformations enregistrées dans les roches et comme géothermomètre lors de la formation des macles

Les déformations enregistrées dans les roches autour du cratère sont étudiées grâce à la technique «Calcite Strain Gauge» selon la méthodologie de Groshong (1972, 1974). Celle-ci utilise l'orientation cristallographique  $c$ , l'orientation et le pourcentage des macles dans la calcite.

La température de formation des macles est estimée selon la morphologie et la concentration des macles (Ferill *et al.*, 2004).

Les 11 échantillons montrent que deux orientations de déformation sont enregistrées dans le calcaire. Une famille de vecteurs de déformation provient de l'histoire alpine, la seconde provenant de l'impact météoritique. La déformation due à la météorite est observable jusqu'à 20 km du centre du cratère; 40 km en utilisant un vecteur peu fiable.

Les différentes étapes de calcul montrent que peu de déformations calculées grâce aux macles sont trop peu robuste (12 macles sur 225).

Il est possible de déterminer l'origine des déformations pour tous les échantillons.

La morphologie des macles permet d'estimer une température lors de leur formation d'environ 200°C pour toutes les macles. Cette valeur pose des problèmes pour expliquer son origine. En effet, les températures sont trop homogènes entre elles ou trop élevées pour être expliquées.

## Remerciements

- Au prof. Martin Burkhard pour ce travail de diplôme
- A M. Dadras et à Mme. Leboeuf pour leur aide lors des photos au microscope électronique
- A André Villard pour les multiples lames minces préparées
- A Laureline, Esther, Monica, Jean-Luc, Joe, Sam, Pat et John pour les moments parfois studieux, parfois musicaux, mais toujours sympathiques passés dans le bureau.
- A Gaël, pour ces cinq années de bonne humeur géologique et de colloc.
- A Mathias, pour deux ans de jeux de mots et de bonne humeur
- A ma famille, pour son soutien permanent

# Table des matières

## Chapitres

<b>1.</b>	<b>Introduction</b>	<b>1-4</b>
1.1	But	1
1.2	Situation géographique	2
1.3	Caractéristique du cratère	2
1.4	Géologie régionale	3
1.5	Description des roches	4
1.6	Roches ayant pour origine l'impact	4
<b>2.</b>	<b>Explication de la formation des macles</b>	<b>5-9</b>
2.1	Caractéristiques de la calcite	5
2.2	Formation de la macle	6
2.3	Cas de la calcite	8
2.4	Conditions pour l'utilisation de la méthode CSG	9
<b>3.</b>	<b>Calcul des contraintes par CSG (Calcite Strain Gauge)</b>	<b>10-18</b>
3.1	Introduction	10
3.2	La platine universelle Fedorov	10
3.3	Obtention des mesures	11
3.4	Observation sur l'inhomogénéité du nombre de mesures	11
3.5	Passage dans le programme Cygwin	11
3.6	Calcul sur les mesures	12
3.6.1	Vérification des mesures	12
3.6.2	Méthode des NEV (Negativ-Expected Value)	12
3.6.3	Robustesse des mesures : méthode des 15%	12

3.7	Résultats des mesures	12
3.8	Observation sur les mesures	15
3.9	Mesures sur la carte	16
3.9.1	Contraintes sans distinction entre NEV et sans NEV	16
3.9.2	Contraintes avec distinction entre NEV et sans NEV	16
3.9.3	Représentation des contraintes sans NEV et moins 15% de leurs contributions	16
3.9.4	Représentation des contraintes NEV et moins 15% de leurs contributions	16
3.9.5	Représentation des contraintes considérées comme robustes	17
3.9.6	Représentation des contraintes selon leur origine : déformation alpine ou due au cratère	17
3.10	Discussion des résultats et de leurs placements sur la carte	17
<b>4.</b>	<b>Microscopie électronique à balayage</b>	<b>19-29</b>
4.1	Introduction	19
4.2	Méthode	20
4.3	Choix des échantillons	20
4.4	Préparation des surfaces pour l'observation au MEB	20
4.5	Observations	21
4.5.1	Echantillon 1	21
4.5.2	Echantillon 9	23
4.5.3	Echantillon NR4	26
4.5.4	Echantillon « fracture »	28
4.6	Discussion	29
<b>5.</b>	<b>Morphologie des macles</b>	<b>30-36</b>
5.1	Introduction	30
5.2	Mesures des données	31

5.3	Traitement des données	32
5.3.1	Sans différenciation des échantillons	32
5.3.2	Avec différenciation des échantillons	33
5.4	Mesures provenant de l'impact	35
5.5	Interprétation	36
5.6	Conclusion	36
<b>6.</b>	<b>Descriptions d'affleurement</b>	<b>37-48</b>
6.1	Introduction	37
6.2	Affleurement A	38
6.3	Affleurement B	42
6.4	Affleurement C	43
6.5	Affleurement D	46
6.6	Affleurement E	47
<b>7.</b>	<b>Conclusion</b>	<b>49-50</b>
<b>Carte 1</b>	Contraintes sans distinction entre NEV et sans NEV	
<b>Carte 2</b>	Contraintes avec distinction entre NEV et sans NEV	
<b>Carte 3</b>	Représentation des contraintes sans NEV et moins 15% de leurs contributions	
<b>Carte 4</b>	Représentation des contraintes NEV et moins 15% de leurs contributions	
<b>Carte 5</b>	Représentation des contraintes considérées comme robustes	
<b>Carte 6</b>	Représentation des contraintes selon leur origine : déformation alpine ou due au cratère	

## **Annexes**

- I.** Utilisation de la table Fedorov
- II.** Liste des mesures de macles
- III.** Fichier d'entrée Cygwin
- IV.** Explication feuille de résultats Cygwin
- V.** Cosinus directeurs
- VI.** Calcul informatique dans Cygwin
- VII.** Méthode BEM

# 1



## Introduction

### 1.1. But

Le but de ce travail est d'identifier et de quantifier les déformations qui ont été enregistrées dans la roche lors de l'impact de la météorite du Nördlingen-Ries (Allemagne).

Pour cela, on utilise principalement la méthode CSG (calcite strain gauge) de Groshong (1972, 1976). Il s'agit de mesures sur les macles de la calcite qui, après traitement, donnent des informations sur les déformations subies par l'échantillon.

Les traitements informatiques permettent de séparer ensuite les origines de ces déformations : dues à l'impact de la météorite, ou à la compression alpine.

Une analyse des faibles déformations des roches est effectuée grâce aux lames minces et au microscope électronique à balayage.

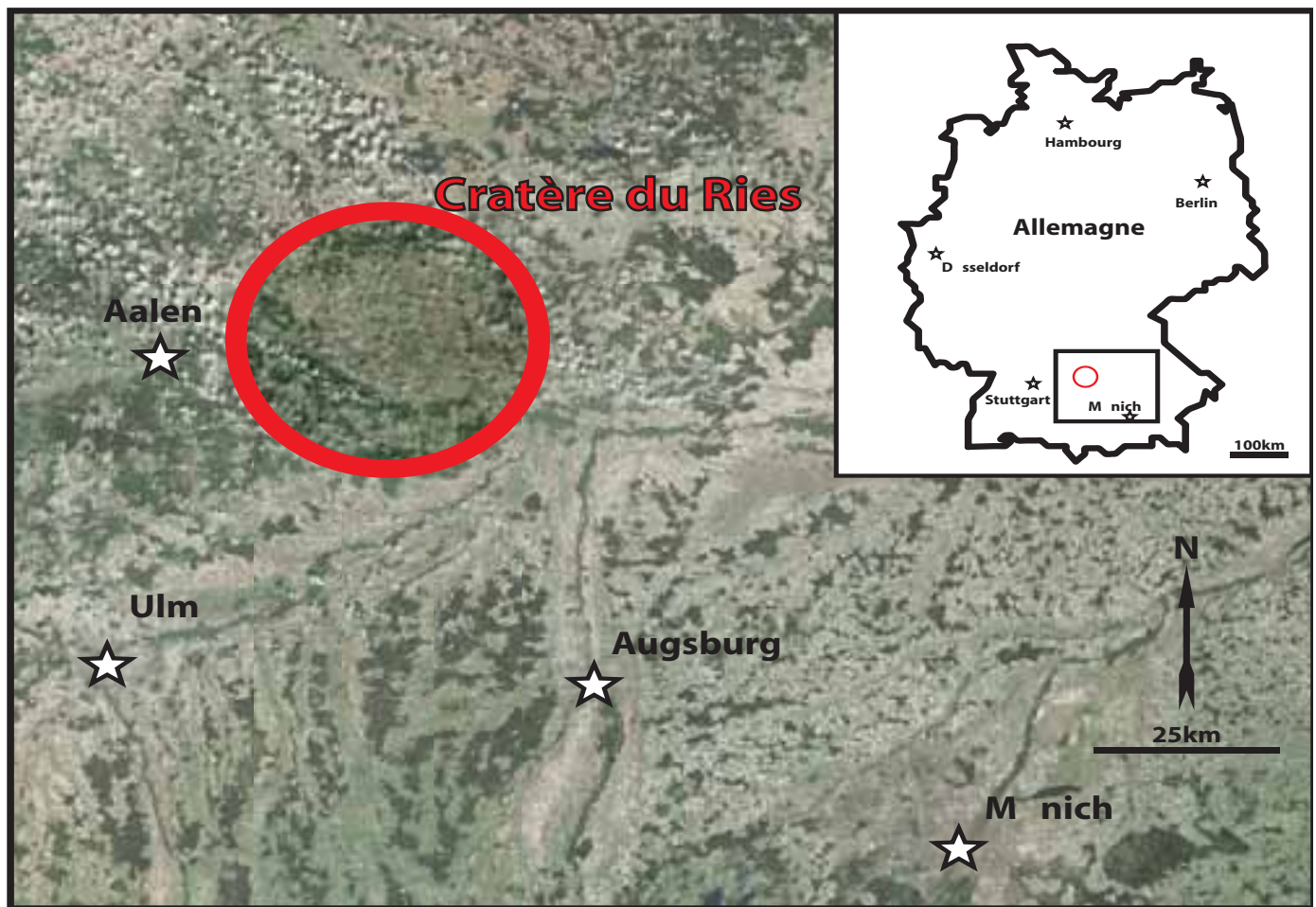


Figure 1 : Photo satellite de la région du cratère. (EarthSat (google), 2005)

## 1.2. Situation géographique

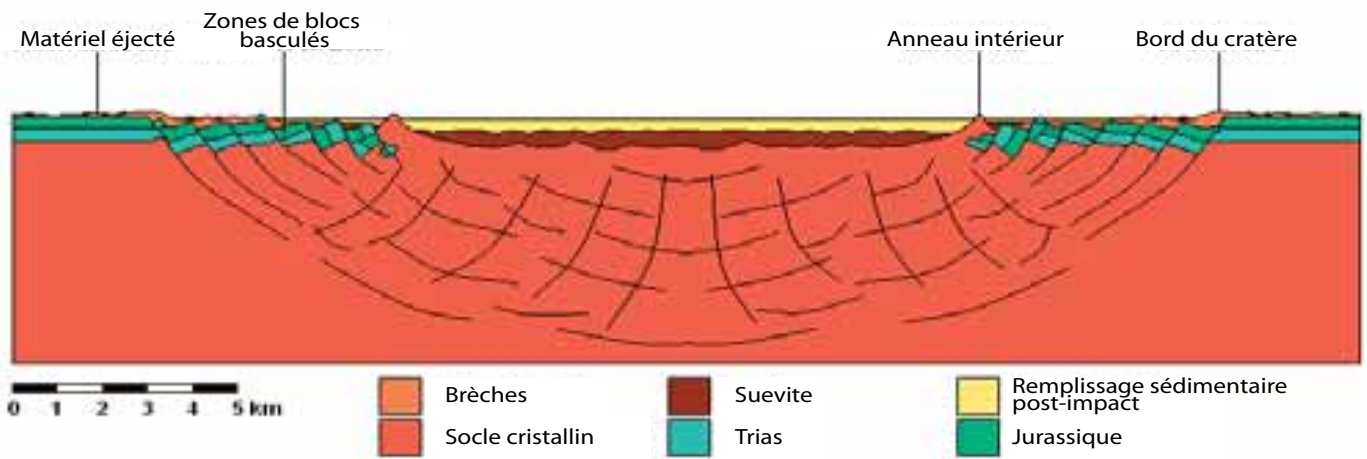
La zone d'étude se trouve dans les alentours du cratère du Ries. Ce cratère d'impact est situé en Allemagne à environ 100km au nord-ouest de Munich (centre du cratère :  $48^{\circ} 51' 06''N$  ;  $10^{\circ} 29' 23''$ ). Il se présente par une plaine à l'intérieur des collines du Jura Souabe. (figure 1)

## 1.3. Caractéristique du cratère

Le cratère du Nördlinger Ries compte parmi les cratères les mieux étudiés de la planète. Depuis les années 60, on sait que le cratère provient d'un impact de météorite. (Shoemaker et Chao, 1961). Le cratère du Ries est âgé d'environ 14.8Ma (Pohl et Gall, 1977 ; Hüttner et Schmidt-Kaler, 1999).

La météorite a été estimée d'un diamètre d'environ 700m avec une vitesse de chute de 20 à 30km/s. Ce choc produit un cratère de 8 km de diamètre et de 4 km de profondeur. Mais celui-ci n'est pas stable et se rebouche en partie immédiatement pour une profondeur actuelle de 300 à 400m.

En plus de la création de macule, d'autres marqueurs de l'impact sont observables. L'onde de choc crée des shattercones: un cône de pression enregistré dans la roche. Des fracturations et des basculements de roches sont générés. Des minéraux de très haute pression et température (par exemple la Coesite ou la Stishovite) et des verres sont aussi créés.



**Figure 2:** Coupe actuelle du cratère (Pohl, Stöffler, Gall et Ernstson , 1977)

Au total, plus de 150 km<sup>3</sup> de roches éjectées et 1000 km<sup>3</sup> de roches déplacées.

Actuellement, le cratère est rempli par des sédiments de lacs post-impact. (figure 2)

### 1.4. Géologie régionale

La géologie de la région est caractérisée par des couches sédimentaires du Trias jusqu’au Jurassique ayant subi une faible compression alpine (NNW-SSE)(Geyer, Gwinner, 1968). On retrouve de la molasse du Tertiaire dite OMM et OSM plus au sud et à l’est, vers la plaine du Danube. (figure 3)



**Figure 3:** Carte géologique (bureau géologique du Land de Bavière)

Autour du cratère, on retrouve de nombreuses brèches formées lors de l'impact et, par endroits, de la suevite. A 30 km à l'est, à Steinheim, se trouve un autre cratère beaucoup plus petit, d'environ 2km de diamètre.

## **1.5. Description des roches**

Les caractéristiques des roches sont reprises de Schmidt-Kaler (1983).

**Socle cristallin** : Le socle se compose principalement de roches métamorphiques (orthogneiss, paragneiss, metabasite). Des intrusions de granite d'époque varisque sont aussi présentes. Il n'y a pas d'affleurement de roche en place, le socle est visible où il a été remonté à la surface par l'impact.

**Couches rouges (Keuper)** : Il s'agit de roches du Trias supérieur. Des argiles rouges, des grès grossiers et des conglomérats le composent.

### **Jurassique:**

**Inférieur** : Cette série est composée d'argile et de marne, et aussi minoritairement de calcaire et de grès. Sa puissance est très variable. 30m au centre du cratère, 50m au NW et 15m au bord SE du cratère.

**Moyen** : On y trouve des argiles et du grès avec des oolithes ferrugineuses. Son épaisseur est de 140m au maximum.

**Supérieur** : Composé de calcaire et de marne, cet étage a une épaisseur de 350m.

**Crétacé** : Il s'agit principalement d'argile riche en kaolinite et d'argile bariolée. On ne trouve pas cette roche aux alentours directs du cratère, mais seulement plus au sud vers la plaine du Danube.

**Tertiaire** : On retrouve des roches molassiques de l'OSM (obere Süßwassermolasse) et de l'OMM (obere Meerwassermolasse). Elles se composent de sables, et de marnes. Elles sont aux mêmes endroits que les roches du Crétacé.

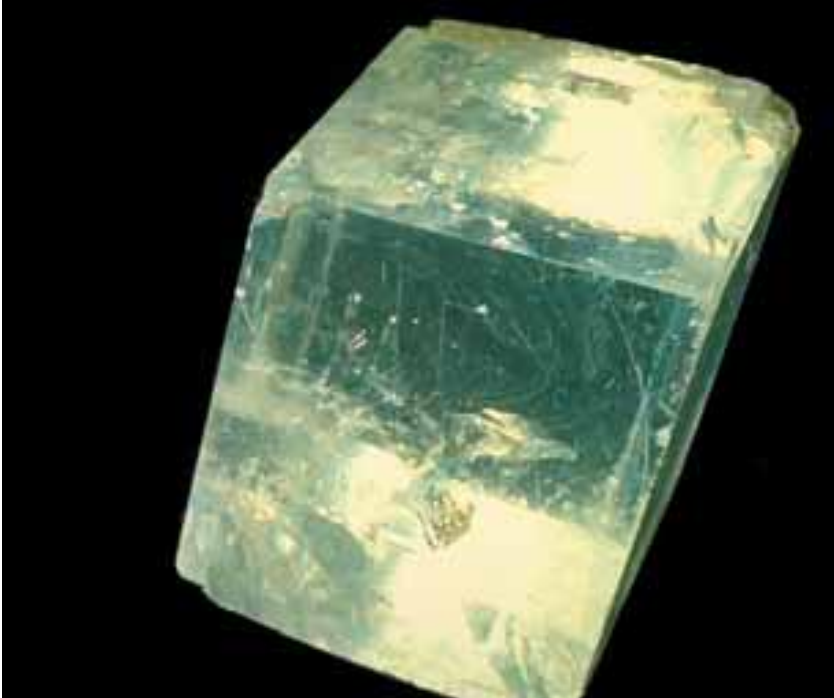
## **1.6. Roches ayant pour origine l'impact**

**Brèche de roches** : Il s'agit d'une brèche composée d'une matrice clastique. Elle est aussi nommée brèche « multicolore » (en all : bunte Brechen) car les éléments la composant ont parfois des couleurs, donc des origines différentes.

**Suevite** : C'est aussi une brèche, mais elle contient en plus du verre en quantité variable. Elle est caractérisée par une haute magnétisation rémanente (min 600°C). On retrouve la suevite en épaisseur variable et jusqu'à 32km du cratère.

**Verre** : Les verres ont une composition chimique semblable au socle cristallin. On les retrouve sous forme de bombe centimétrique à décimétrique et de tectique jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres du cratère. (par exemple les moldavites)

# 2



## La calcite et la formation des macles

### 2.1. Caractéristiques de la calcite

Pour comprendre la formation des macles, il est utile de revoir certaines caractéristiques du réseau cristallin de la calcite. (Deer, Howie, Zussman et Klein, 2002)

Celles-ci sont l'axe c et a (axes de symétrie), les plans de clivage (r) et les plans de maclage (e).

Les principaux axes et plans sont décrits ci-dessous avec les indices de Miller :

(Remarque : [] : droite      {} : plan)

Axe c : [0001]

Axe a : [1011]

Clivage (r) : {101}

Macle (e) : {012}

Les relations cristallographiques entre les axes a et c et les plans r et e sont montrées dans la *figure 1*.



**Figure 1** : Axes et plans de la calcite sur le diagramme de Schmidt-Lambert

Par convention, on utilise les symboles  $e_1$ ,  $e_2$  et  $e_3$  pour les trois plans des macles,  $r_1$ ,  $r_2$  et  $r_3$  pour les clivages et  $[e_1:r_2]$  pour, par exemple, l'angle entre  $e_1$  et  $r_2$ .

Avec le réseau cristallographique de la calcite, les angles suivants mesurent :

$$\begin{aligned}
 c \wedge r &= 44,5^\circ \\
 c \wedge e &= 26^\circ \\
 e_1 \wedge e_2 &= 45^\circ \\
 e_1 \wedge r_2 &= 38^\circ
 \end{aligned}$$

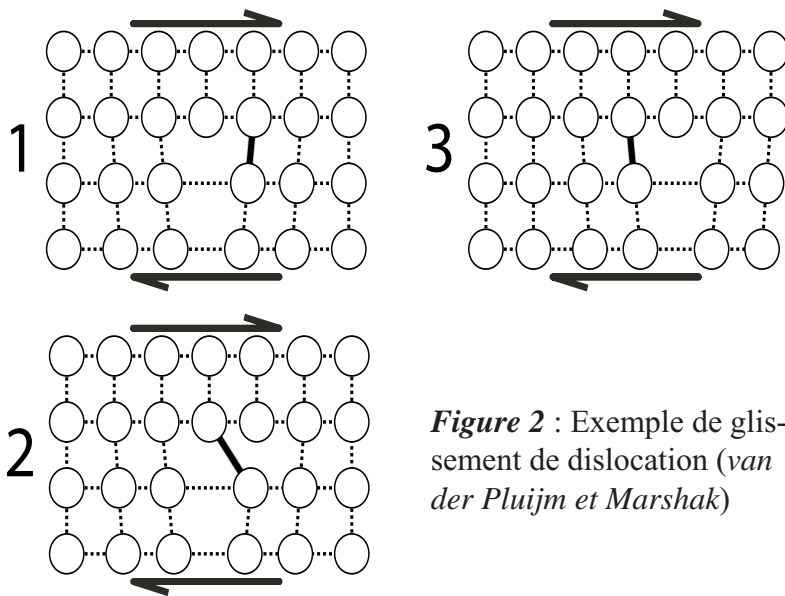
$$e1 \wedge r1 = 71^\circ$$

$$r1 \wedge r2 = 75^\circ$$

Ces différents angles sont utiles pour différencier les macles des fissures et des limites de grains lors des mesures. Ils permettent aussi de vérifier que la calcite est bien le minéral observé.

## 2.2. Formation de la macle

La macle mécanique est un processus de déformation ductile du grain due à un cisaillement. (van der Pluijm et Marshak)



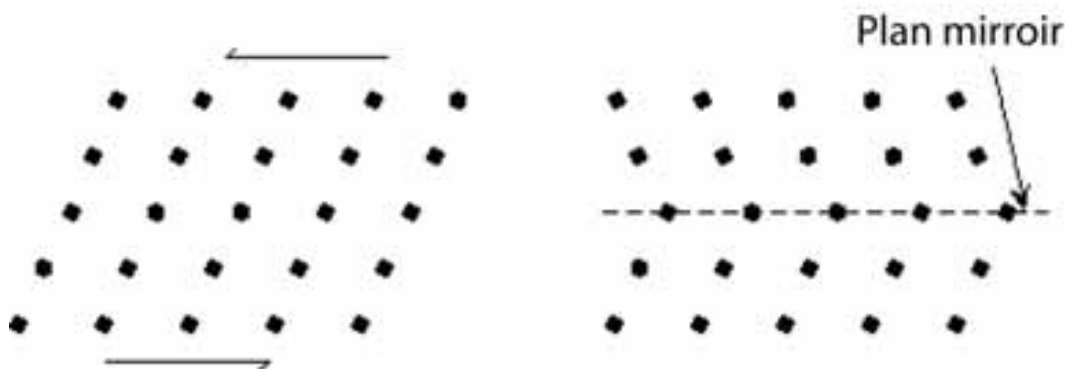
**Figure 2** : Exemple de glissement de dislocation (van der Pluijm et Marshak)

Le maillage a beaucoup de similarités avec le glissement de dislocation, mais diffère sur deux points.

Premièrement, les atomes ne bougent que d'une fraction de distance de réseau cristallin, donc les atomes ne sont plus alignés les uns par rapport aux autres. (**Figure 2**)

Deuxièmement, la portion maillée est une image miroir du réseau original. Dans le glissement de dislocation, l'orientation cristallographique reste la même.

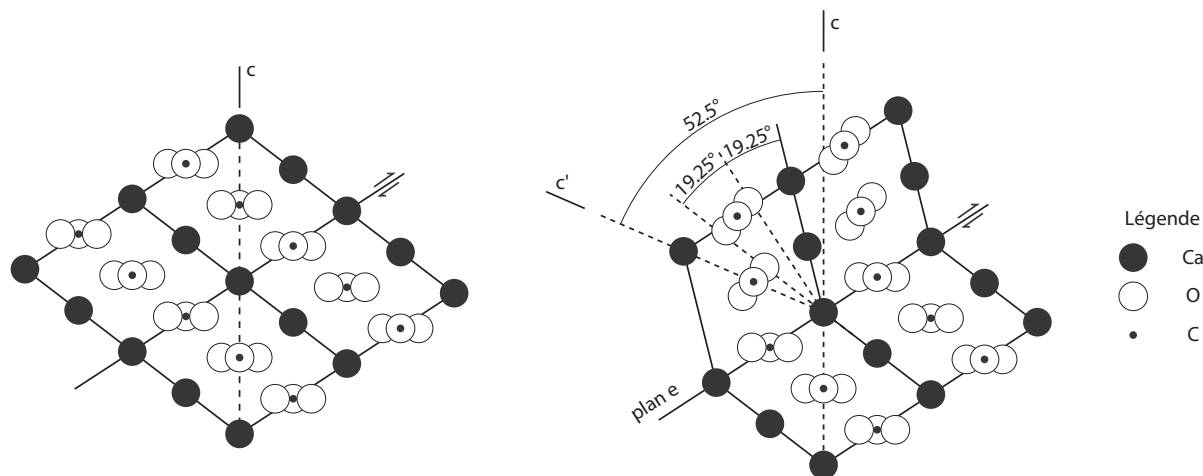
Une surface, la «twin boundary» sépare les deux régions du cristal maillé. Les réseaux cristallins de ces deux parties sont des images miroirs l'une de l'autre ; en d'autres termes, une «twin boundary» est un plan miroir dont les deux parties ont une orientation cristallographique spécifique. (**Figure 3**)



**Figure 3** : Illustration du maillage : on observe bien une partie du cristal qui est l'image miroir de l'autre partie. Les points noirs représentent des atomes.

Habituellement, les plans de maillages mécaniques ne sont pas des plans miroirs préexistants dans des cristaux non maillés. Donc, les macles mécaniques sont plus fréquentes dans les systèmes cristallographiques de faible symétrie (moins de plans miroirs préexistants). Il y a principalement la calcite, la dolomite (trigonal) et le feldspath (triclinique).

Les macles mécaniques sont produites en réponse à une contrainte de cisaillement lorsque celle-ci dépasse une certaine valeur (CRSS : critical resolved shear stress). Cette valeur est estimée à 5 MPa à 200°C par Bresser et Spiers (1997). Elle diminue avec une augmentation de température. Durant le maillage, le réseau du cristal pivote dans la direction qui produit le plus petit mouvement d'atomes, avec seulement une rotation des atomes de Ca et des molécule de CO<sub>3</sub>.



**Figure 4** : calcite avant et après maillage  
(van der Pluijm et Marshak)

La taille de grain influence le nombre de macle formées. Plus il est grand, plus le nombre de macles observables est important. Par contre, la formation des macles ne dépend que peu de la température, qui ne fait varier que faiblement la valeur de CRSS.( Rowe et Rutter, 1990). Mais celle-ci est malgré cette variation toujours de faible valeur.

Une augmentation de la température change la morphologie des macles (Burkhard,1993)

### 2.3. Cas de la calcite

Le fait que les macles prennent place le long de plans cristallographiques précis et que la rotation du réseau ne se fait que d'un angle donné permet de mesurer de faibles déformations (**Figure 4**)

Dans la **figure 5a**, un grain est déformé dans la position A'B'CD par une macle ; le grain original est le parallélogramme ABCD.

De cette figure, le cisaillement du grain est :

$$\gamma = \tan \psi = q / T$$

Pour une seule macle, p=q, donc :

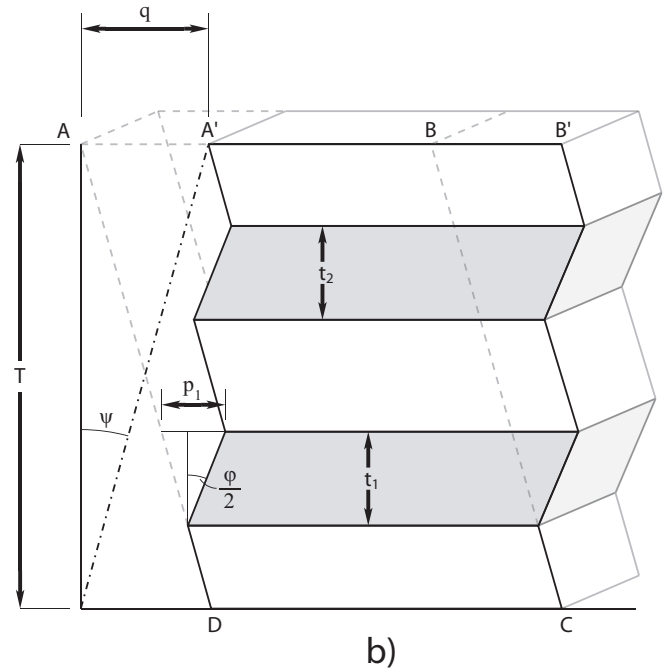
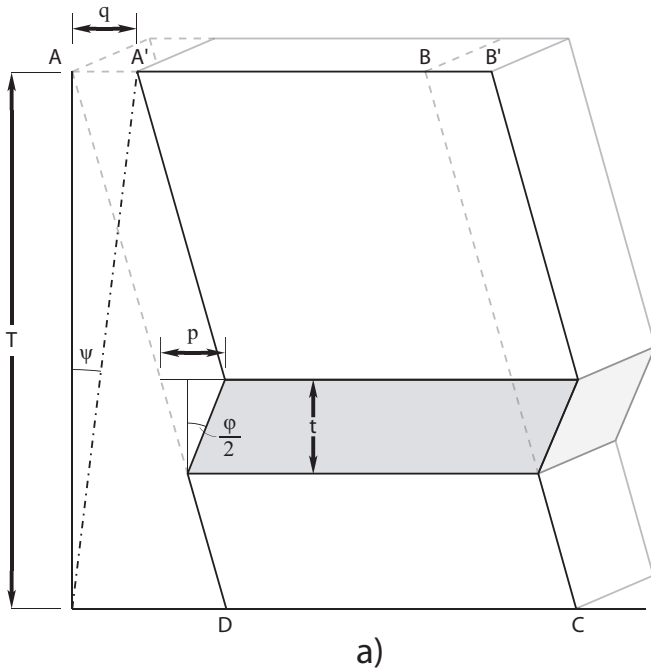
$$\gamma = (2t \tan(\varphi / 2) / T$$

où T est l'épaisseur du grain et t l'épaisseur de la macle.

Pour un grain contenant plusieurs macles (Fig. 5b), le cisaillement total est obtenu en additionnant le cisaillement de chaque macle :

$$\gamma = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^n t_i \tan(\varphi / 2)$$

où n est le nombre de macles. Etant donné que l'angle est constant dans le cas de la calcite (~38°), l'équation



**Figure 5a** : représentation d'un cristal avec une seule macle. (Macle en gris) (modifié d'après van der Pluijm et Marshak)

**Figure 5b** : Représentation d'un cristal avec plusieurs macles. (Macles en gris) (modifié d'après van der Pluijm et Marshak)

précédente devient : 
$$\gamma = \frac{0.7}{T} \pi \sum_{i=1}^n t_i$$

Ainsi en mesurant l'épaisseur totale des macles et la taille du grain perpendiculairement au plan de la macle, on peut obtenir le cisaillement total pour un seul grain. Dans une accumulation de grains de calcite, le cisaillement de chaque grain varie en fonction de l'orientation cristallographique individuelle de chaque grain par rapport à la déformation totale. On utilise ces variations pour déterminer l'orientation de l'axe principal de déformation.

C'est la base de la méthode CSG (Calcite Strain Gauge) de Groshong (1972) qui est utilisée dans ce diplôme.

Cette technique est très utile pour étudier les champs de faibles déformations dans les calcaires. Le grand avantage de cette méthode tient au fait que le maclage se forme même à faible pression et faible température, et que la magnitude et l'orientation de très faibles déformations peuvent être mesurées.

## **2.4. Conditions pour l'utilisation de la méthode CSG**

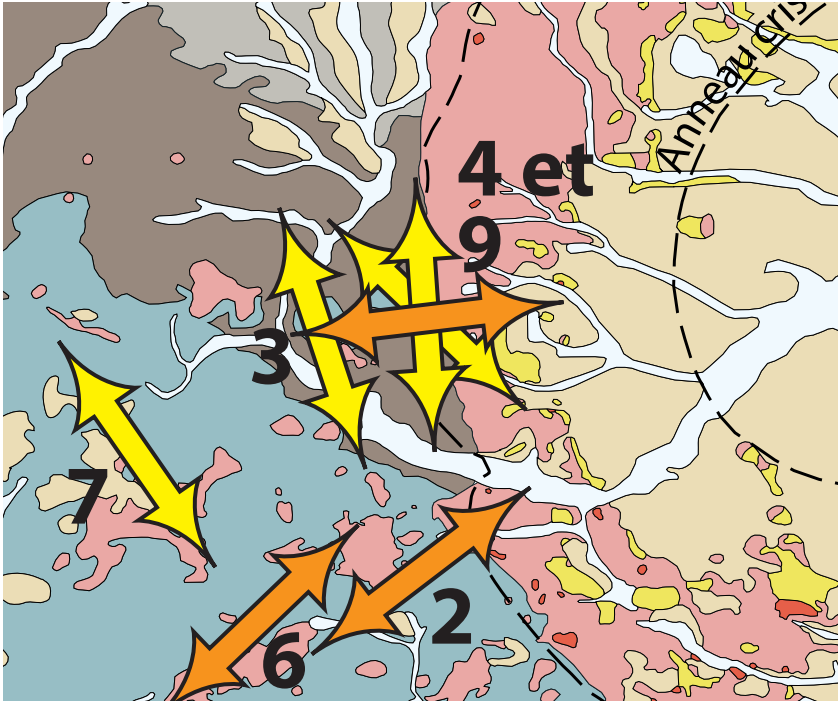
Pour que la méthode d'analyse des déformations de Groshong soit utilisable, il faut que certaines conditions soient remplies .

1. La contrainte est homogène à l'échelle de la lame mince.
2. Une faible contrainte à faible température.

Cette conditions est nécessaire pour que la déformation intracristalline principale soit le maclage dans le plan cristallin (e). Si cette condition n'est pas respectée, la déformation est accomodée par les plans r et f ou par dissolution et recristallisation du grain de calcite.

3. Les échantillons sont composés de grains de calcite automorphes ou sub-automorphes sans orientation cristallographique préférée.
4. La maclage mécanique a lieu sur les plans (e) si le cisaillement le long de la direction de maclage [ei:rj] est plus important que la valeur CRSS.

# 3



## Déformations au cratère du Nördlingen-Ries

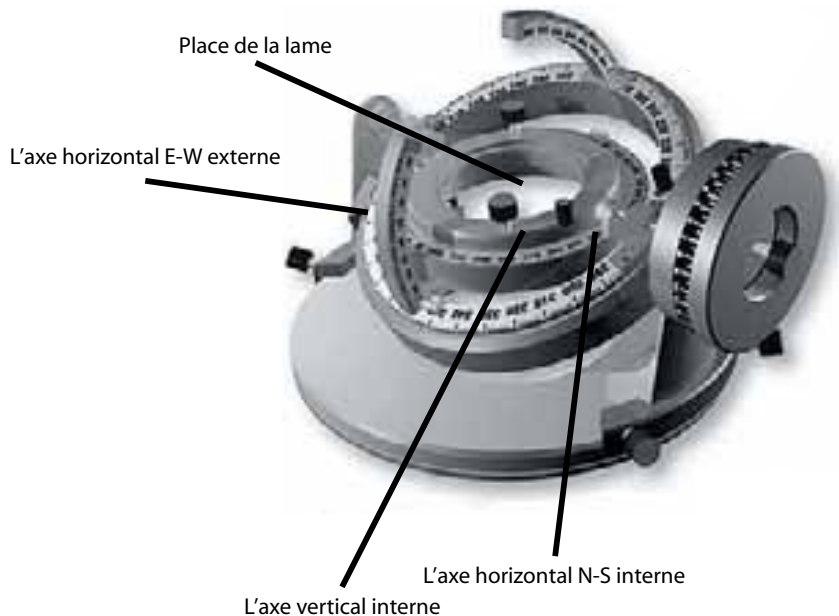
### 3.1. Introduction

La méthode Calcite Strain Gauge (CSG) de Groshong (1972) est utilisée dans des échantillons récoltés aux abords du cratère du Nördlingen-Ries. Des études similaires en Islande (Craddock, Farris, Roberson, 2004) et en Corée (Seong-Seung Kang, Jun-Mo Kim, Bo-An Jang, 2005) sont pris en exemple pour la méthodologie. Les résultats espérés sont la mesure des déformations et leur identification selon leur origine. On estime en effet avoir au minimum deux phases de déformation : la déformation alpine, de direction générale Nord-Sud et la déformation due à l'impact de la météorite, radiale au cratère.

### 3.2. La platine universelle Fedorov

La platine universelle Fedorov (*figure 1*) est positionnée sur un microscope optique ordinaire. Sa conception accepte les préparations classiques de lames minces qui peuvent être tournées dans des axes verticaux ou dans des axes horizontaux. Grâce à des échelles graduées en degrés, la table permet la mesure précise de

l'orientation de l'axe des cristaux et des macles. La table inclut un système pour l'ajustement de la calibration de la hauteur. Cela permet l'utilisation de lames minces d'épaisseur variable qui seront toujours à l'intersection des différents axes de mesures. Un autre moyen utilisé pour garantir la netteté de l'image est l'utilisation de 2 demi-sphères de verre au-dessus et au-dessous de la lame mince. De cette façon, avec l'emploi de glycérine entre les verres, les rayons lumineux sont déviés de la même manière quelle que soit la position de la table. On préfère la glycérine à d'autres huiles car elle est soluble à l'eau et non toxique.



**Figure 1** : Représentation d'une platine universelle Fedorov

### **3.3. Obtention des mesures**

Les mesures des macles et des axes c sont effectuées sur des lames minces (30µm). Il y a 3 lames perpendiculaires l'une à l'autre par échantillon de façon à observer toutes les orientations de mesures. En effet, la platine Fedorov ne tourne pas dans tous les sens, elle bute dans la platine du microscope pour des angles élevés.

Les mesures selon la méthode de Burkhard et Pfiffner (cahier de l'institut de géologie de Neuchâtel) décrite à *l'annexe I : utilisation de la table Fedorov*.

Les résultats sont notés sur une feuille de tableur par lame. Ces résultats sont aussi tracés sur un stéréogramme, ce qui nous permet de vérifier l'angle entre la macle et l'axe c. Celui-ci vaut ~26° pour le cristal de calcite. Cela permet la vérification de la mesure de la macle.

### **3.4. Observation sur l'inhomogénéité du nombre de mesures**

Une grande différence du nombre de macles est remarquée entre les lames. Cela varie entre aucune macle observée et 27 mesures. (*Annexe II*) Cela dépend de la nature sédimentaire de l'échantillon. Les lames où les mesures sont les plus nombreuses sont celles qui possèdent des veines de calcite sparitique. En effet, les grains de la calcite dans la micrite sont, par définition, trop petits pour être observés. On les observe cependant au microscope électronique à balayage. (Voir *chapitre 4*).

### **3.5. Passage dans le programme Cygwin**

Les mesures des macles sont introduites dans un fichier .txt. Le programme « ./twin » sous Cygwin (Groshong 1982) a besoin d'un fichier où les données sont organisées d'une manière précise. Un nouveau fichier est créé pour chaque échantillon. Ce fichier commence par des indications générales données au programme. Par exemple, le programme peut redonner les données d'entrées dans le fichier de sortie ou ne calculer que

certain types de résultats.

La suite du fichier est constituée par les mesures de macles qui sont regroupées par lame.

La première ligne de la partie lame est constituée par des données provenant des cosinus directeurs (**annexe V**). Ceux-ci permettent de réorienter la lame et ainsi d'avoir des résultats de déformation dans des coordonnées géographiques.

Les lignes suivantes sont occupées par les caractéristiques de la macle mesurée.

Le fichier se termine par un terme « 999. » qui indique la fin du programme.

Pour voir un exemple de fichier, voir l'**annexe III**.

## **3.6. Calcul sur les mesures**

Pour avoir des résultats satisfaisants, il faut vérifier les mesures afin de supprimer ou corriger les observations incorrectes. Les opérations suivantes permettent aussi de trier les différentes déformations selon leurs robustesses.

### **3.6.1 Vérification des mesures**

Les macles mesurées, ainsi que leur report dans les fichiers informatiques, sont vérifiées. Pour cela, on vérifie que l'angle entre l'axe c et la macle vaut  $26^\circ \pm 6^\circ$ . Cet angle est noté dans la colonne « angle(c,e) » du fichier de résultat. Voir **annexe IV: explication feuille de résultat**. Si l'angle est hors de ces limites, cette mesure est contrôlée sur le stéréogramme pour voir si une erreur a été faite lors de la retranscription sur le fichier informatique ou si on doit supprimer cette mesure. Dans ce dernier cas, l'erreur vient du fait que des fissures ou des limites de grain, et non des macles, sont mesurées.

### **3.6.2 Méthode des NEV (Negative Expected Value)**

La « Positive Expected Value » (PEV) est une valeur qui indique si la macle mesurée est cohérente avec la déformation calculée pour une lame (Groshong, 1974). Si la valeur est négative => NEV (Negative Expected Value), cela veut dire que la mesure ne devrait pas exister pour la déformation calculée. La raison probable est que la macle est originaire d'une autre déformation.

Pour nettoyer les mesures, on peut les supprimer des fichiers de mesures et voir si le résultat change significativement par rapport au fichier original.

Si les NEV sont nombreuses en proportion, leur origine est une autre phase de déformation. Ces mesures sont regroupées dans un nouveau fichier et un autre vecteur de déformation est alors calculé.

### **3.6.3 Robustesse des mesures : méthode des 15%**

15% des mesures les plus influentes par groupe de mesure sont exclues. (Groshong, 1976). Pour chaque échantillon, il y a deux groupes : NEV, sans NEV. On repère facilement les plus grands contributeurs car une colonne dans le fichier de résultat Cygwin donne l'ordre des contributions les plus influentes (classement des « tanpsi/2 - e.v. »). Cf : **file de résultat** dans l'**annexe IV**.

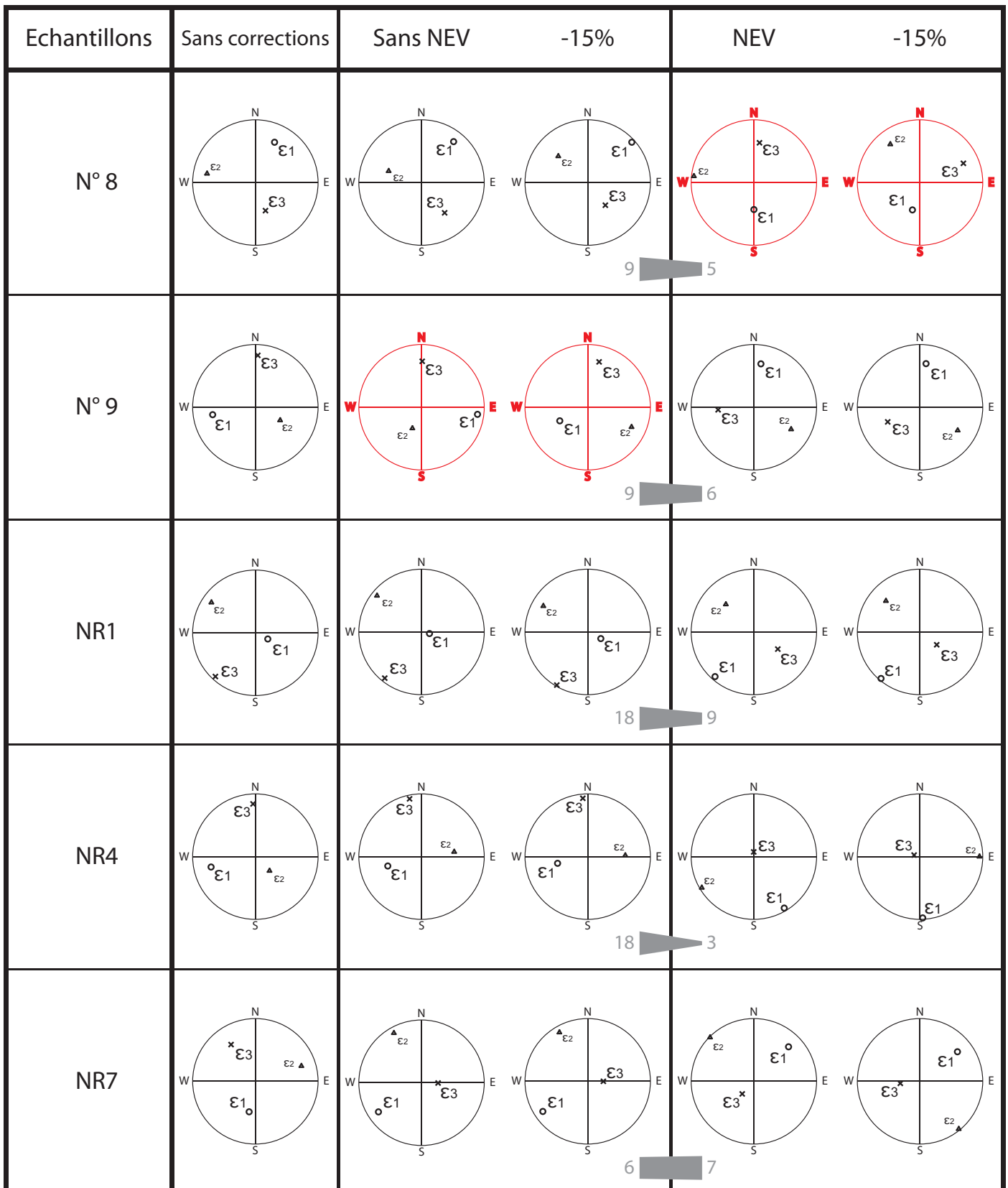
Après leurs suppressions, les nouveaux vecteurs de déformation sont calculés et comparés aux vecteurs des mesures initiales.

Des différences de  $25^\circ$  pour les azimuts et de  $25^\circ$  pour les pendages sont considérées comme acceptables. Cet angle correspond à deux fois l'écart-type de l'angle mesuré par Jamison et Spang (1976).

## **3.7. Résultats des mesures**

Les mesures de déformation des échantillons sont reportées sur des stéréogrammes. La **figure 2 et 3** permettent d'avoir un résumé des résultats.

Echantillons	Sans corrections	Sans NEV	-15%	NEV	-15%
N° 1					
			24	7	
N° 2					
			3	0	
N° 3					
			8	4	
N° 4					
			39	17	
N° 6					
			16	2	
N° 7					
			14	1	



**Figure 2**

Légende:

ε1: tension maximale  
 ε3: compression maximale  
 ε2: déformation minimale

: mesure peu robuste  
 (grande différence avec "-15%")

18 3 : proportion entre "sans" NEV et NEV

	e1 azimuth	e1 pendage	e3 azimuth	e3 pendage		e1 azimuth	e1 pendage	e3 azimuth	e3 pendage
échantillon sans NEV					que NEV				
1	309	43	176	37	1	184	23	36	63
2	167	3	52	84	3	203	18	332	62
3	14	51	163	35					
4	14	44	133	27	4	141	40	356	44
6	80	41	225	43	6	328	37	165	52
7	63	2	326	76	7	50	7	289	76
8	39	18	144	39	8	181	55	9	35
9	97	11	1	29	9	9	31	265	43
NR1	102	79	219	5	NR1	222	5	125	53
NR4	253	44	348	5	NR4	150	5	355	85
NR7	236	16	91	71	NR7	45	24	224	66

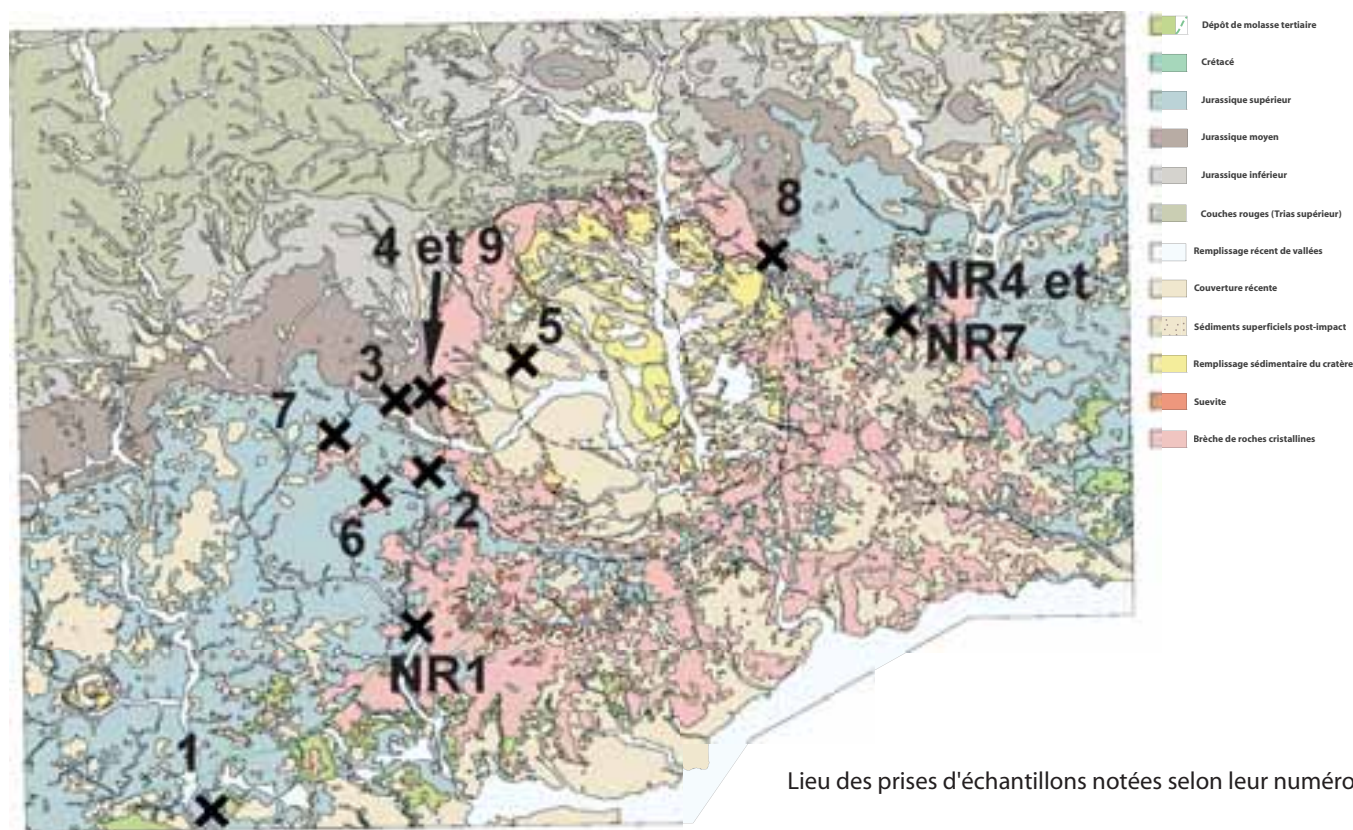
Figure 3: Tableaux des orientations des déformations calculées avec les macles

### 3.8. Observation sur les mesures

Les positions des échantillons sont représentées sur la carte de la *figure 4*.

En général, les macles classées dans la catégorie « sans NEV » sont plus nombreuses que les macles dans la catégorie « NEV ». Mais pour l'échantillon NR7, l'inverse se produit. Ceci est normal, car c'est la contribution ( $\approx$  épaisseur cumulée des macles) pour les calculs et non le nombre de macles qui importe pour le choix du groupe.

Pour les échantillons 3,6,7,8, les mesures peu robustes comportent peu de macles. De grands changements de



Lieu des prises d'échantillons notées selon leur numéro

Figure 4: Lieux des prises d'échantillons

direction sont observés sur les vecteurs de déformation. Cela indique que ces quelques macles n'ont pas pour origine une grande déformation homogène. Elles sont à considérer comme du « bruit » dans les mesures. Pour l'échantillon 9, la mesure « sans NEV » est peu robuste, bien qu'elle contienne plus de macles que la mesure « NEV ». Cela peut s'expliquer en observant en détail le fichier de la macle. Pour le calcul de robustesse, on enlève 15% des 9 mesures, ce qui correspond à une macle (ici, le grain 8 de la lame 9.1). Le pourcentage de la zone maclée pour ce grain est très important. Il influence donc beaucoup le calcul de déformation. Lorsque cette macle est ôtée pour le calcul de déformation, sa grande influence disparaît, ce qui explique la différence entre le résultat « sans NEV » et « NEV ».

L'échantillon 3 est particulier car toutes les macles peuvent provenir de la même contrainte. Il n'y a donc aucune NEV. Mais il faut souligner que ces lames ne possèdent que très peu de macles observables.

### **3.9. Mesures sur la carte**

Les déformations calculées sont représentées sur une carte géologique simplifiée du cratère du Ries. Les cartes sont placées à la fin de ce chapitre.

#### **3.9.1 Première carte**

Il s'agit des résultats de calculs de déformations sans distinction entre NEV et sans NEV. Cela correspond à la colonne « sans corrections » de la *figure 2*. Cette carte ne donne pas beaucoup d'informations utilisables.

#### **3.9.2 Deuxième carte**

Les déformations sont représentées selon leur origine dans le calcul du programme ./twin. Les « NEV » sont les flèches jaunes, les « sans NEV » les flèches oranges.

Pour certaines localisations, les directions sont très bien superposées. Il s'agit par exemple de la mesure « sans NEV » de l'échantillon NR4 avec la mesure « NEV » de l'échantillon NR7. Ce sont donc les mesures de la même contrainte mesurées dans deux échantillons éloignés de seulement quelques mètres.

La même chose se produit aussi pour la mesure « sans NEV » de l'échantillon 9 avec la mesure « NEV » de l'échantillon 4.

Pour l'échantillon 3, les directions des mesures sont sur un même plan vertical, bien que les vraies directions soient perpendiculaires. Donc leurs déformations semblent semblables sur la carte.

#### **3.9.3 Troisième carte**

Il s'agit d'une représentation des déformations sans NEV ainsi que des contraintes calculées en ôtant 15% des plus importants contributeurs : catégorie -15% dans la *figure 2*.

Les variations d'azimut entre les deux calculs de déformations ne varient que peu, quels que soient les échantillons. La différence fluctue de 0.2° pour l'échantillon 8 à 23° pour l'échantillon 7.

Pour l'échantillon 9, qui était classé comme peu robuste après l'observation des stéréogrammes, les deux azimuts des contraintes ne sont séparés que de 10° sur la carte.

#### **3.9.4 Quatrième carte**

Il s'agit d'une représentation des déformations les plus faibles mesurées des échantillons « NEV » ainsi que des déformations calculées en ôtant 15% des plus importants contributeurs : catégorie -15% dans la *figure 2*.

Par rapport à la carte précédente, les mesures sont beaucoup plus dispersées. Cela confirme l'observation faite sur les stéréogrammes.

Pour les échantillons 1; 4; 9; NR1 et NR7, les différences respectives d'azimuts entre les deux calculs de déformations ne sont pas très élevées. Cela varie de 0.1° pour l'échantillon NR7 à 21° pour l'échantillon 4.

Les échantillons 3, 6 et 8 sont considérés comme peu robustes car la différence d'azimuts entre les deux calculs de contrainte vaut respectivement  $29^\circ$ ,  $80^\circ$  et  $57^\circ$ . Cela est plus que la limite acceptable de  $25^\circ$ .

Pour l'échantillon 7, les mesures de déformations restent les mêmes, car il n'y a qu'une seule mesure. Avec si peu de macles, il est logique de considérer la mesure comme peu robuste.

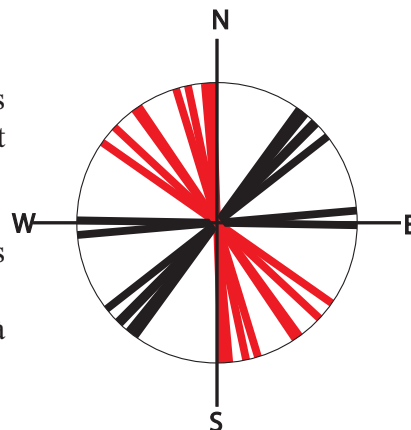
Pour l'échantillon NR4, la différence d'azimut sur la carte est importante. Pourtant la robustesse sur le stéréogramme paraît bonne. Cela s'explique par le fait que la contrainte calculée est très verticale et qu'une petite variation réelle se traduit par un grand changement d'azimut.

L'échantillon 2 n'est pas représenté car il ne contient aucune mesure appartenant au groupe « NEV ».

### 3.9.5 Cinquième carte

Sur cette carte sont représentées toutes les déformations qui sont considérées comme robustes. Elles sont reprises des deux cartes précédentes et proviennent indifféremment de calculs avec NEV ou sans NEV.

On remarque que les contraintes semblent orientées selon deux axes préférentiels : NNW-SSE ou radialement par rapport au cratère: environ NE-SW. Voir graphique à droite.



### 3.9.6 Sixième carte

Il s'agit des mêmes déformations que la cinquième carte où les mesures sont triées selon leur origine estimée. Celles-ci peuvent être le cratère d'impact, la formation des Alpes. Certaines contraintes sont classées sous « inconnu ». Cela est le cas pour les échantillons 1 NEV, NR4 NEV et NR7 NEV.

Un critère d'angle est utilisé pour différencier les contraintes d'origine alpine de celles provenant de l'impact de la météorite. Si l'azimut de la contrainte est orienté dans la direction de  $150^\circ \pm 25^\circ$  par rapport au Nord, la déformation est considérée comme provenant de la formation alpine.

Pour que la contrainte soit considérée due à l'impact, il faut que la différence d'angle entre la droite provenant du centre du cratère et l'azimut du calcul de déformation vaille moins de  $25^\circ$ .

Il ne faut pas oublier de prendre en compte l'angle de l'azimut  $+180^\circ$ , puisque la déformation est en fait une direction sans sens.

Pour les mesures NEV de l'échantillon 1, l'azimut de la contrainte ne permet pas d'être catégorique sur l'origine de la déformation car elle est très proche en orientation de la formation des Alpes. Mais on peut supposer que la mesure NEV de l'échantillon provient du cratère car elle est parfaitement alignée sur la radiale provenant du centre du cratère.

Pour les mesures NEV de l'échantillon NR4, la déformation calculée est quasi-verticale : environ  $84^\circ$ . Cette mesure ne donne pas d'information sur une contrainte horizontale. Son origine peut être due à la compression créée par le poids des sédiments se trouvant au-dessus de l'échantillon. (Lespinasse, Cathelineau, 1995)

## **3.10. Discussion des résultats et de leurs placements sur la carte**

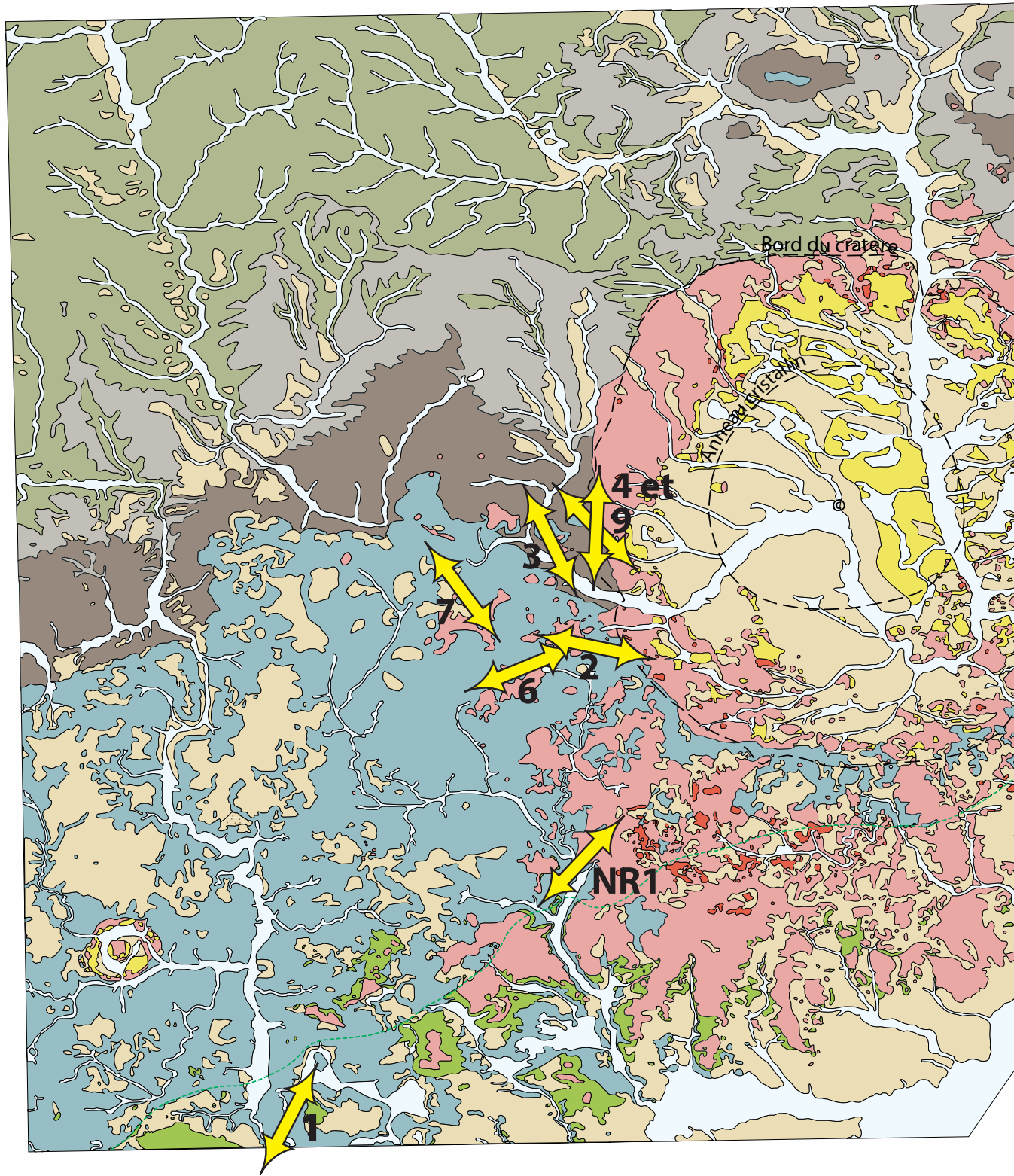
On remarque que les différentes déformations calculées sont cohérentes avec le modèle de deux déformations: alpine et due au cratère d'impact. Mais pour cela, il faut d'abord effectuer des calculs de robustesse et supprimer certaines macles mesurées. Par exemple, pour la carte 6, sur les 225 macles mesurées, seulement 203 sont utilisées. Donc environ 10% sont ôtées, car donnant des résultats trop peu robustes. Retirer des données

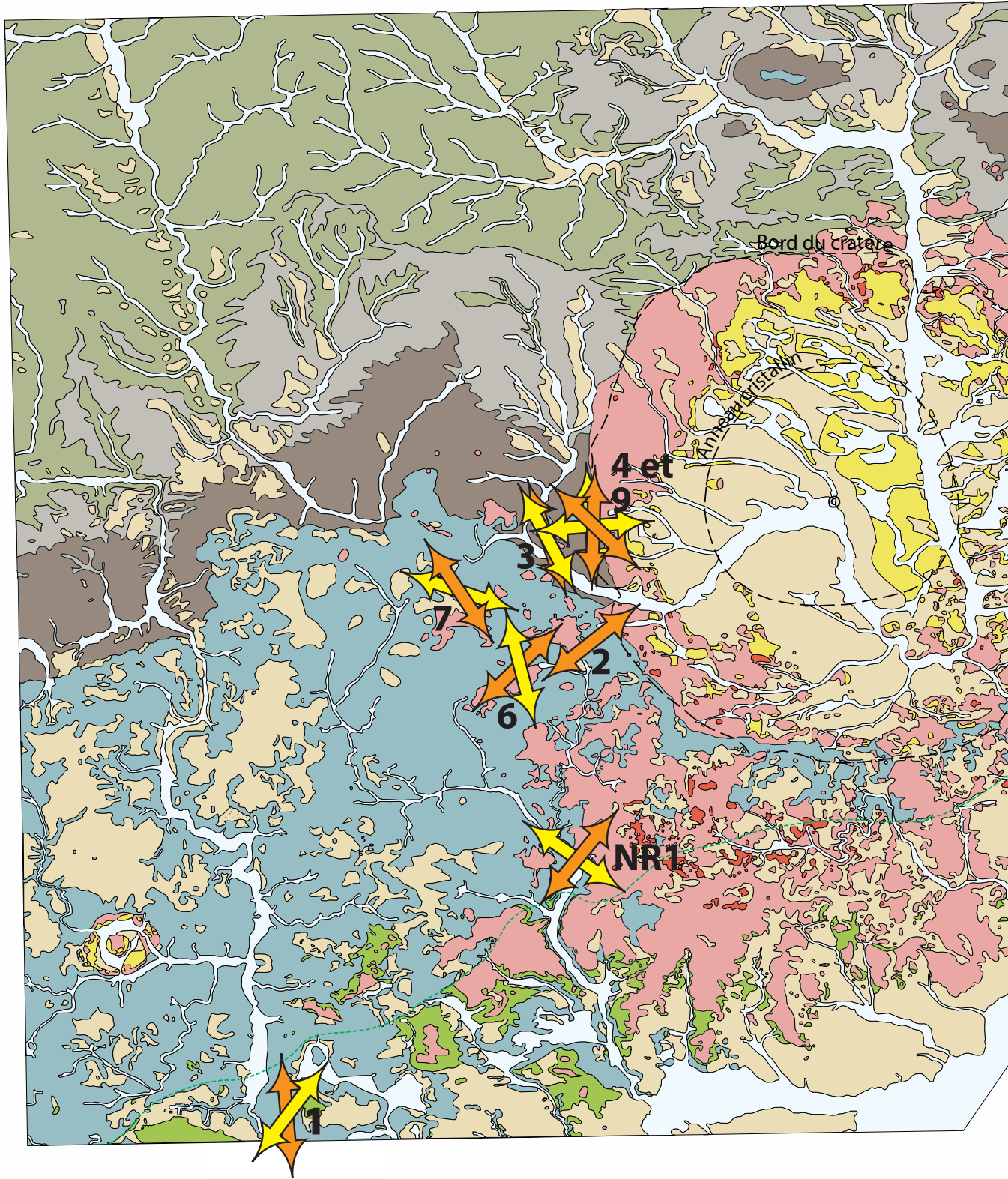
implique qu'il faut faire suffisamment de mesures par échantillons pour avoir des résultats robustes. Le problème de cette étude est que plusieurs échantillons sont principalement micritiques et donc ne possèdent que peu de macles mesurables.

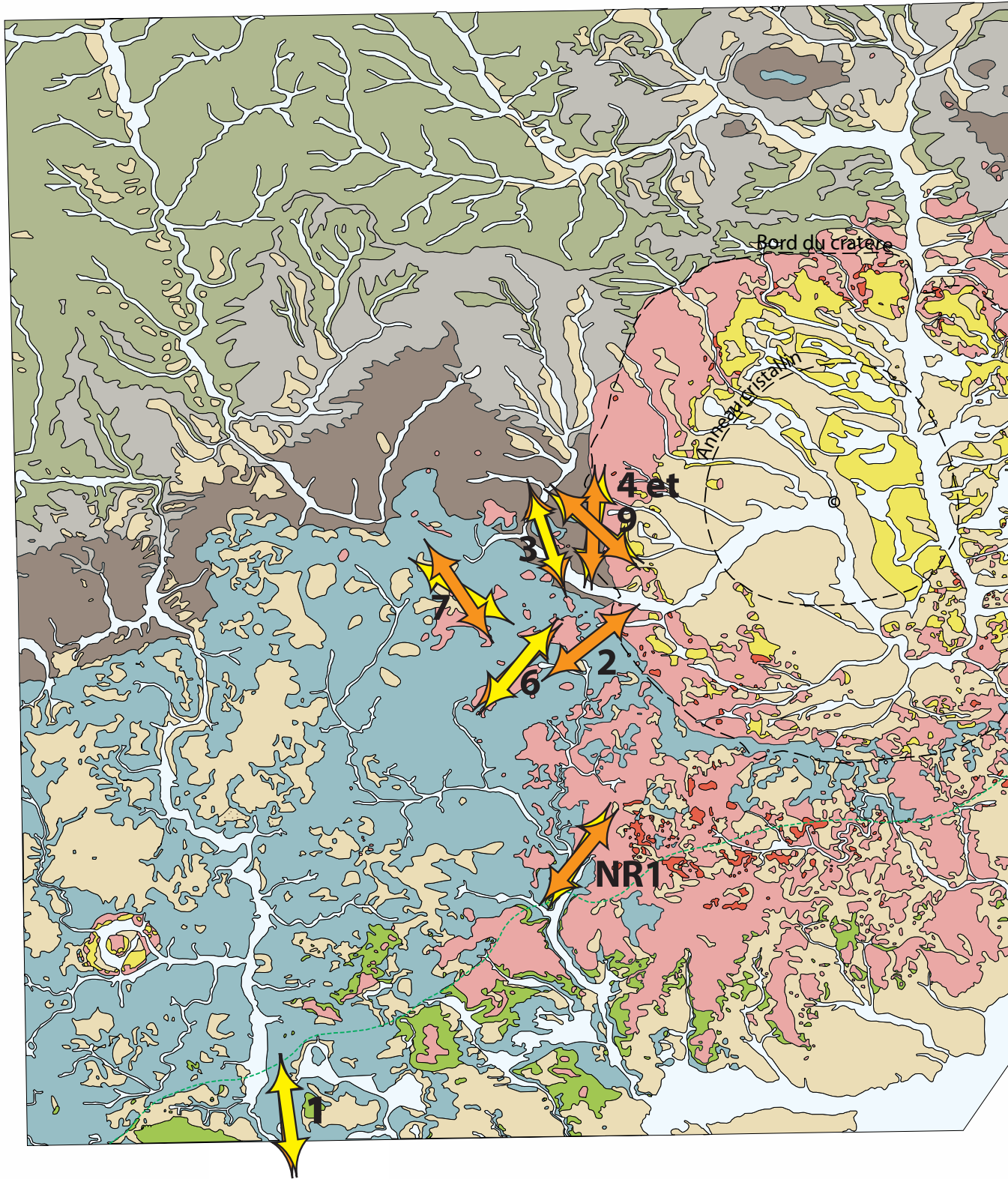
On remarque que la déformation est mesurée jusqu'à 40 km du centre du cratère, bien que la mesure qui provient de l'échantillon 1 ne soit pas très sûre. En effet, cette contrainte mesurée peut provenir de la formation des Alpes. Dans ce cas-là, la déformation due au cratère la plus lointaine serait observée dans l'échantillon NR1 à environ 20 km du centre du cratère.

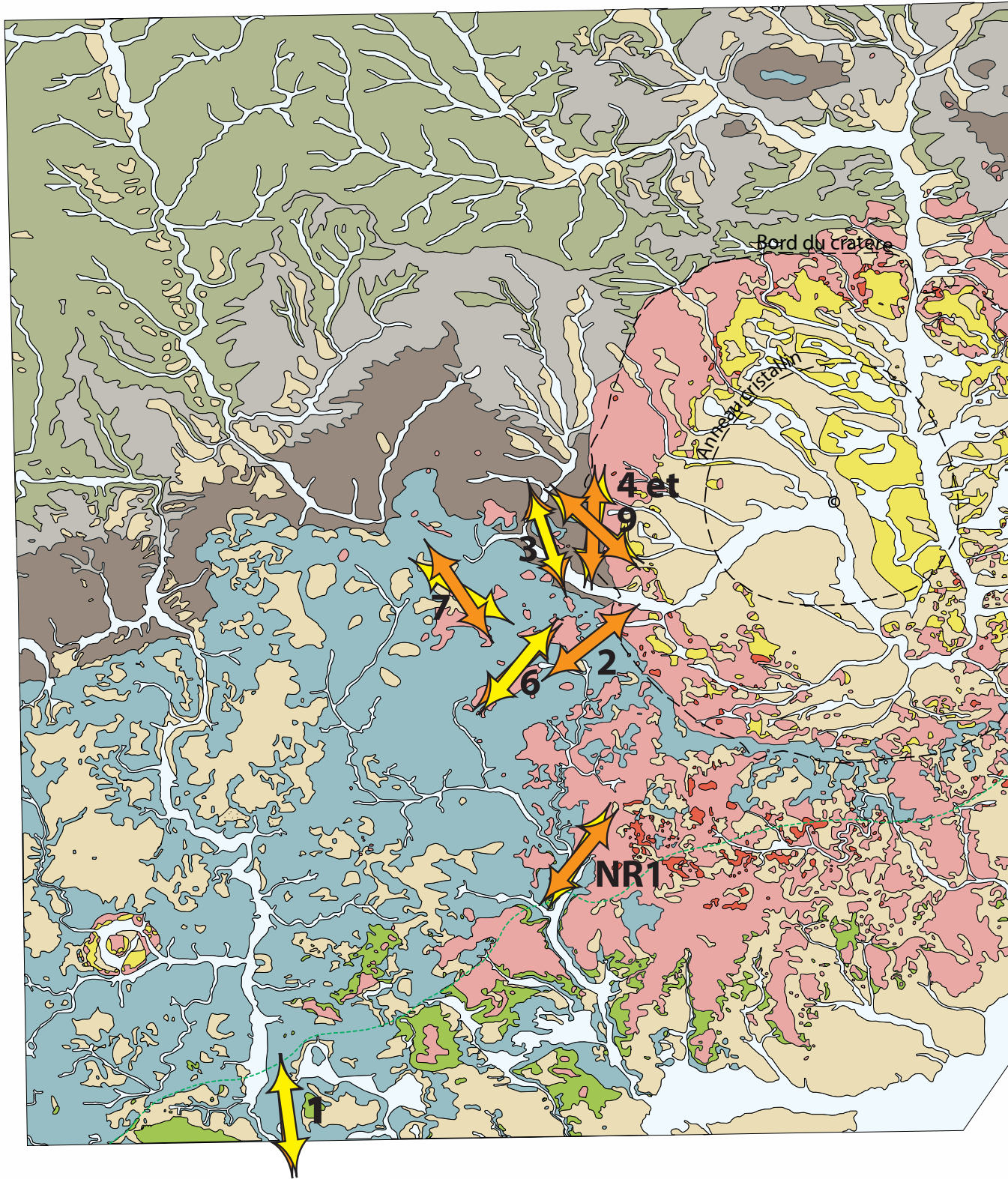
Il manque des échantillons entre ces deux distances pour affiner la zone d'influence de l'impact dans les roches.

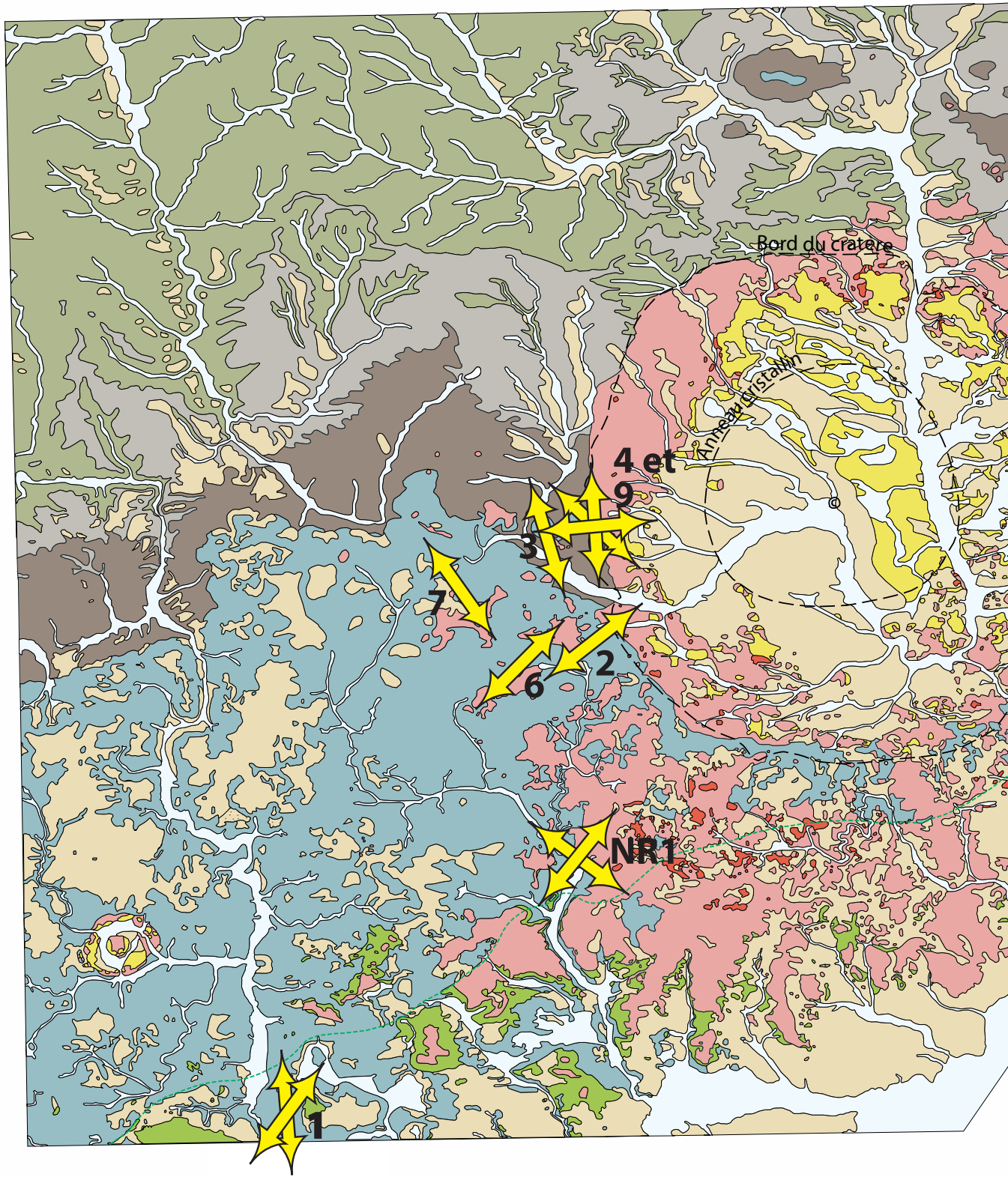
La méthode ne permet pas de connaître l'historique des déformations. Il n'y a aucun recoupement visible de macles entre elles. Cela s'explique par le fait que la déformation est faible. Un grain maclé devient plus difficile à re-macler dans une autre orientation (Lacombe, 2006). De plus, les macles sont de type I, donc très fines ; un recoupement serait peu marqué et donc difficile à observer.

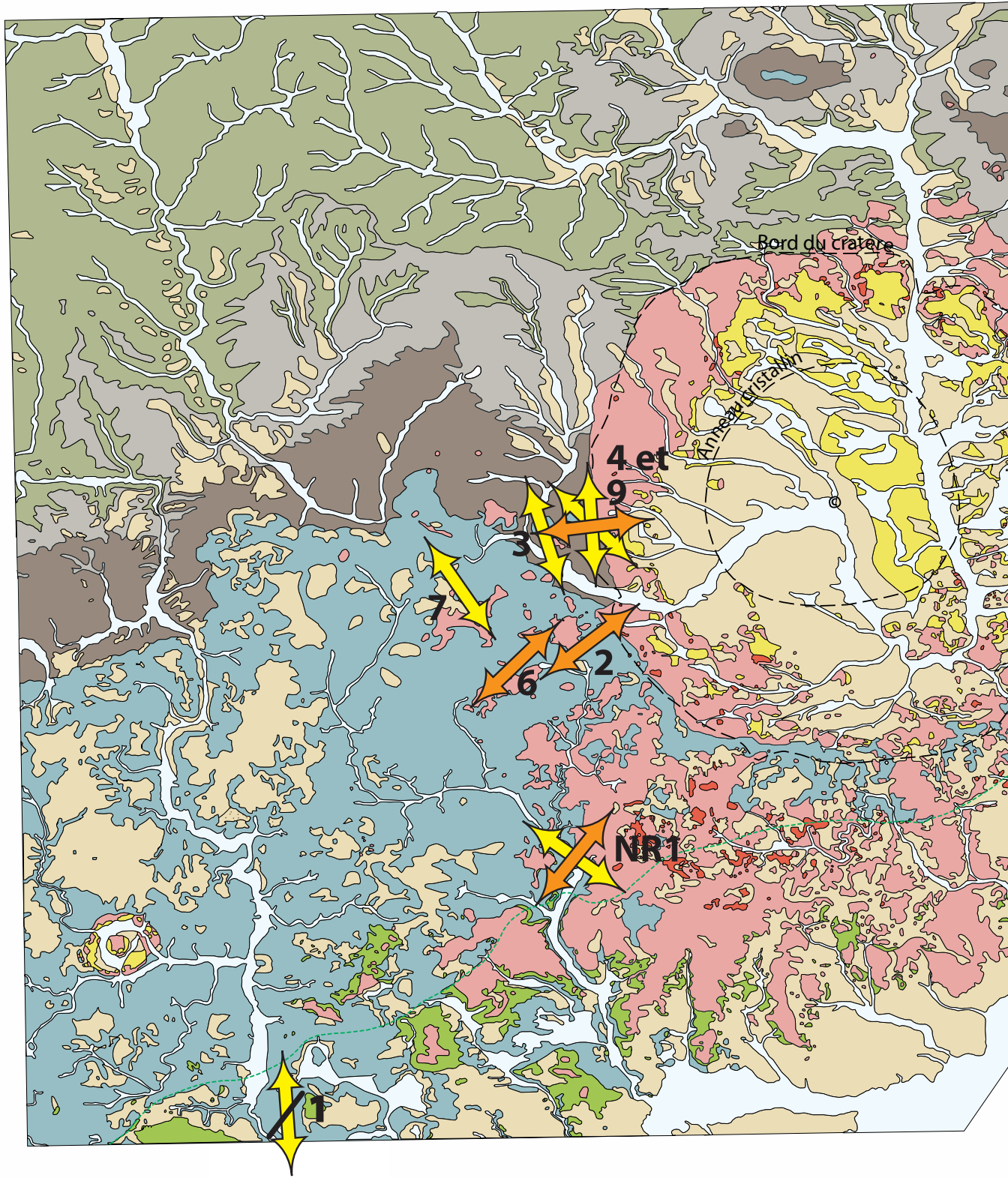




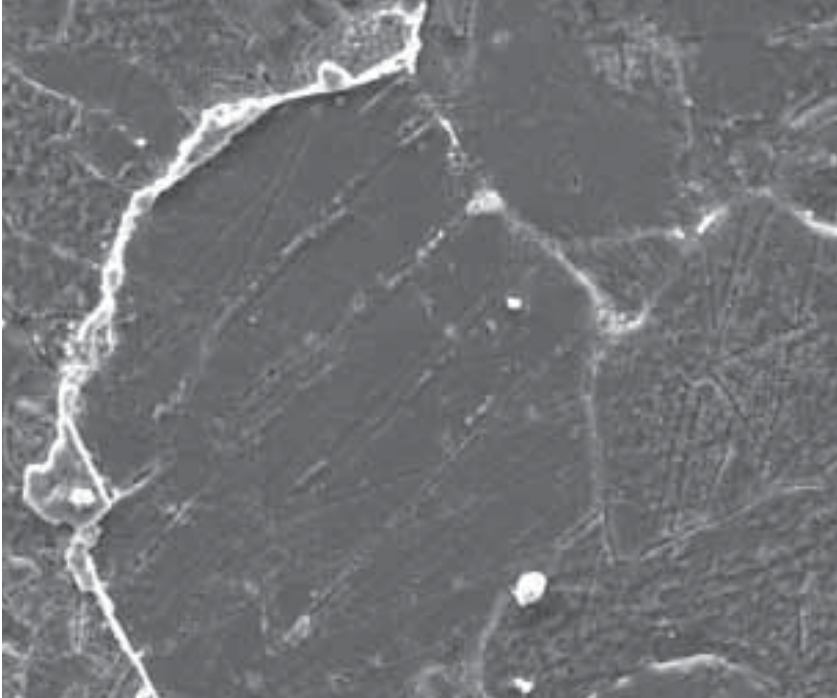








# 4



## Microscopie électronique à balayage

### 4.1. Introduction

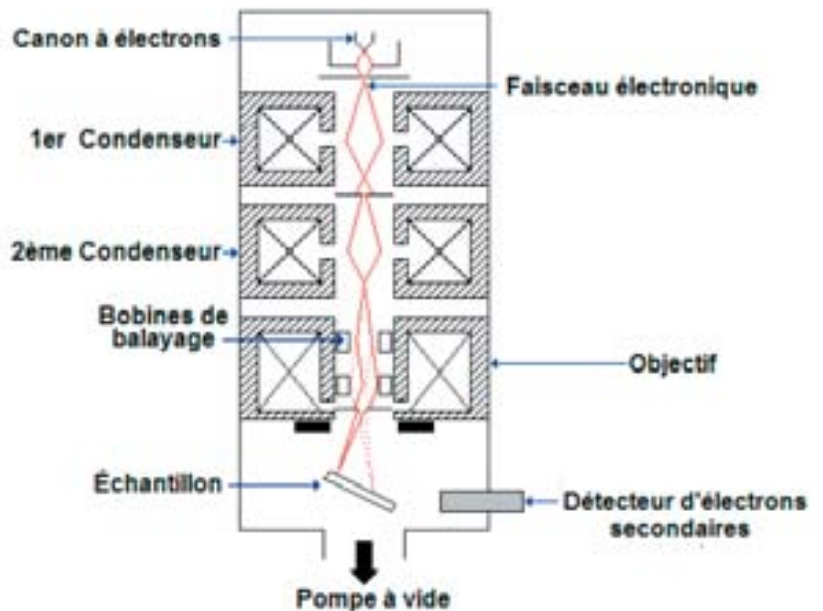
La microscopie électronique à balayage permet d'observer les macles dans une autre perspective. En effet, la méthode utilise une attaque à l'acide et les macles se creusent. Les images obtenues donnent donc des observations en 3 dimensions des macles.

Le grand agrandissement possible du microscope permet de rechercher des lamelles de choc, telles que créés dans des quartzs déformés. Les lamelles de choc se forment par déformation intracristalline du grain. Il se forme de multiples sous-grains qui absorbent la contrainte par rotation de leur réseau cristallin. (Van der Pluijm, Marshak)

## 4.2. Méthode

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique de microscopie basée sur le principe des interactions entre un flux d'électrons et l'échantillon à étudier. Un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Différents détecteurs permettent d'analyser ces particules et de reconstruire une image de la surface. (*Fig1*)

La détection des électrons secondaires est le mode classique d'observation de la morphologie de la surface. Certains électrons émis par le microscope cèdent une partie de leur énergie cinétique aux atomes de l'échantillon, provoquant l'ionisation de ceux-ci par éjection d'un électron dit « secondaire ». La zone de réémission est du même ordre de grandeur que le diamètre du faisceau. La résolution du microscope est donc le diamètre du faisceau, soit environ 10 nm. Une grille placée devant le détecteur d'électrons, polarisée positivement (200-400 V), attire les électrons réémis. La quantité d'électrons secondaires produite ne dépend pas de la nature chimique de l'échantillon, mais de l'angle d'incidence du faisceau primaire avec la surface : plus l'incidence du faisceau primaire est rasante, plus le nombre d'électrons secondaires mesurables est important, d'où un effet de contraste topographique (une pente apparaît plus « lumineuse » qu'un plat). Cet effet est renforcé par le fait que le détecteur est situé sur le côté ; les électrons provenant des faces situées « dos » au détecteur sont réfléchis par la surface et arrivent donc en plus petite quantité au détecteur, créant un effet d'ombre. (Gnos et *al.*, juin 2006)



*Fig 1* : Schéma de fonctionnement d'un microscope électronique à balayage.

Plusieurs échantillons sont observés avec un microscope électronique à balayage. Ces images permettent de documenter les macles des grains de calcite et de rechercher les lamelles de choc potentielles.

## 4.3. Choix des échantillons

Le choix des échantillons se fait sur la base des observations au microscope optique conventionnel. On sélectionne des talons de lames minces où se trouvent de nombreuses macles, mais aussi des talons de lithologies différentes. Pour cette étude, les talons des lames, 1.1, 9.1 et NR4.3 sont choisis. De plus, une surface fraîchement cassée de l'échantillon 4 est aussi observée.

## 4.4. Préparation des surfaces pour l'observation au MEB

Pour faire ressortir les limites de grains et les macles, on utilise l'attaque à l'acide sur les surfaces polies à observer ; méthode décrite par Marco Herwegh (2000).

Pour une description plus précise de la méthode, voir chapitre l'*annexe VII*.

L'échantillon est recouvert d'une couche de carbone pour augmenter la conductivité électrique et est observé au microscope électronique à balayage. L'appareil utilisé est le Philips XL-30 ESEM de l'Institut de microtechnique de l'Université de Neuchâtel. (*Fig2*)



*Fig 2: Microscope électronique Philips XL-30 ESEM (site internet Philips)*

## **4.5. Observations**

On remarque que l'attaque acide met bien en évidence les macles et les limites de grains, et supprime pratiquement toutes traces du polissage lors de la préparation des échantillons.

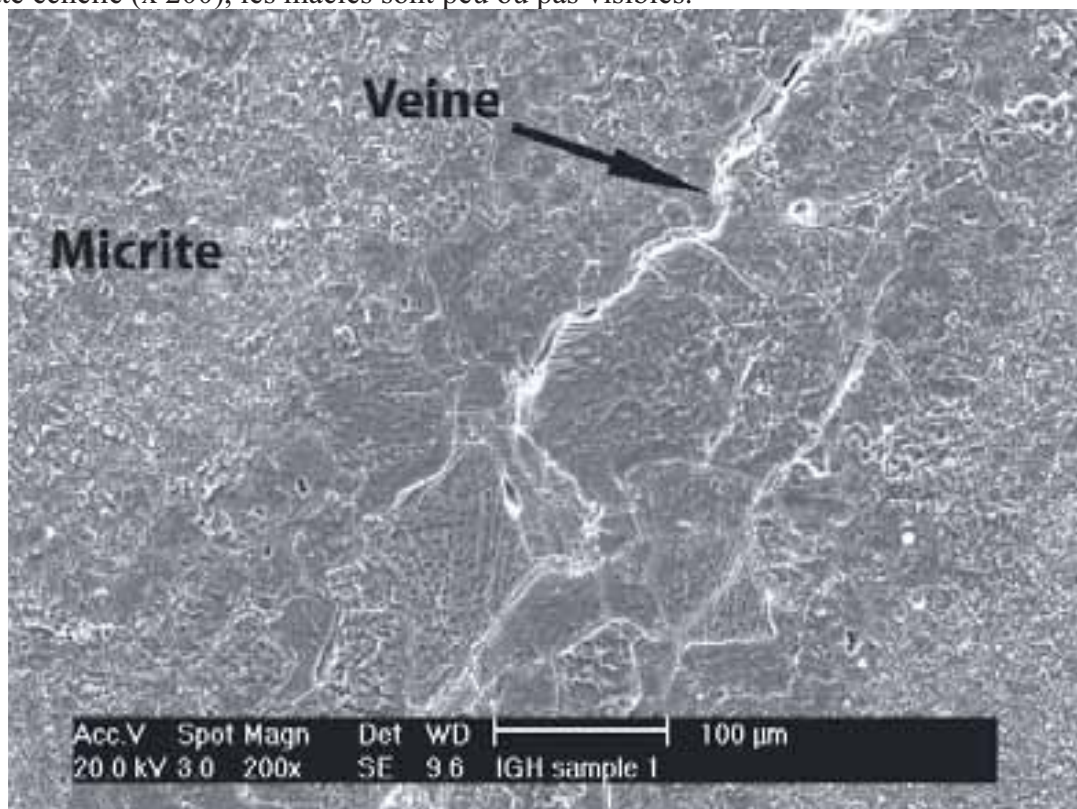
Il reste quelques artefacts de polissage sur l'échantillon 9.

Sur chaque photo sont notées la magnitude et une échelle en  $\mu\text{m}$ . Les autres notations indiquent les caractéristiques du microscope électronique lors des mesures. Il y a la tension de mesure (20kV), le type de mesure (Det : électrons secondaires), la distance de mesures jusqu'à l'échantillon (WD: Working Distance) et le nom de l'échantillon.

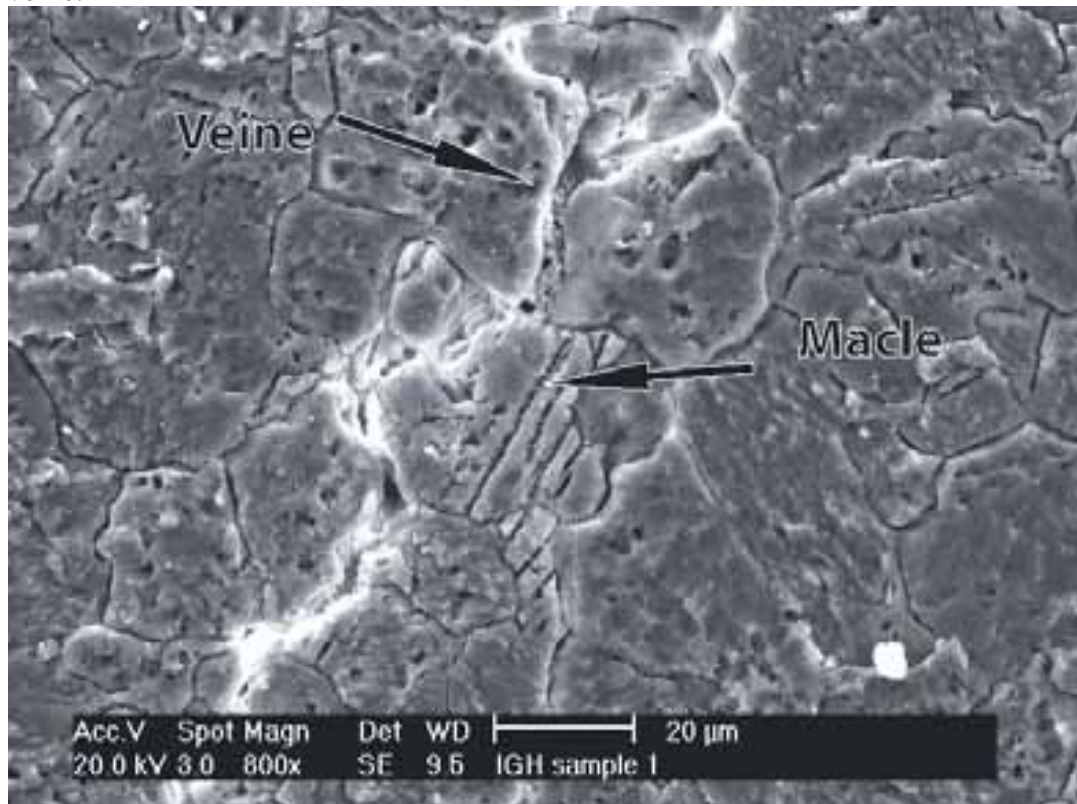
### **4.5.1 Echantillon 1**

Il s'agit d'images du talon 1.1. C'est un échantillon principalement micritique. Des grains de plus grandes tailles ( $\sim 50\text{-}100 \mu\text{m}$ ) se trouvent dans des veines traversant l'échantillon.

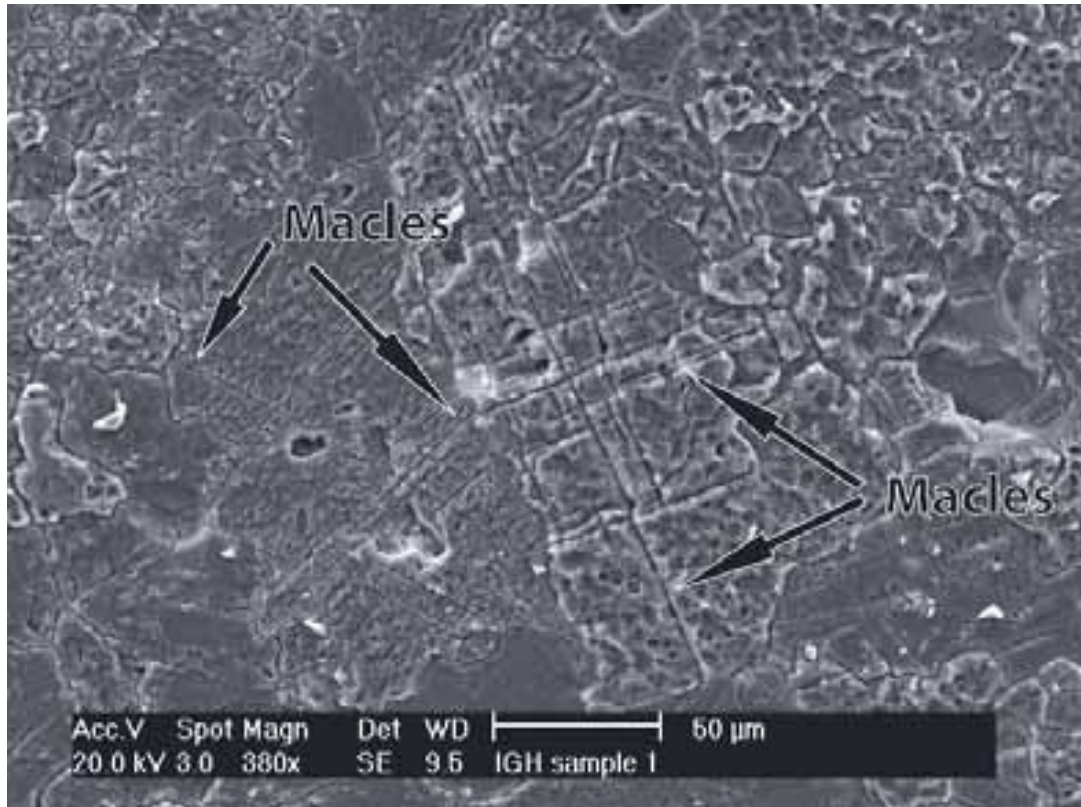
IGHS101 : Vue d'une veine avec des grains sparitiques. Les cristaux de micrites sont de part et autre de la veine. A cette échelle (x 200), les macles sont peu ou pas visibles.



IGHS103 : Macles sur un grain en bordure de la veine. L'acide a préférentiellement attaqué la fracture du centre de la veine.



IGH105 : Deux grains de calcite avec chacun deux famille de macles. L'angle entre les familles de macles vaut  $45^\circ$ , mais l'angle visible dépend du plan de coupe du cristal. Les tailles des macles sont différentes selon les grains.



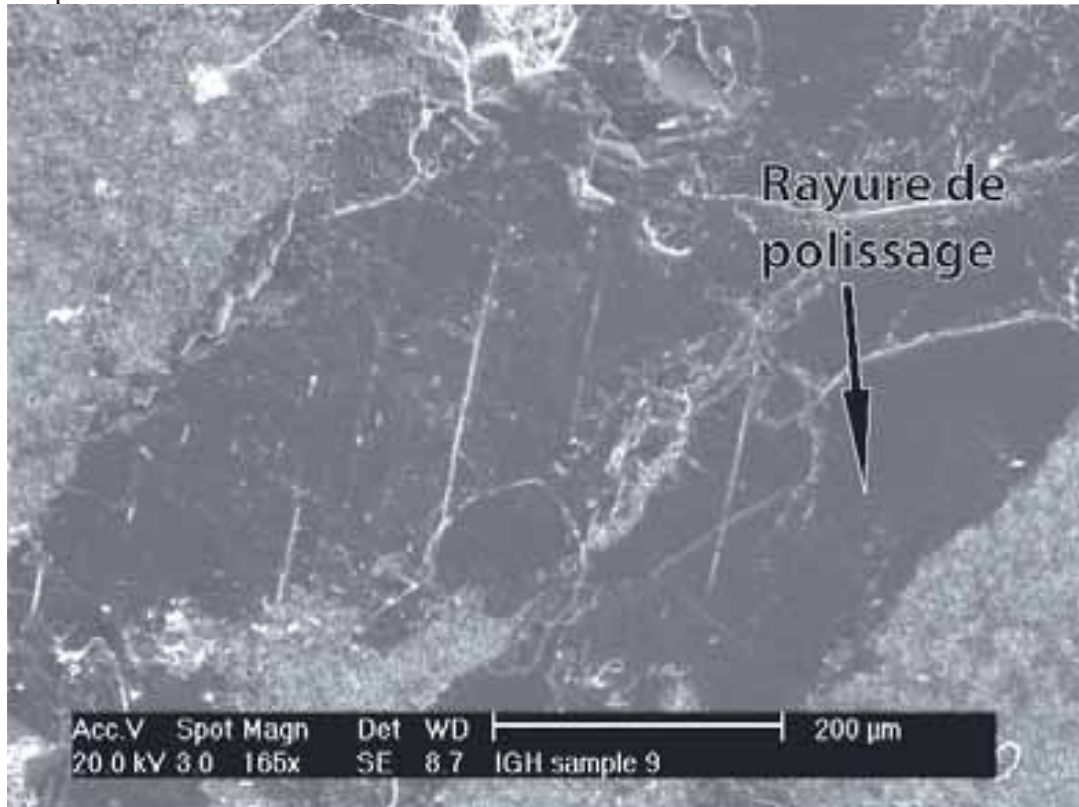
IGH106 : Vue agrandie du grain gauche de l'image précédente.



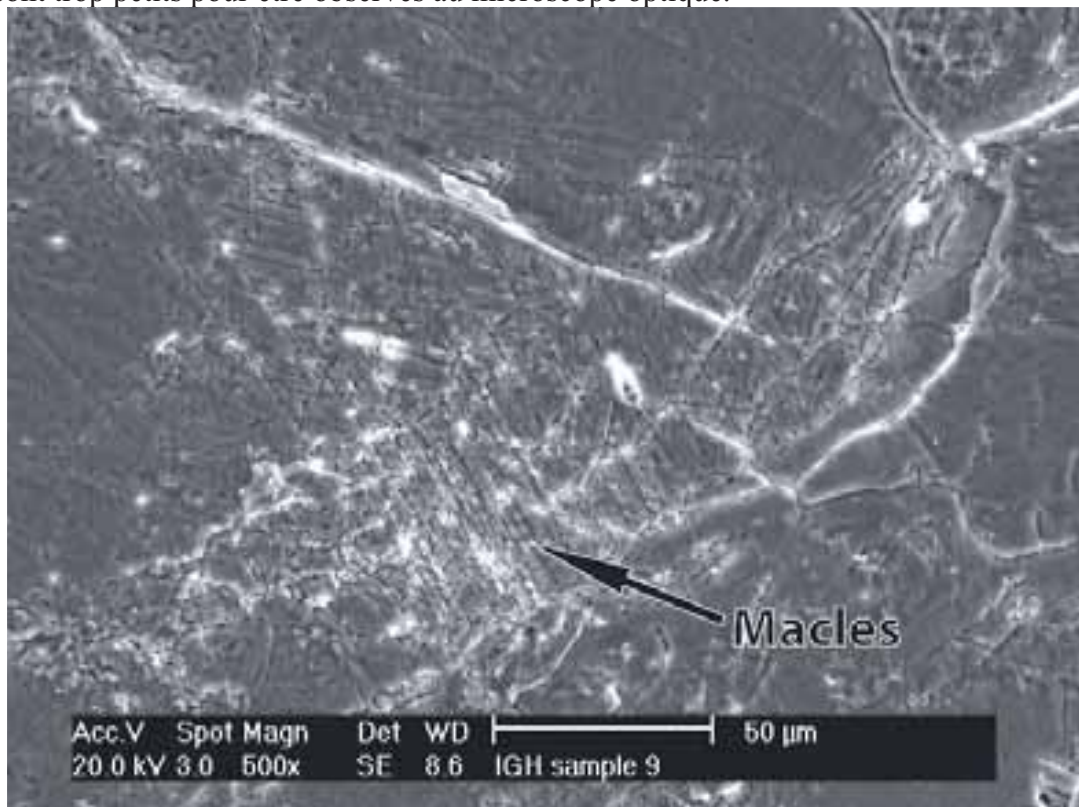
#### 4.5.2 Echantillon 9

Il s'agit d'images du talon 9.1. C'est un échantillon principalement micritique. Il est très fracturé, mais les grains sparitiques ne sont pas le long de veines, contrairement à l'échantillon 1. Les grains sparitiques se trouvent en groupe dans la matrice.

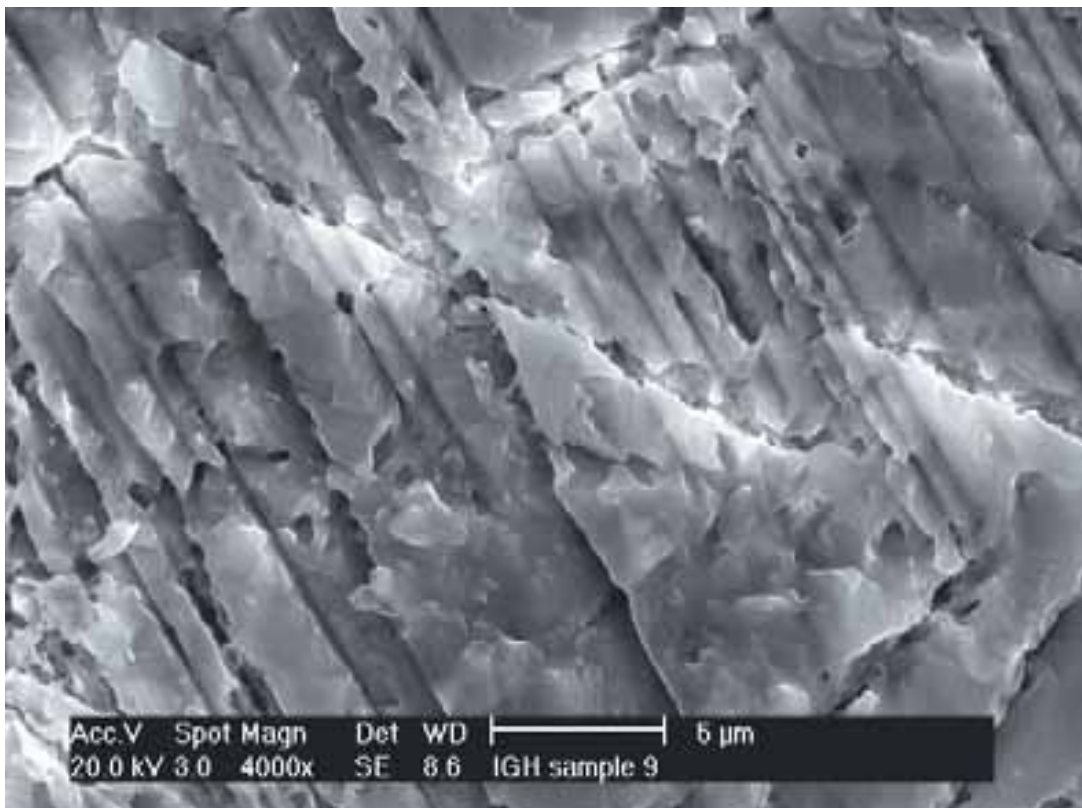
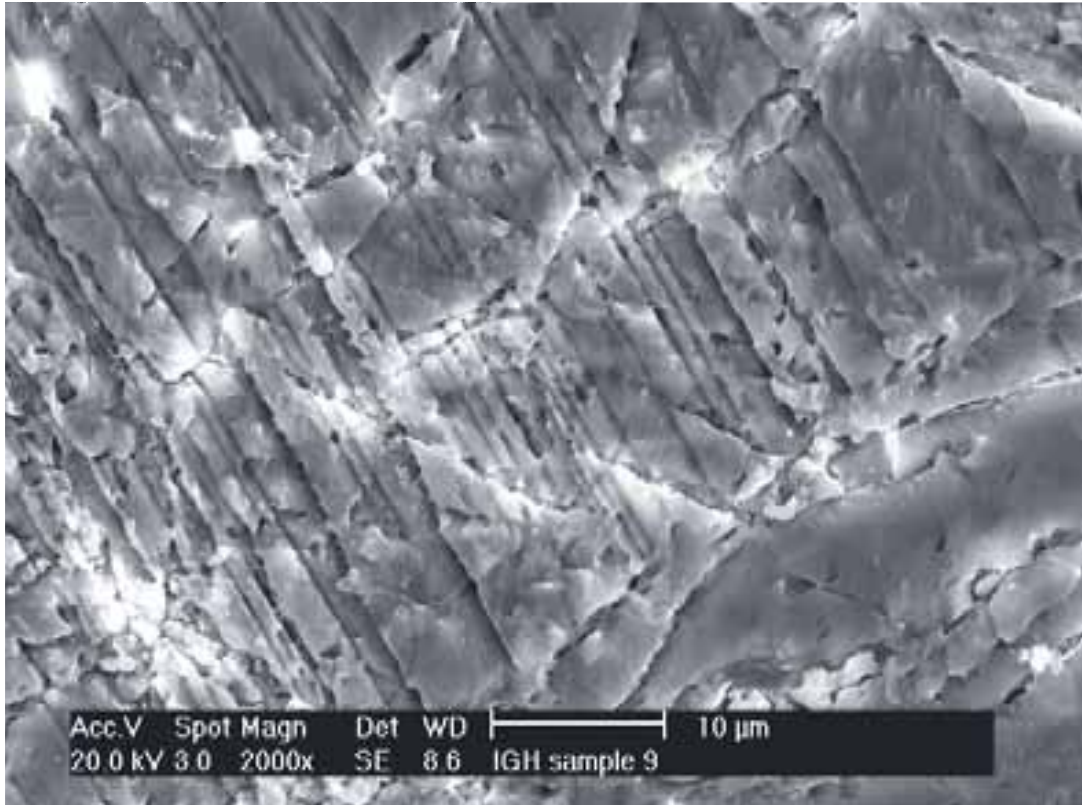
IGHS901 : Vue de deux cristaux de calcite possédant des traces de polissage. Ces lignes sont facilement reconnaissables car elles traversent plusieurs grains indépendants. Il y a une grande différence de taille entre les grains principaux et ceux de la matrice.



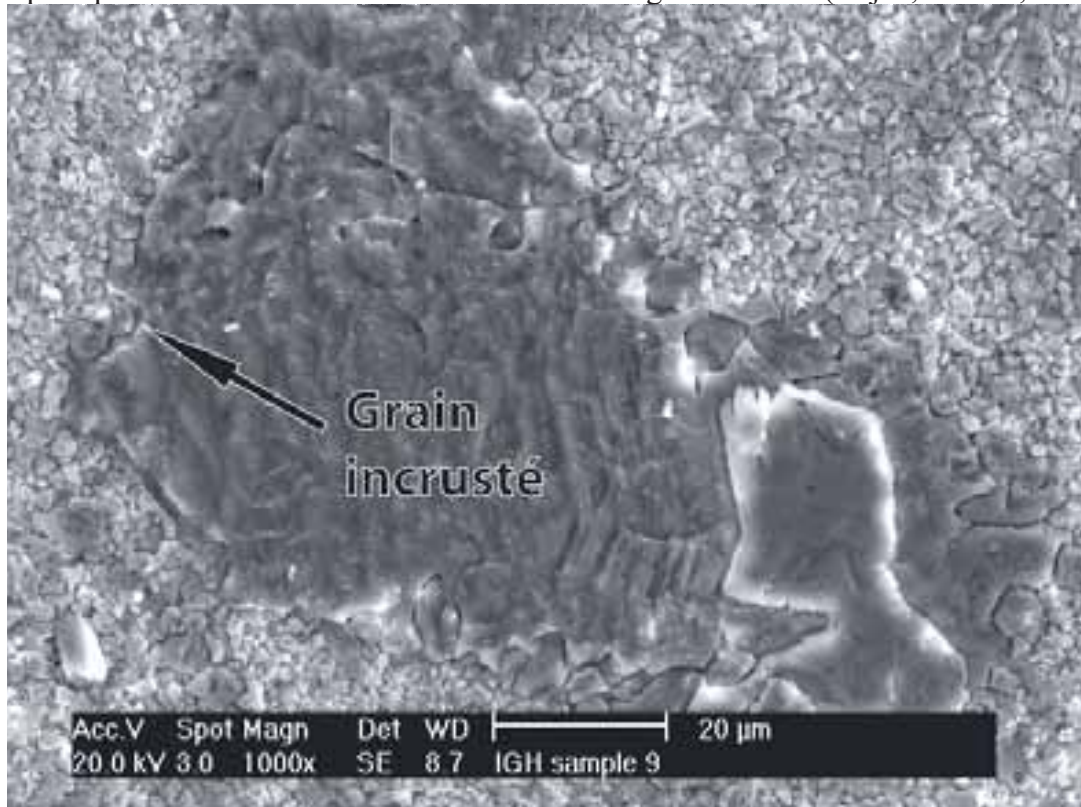
IGHS906 : Nombreux macles sur un grain de calcite. Elles sont très rapprochées ( $\sim 0.5\mu\text{m}$  entre chaque macle). Ce type de grain où la densité de macles est si élevée n'est bien observable qu'avec le microscope électronique. Ces grains sont trop petits pour être observés au microscope optique.



IGHS907 et IGHS909 : Même image que précédemment, avec des zooms supérieurs. Avec l'agrandissement de 4000 fois, on constate que l'attaque acide n'est pas homogène, le sillon d'une même macle est variable. Il y a aussi des différences selon la taille des macles.



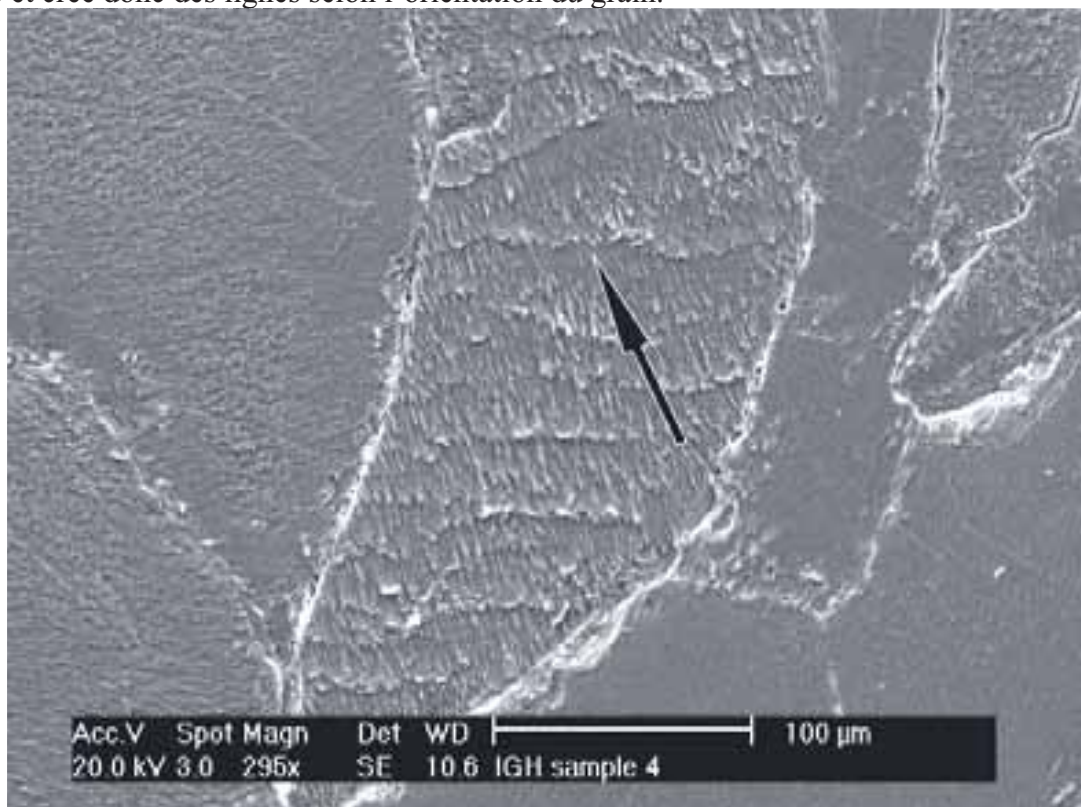
IGHS912 : Grains de la matrice incrustés dans un cristal sparitique. A l'origine, il s'agit d'un pore où des cristaux de calcite se forment d'abord autour du vide. Ensuite, un grain de calcite cristallise dans le vide restant. C'est pourquoi les cristaux semblent incrustés dans le grain central. (Cojan, Renard, 2000)



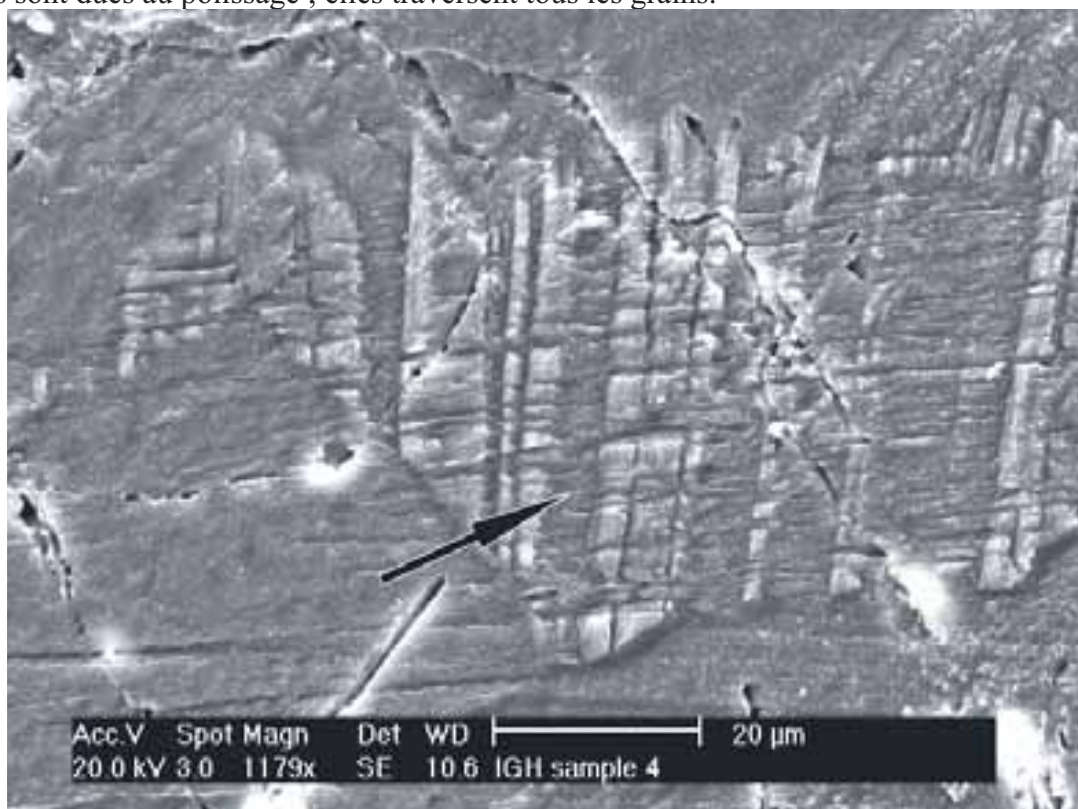
#### 4.5.3 Echantillon NR4

Il s'agit d'image du talon NR4.3. Il est caractérisé par une veine centimétrique composée de grains de calcite millimétriques. Il y a une grande concentration de macles à la limite veine-micrite.

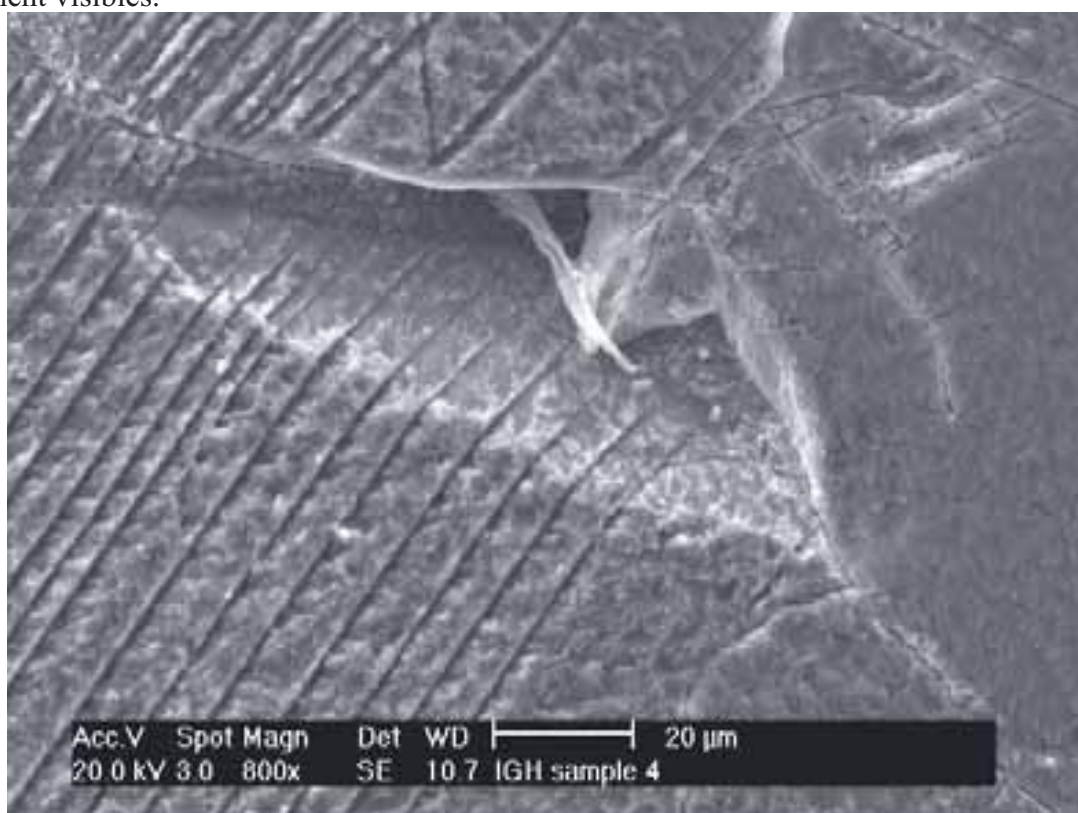
IGHS402 : Figures dues au réseau cristallin. L'acide attaque préférentiellement certaines fragilités cristallines de la calcite et crée donc des lignes selon l'orientation du grain.



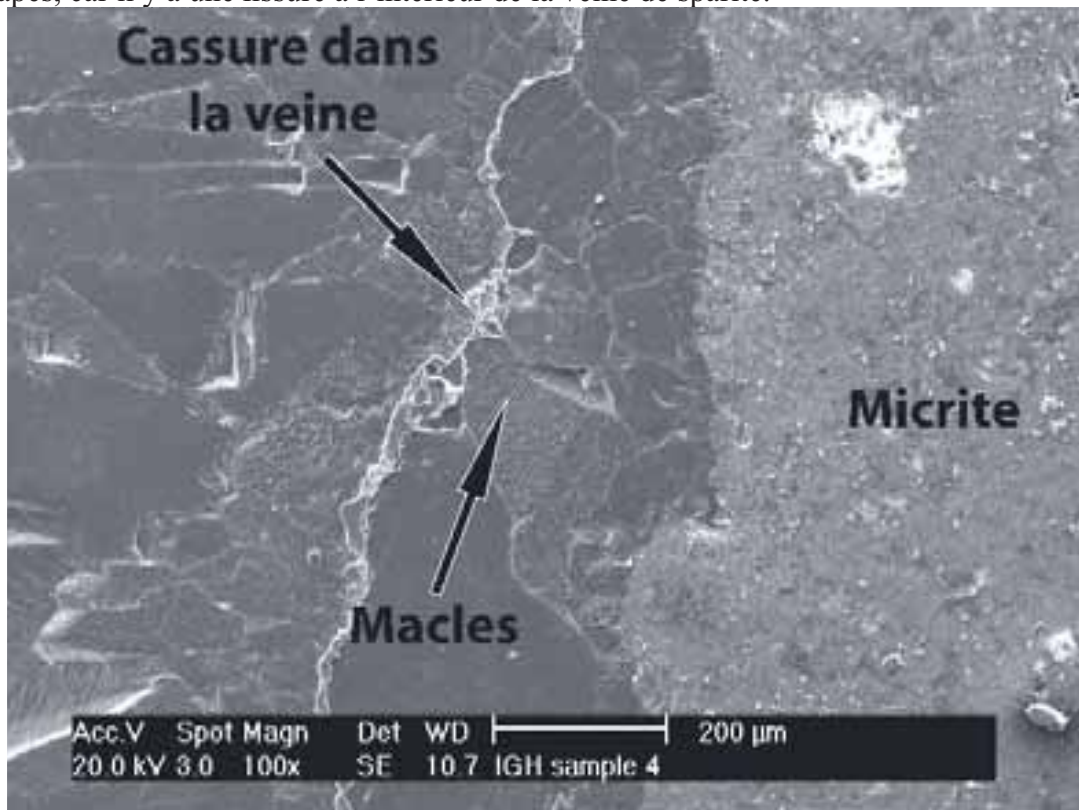
IGHS405 : Macles très épaisses. Les macles sont aussi importantes que le cristal non maclé. Les lignes horizontales sont dues au polissage ; elles traversent tous les grains.



IGHS416 : Macles très régulières. L'espacement entre les macles reste assez constant. Les plans de maillage sont facilement visibles.



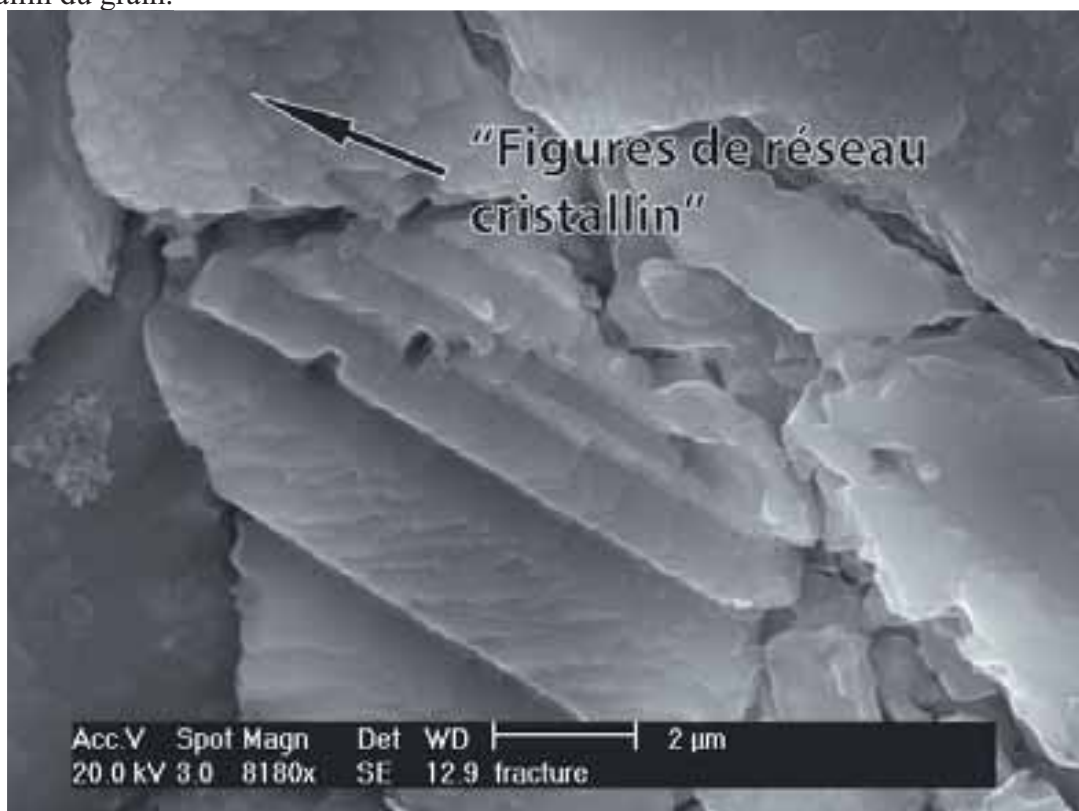
IGHS420 : Limite entre la veine à gauche et la roche micritique. On remarque que la veine s'est formée en plusieurs étapes, car il y a une fissure à l'intérieur de la veine de sparite.



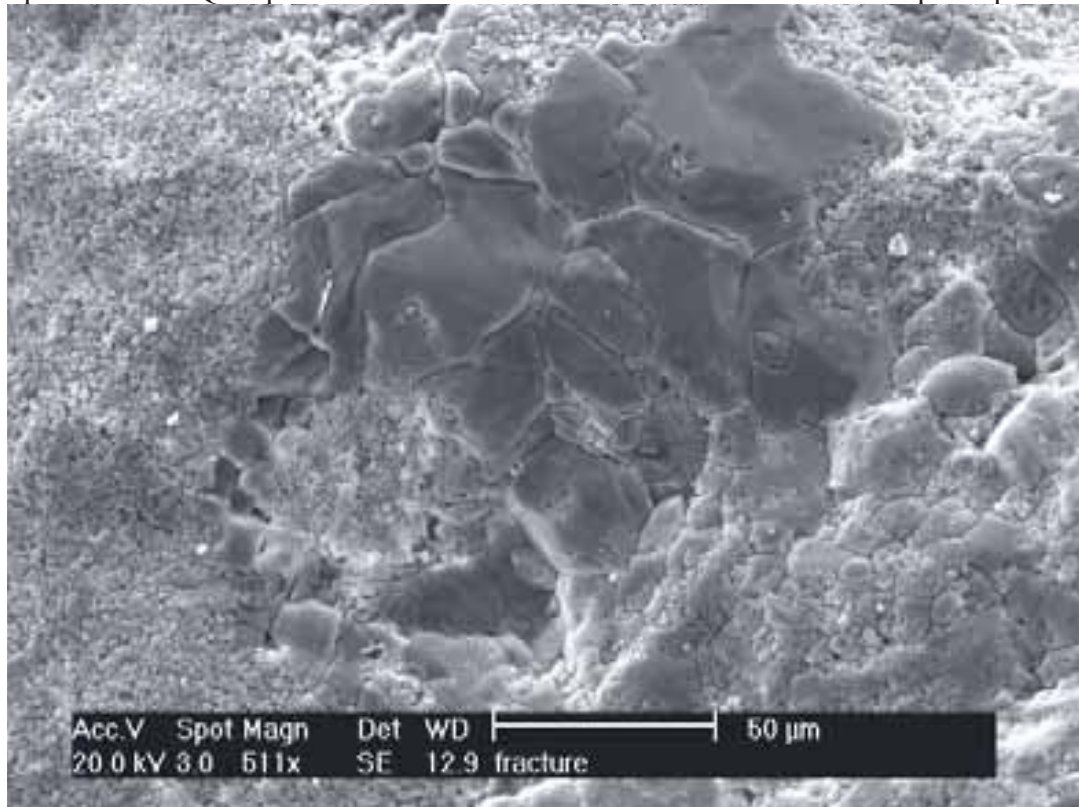
#### 4.5.4 Echantillon « Fracture »

Ces images proviennent de l'échantillon 4. Il s'agit d'une surface de cassure fraîche attaquée à l'acide selon la même méthode que les autres échantillons.(Herwegh, 2000). On y trouve principalement une matrice micritique où des veines contiennent des cristaux sparitiques. Il y est difficile de repérer les macles.

FRAC03 : Macles fortement agrandies. En haut à gauche de la photo,l'acide fait ressortir les rhomboèdres du réseau cristallin du grain.



FRAC04 : Groupe de cristaux sparitiques. Les limites de grains de la matrice micritique sont bien visibles grâce à l'attaque à l'acide. Quelques macles sont observables sur certains cristaux sparitiques.



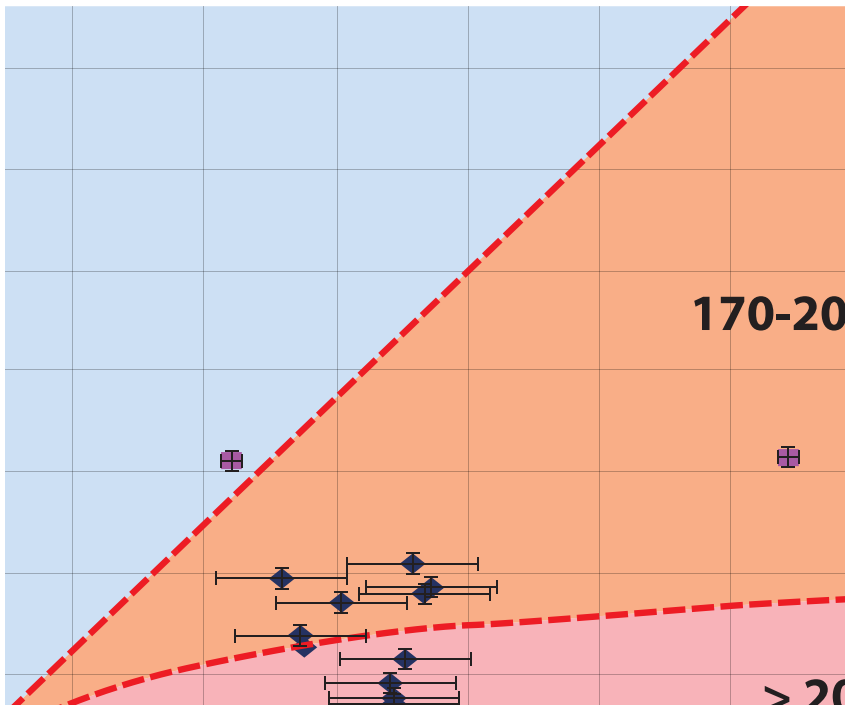
## **4.6. Discussion**

Comme pour les lames minces au microscope optique, le nombre de macles observables dépend de la lithologie de la roche, plus précisément la proportion entre la micrite et les grains sparitiques. En effet, les macles se forment préférentiellement dans les grands cristaux (Lacombe, 2006). Ceux-ci se trouvent principalement le long de veines.

On remarque que la méthode d'attaque à l'acide de M. Herwegh (2000) est bien adaptée. En effet, les macles et les limites ressortent bien sur les images du microscope électronique. Les rayures de polissage de l'échantillon 9 semblent provenir d'un problème de polissage et non d'une attaque à l'acide insuffisante puisque les macles et les limites de grains sont bien creusées par l'acide.

On n'observe aucune lamelle de choc quel que soit l'agrandissement utilisé. On estime donc que ce type de déformation n'a pas eu lieu lors de l'impact. Mais que la déformation a été accommodée de manière intracristalline grâce aux macles.

# 5



## Morphologie des macles

### 5.1. Introduction

Le processus de maillage engendre différents types de macles selon la température (Burkhard, 1993). Leurs morphologies se différencient par leur épaisseur et leur forme. Ces paramètres sont utilisés pour classer les macles dans 4 catégories. Voir *Figure 1*

En plus du changement de morphologie, lorsqu'une contrainte est appliquée, Turner (1953) et Ferrill (1998) remarquent une augmentation de la concentration des macles par millimètre pour une contrainte à faible température. Pour des températures élevées, le nombre de macles reste constant, mais les macles s'épaississent. Expérimentalement, des macles jusqu'à 5 $\mu$ m d'épaisseur ont été observées à 300°C.

En mesurant les macles de différents échantillons ainsi que leur température de formation, estimée grâce à des géothermomètres « classiques » (cristallinité de l'illite, inclusion de fluide,...), Ferrill *et al.*(2004) ont créé des diagrammes température-macles. Ceux-ci sont repris pour estimer la température de formation des macles dans cette étude.

	type I	type II	type III	type IV
<b>Description des macles</b>	- macles fines - droites - 1,2 ou 3 familles de macles - épaisseur constante	- épaisses (>>1µm) - droites - faiblement lenticulaire - épaisseur constante	- macles épaisses courbées - macles dans des macles - grain complètement maclé - épaisseur variable	- épaisses, fragmentées - frontière de macle suturée - trainée de petits grains - épaisseur variable
<b>Interprétation</b>	- petite déformation - petit surface de macle - très faible température - (post-métamorphique) - (tectonique tardive)	- déformation notable - grains complètement maclés possible - déformation syn- ou post-métamorphique	- déformation importante - mécanisme de déformation intra-cristalline - déformation syn-métamorphique	- déformation importante - recristallisation dynamique: les limites de grains migrent - déformation pré- ou syn-métamorphique
<b>Température</b>	< 200°C	150-300°C	> 200°C	> 250°C

Figure 1 : Illustration des types de macle. (Burkhard, 1993)

Deux hypothèses sont possibles pour expliquer la température lors de la formation des macles :

L'enfouissement est une méthode classique pour élever la température. Un gradient de 25 à 50°C/km peut être considéré comme standard pour des roches sédimentaire sur une croûte continentale (Cojan, Renard, 2000). L'épaisseur des couches sédimentaires a été estimée de 470 à 820m pour la date de l'impact. (Schmidt-Kaler, 1978). Donc, pour la région étudiée, les échantillons ont théoriquement subis une température maximale de 21 à 42°C soit quasiment équivalent aux températures atmosphériques.

L'augmentation rapide de la pression due à un impact augmente la température de la calcite par compression. Des pressions de 115 à 185 GPa lors de chocs créent des températures de l'ordre de 3250 à 5400°K (Love et Ahrens) ; des pressions plus faibles créant des températures inférieures. La *figure 2* est un exemple de température selon la pression exercée lors de chocs expérimentaux.

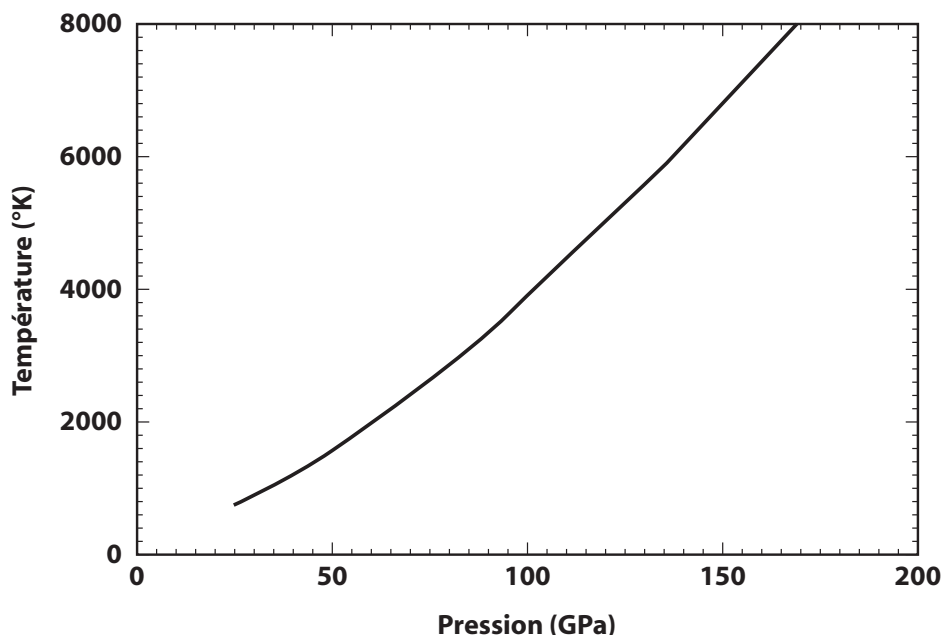


Figure 2 : Diagramme pression-température lors d'impacts expérimentaux (Gupta, Love, Ahrens, 1999)

## 5.2. Mesure des données

Pour les estimations de température, plusieurs données sont nécessaires. La concentration de macles par grain de calcite (macles/mm), l'épaisseur moyenne des macles et le module du vecteur cisaillement calculé sont repris du *chapitre 3. Déformations mesurées au cratère.*

On calcule le cisaillement utilisé ( $J_2$ ) par la formule suivante :  $J_2 = \varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_1 \varepsilon_3$

$\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  et  $\varepsilon_3$  sont les vecteurs de déformation, repris des fichier de sortie du programme ./twin par Groshong (1987)

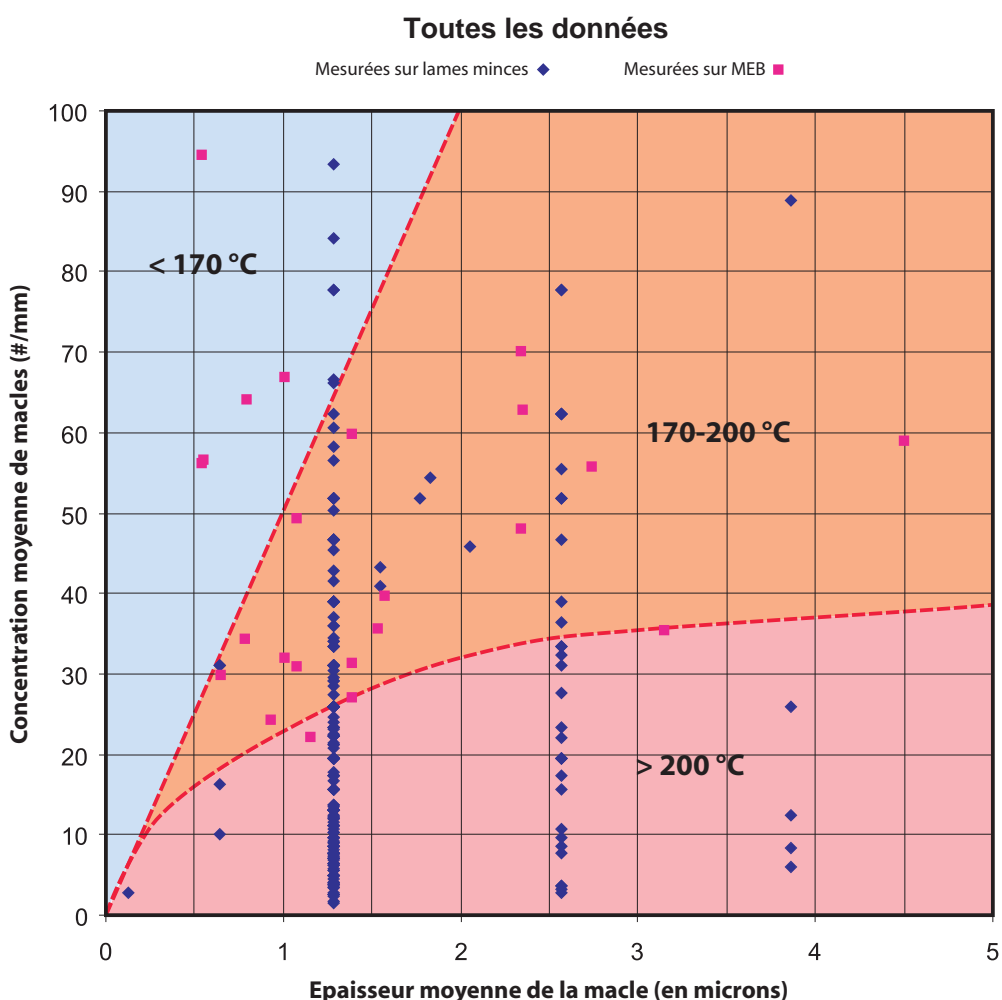
La concentration de macle découle de l'observation de nombre de macles et de la taille du grain. Pour l'épaisseur moyenne de la macle est pris en compte toutes les macles fines et épaisses mesurées dans un grain.

Les données brutes sont mesurées sur les lames minces utilisées pour les calculs de déformation du *chapitre 3 : Déformations mesurées au cratère*. Pour cela, la platine universelle Fedorov est utilisée. La méthode est décrite dans le chapitre : *Annexe I : Utilisation de la platine universelle Fedorov*. Certaines mesures sont prises sur les images issues de la microscopie électronique. Elles ont une meilleure résolution pour les mesures d'épaisseurs de macles. (0.1µm de précision)

### 5.3. Traitement des données

Les mesures sont introduites dans une table Excel. Il y a deux séries de graphique. Dans la première, toutes les macles sont représentées séparément. Dans la seconde série, les données sont moyennées et séparées selon l'échantillon et selon leur origine estimée grâce à la méthode des « Negative Expected Value ». Pour plus de détail, se reporter au *chapitre 3*

#### 5.3.1. Sans différenciation des échantillons



*Figure 3* : diagramme des grains de calcites selon les caractéristiques de leurs macles.

En bleu : mesures sur les lames minces

En rouge : mesures au microscope électronique

Dans le graphique de la *figure 3*, tous les grains de calcite où des macles ont été mesurées sont représentés. Le graphique a pour abscisse l'épaisseur moyenne des macles pour un grain et pour ordonnée la concentration moyenne de macles pour le même grain. Un point est représenté pour chaque échantillon. Ceci permet de rechercher une éventuelle tendance. Le graphique possède deux catégories de mesures.

Les couleurs de fond représentent les températures selon l'article de Ferrill *et al.*(2004). Elles sont calculées par divers géothermomètres.

Les mesures sont principalement faites sur les lames minces au microscope optique (en bleu). L'épaisseur d'une macle est approximative pour ces mesures, car la précision du microscope n'est pas suffisamment grande. Cette imprécision a pour effet d'aligner les mesures sur deux colonnes, car on ne peut estimer l'épaisseur sur l'oculaire du microscope qu'à 0.1 unité d'épaisseur, qui vaut 1.28  $\mu\text{m}$ .

En rouge, les mesures sont effectuées sur des images de microscopie électronique à balayage. Dans ce cas, l'épaisseur mesurée de la macle peut être considérée comme exacte.

## Observation

On remarque que les données sont dispersées dans les trois catégories de température. Les mesures effectuées sur les lames minces se retrouvent principalement dans la zone  $> 200^\circ\text{C}$ .

Les mesures de la microscopie électronique, plus précise, se situent essentiellement dans la catégorie 170-200 $^\circ\text{C}$ . Aucune tendance n'est observable.

### 5.3.2. Avec différenciation des échantillons

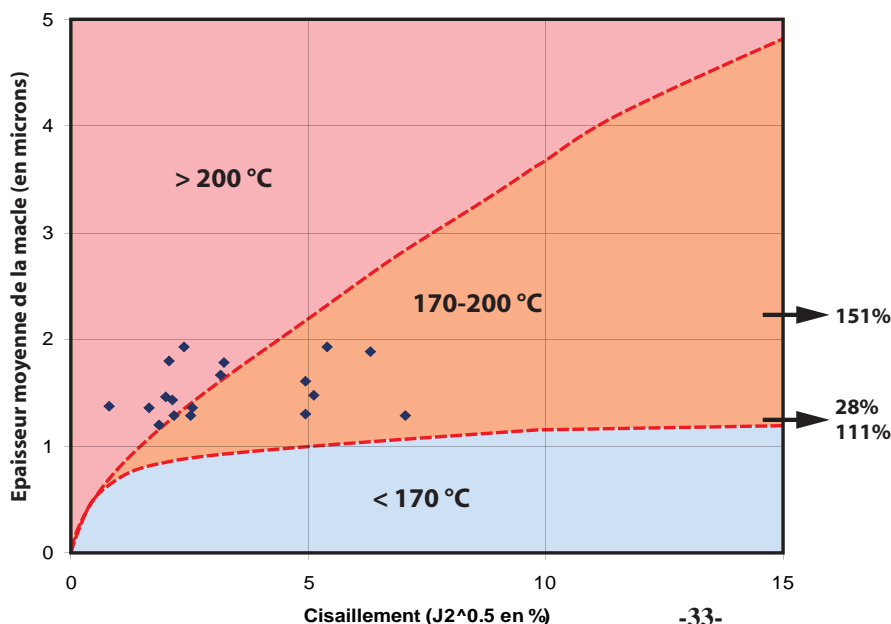
Les données sont séparées par échantillons et selon la catégorie « NEV » et « sans NEV ». Cela est utile car l'origine de la macle est distincte, donc leur température de formation peut aussi être distincte.

Les données provenant de la microscopie électronique ne sont pas représentées sur les graphiques *4a* et *4b*. Leur abscisse est constituée par le cisaillement subi par les échantillons. Les mesures au microscope électronique ne permettent pas de connaître ce cisaillement sur les macles. Il est aussi impossible de reprendre le cisaillement calculé à partir des lames minces, car les grains de calcite mesurés au MEB ne peuvent pas être différenciés selon leur origine. (NEV ou sans NEV).

Certaines données ont un cisaillement très important, c'est pourquoi une flèche les représente. Leur abscisse est notée à côté de la flèche, l'ordonnée est représentée par la position de la flèche. Cela permet de ne pas aplatir le graphique et de représenter toutes les données.

L'échantillon n° 5 est représenté que sur le graphique *4c* car, comme il n'est pas orienté, sa déformation subie n'est pas calculée.

### Graphique a Toutes les données



*Figure 4a* : diagramme des données des échantillons selon les caractéristiques mesurées sur leurs macles.

## Graphique b

Toutes les données

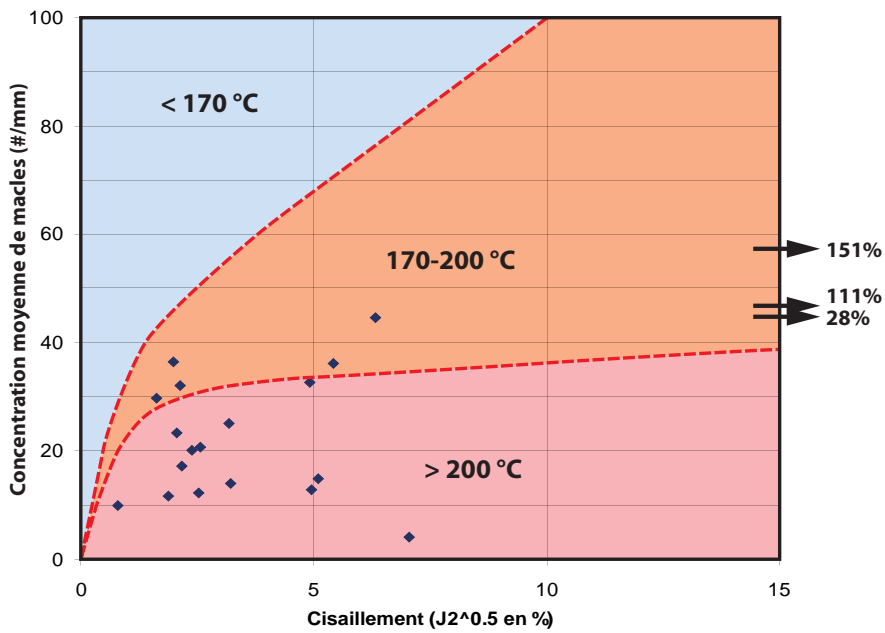


Figure 4b : diagramme des données des échantillons selon les caractéristiques mesurées sur leurs macles.

## Graphique c

Toutes les données

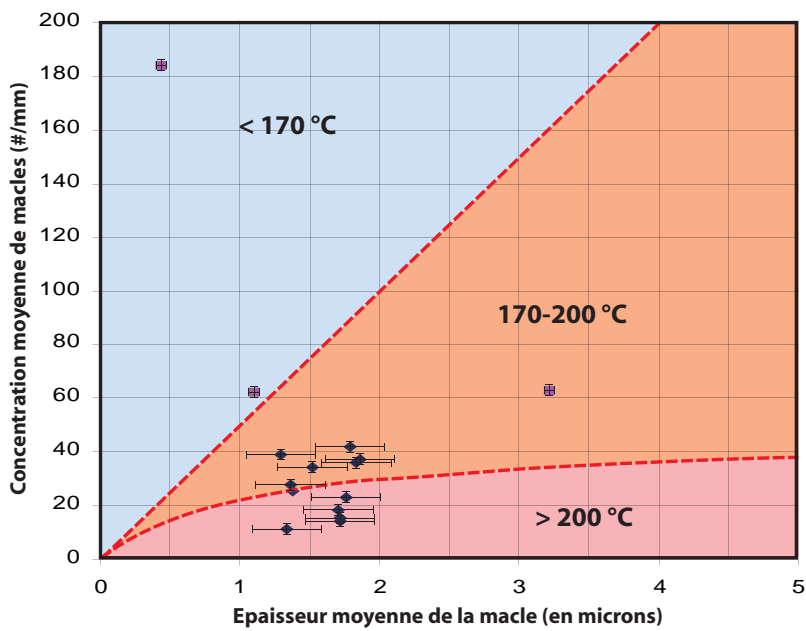


Figure 4c : diagramme des données des échantillons selon les caractéristiques mesurées sur leurs macles, avec leurs barres d'erreur.

En bleu : mesures sur les lames minces

En rouge : mesures au microscope électronique

## Observation

Les échantillons des lames minces sont positionnés dans une zone de température d'environ 200°C. Voir *figure 4a, 4b, 4c*. Pour le microscope électronique, les mesures sont très dispersées, mais dans des zones de plus faible température (170° et 170-200°C). *Figure 4c*. Les erreurs de mesures ne changent pas les mesures de catégories.

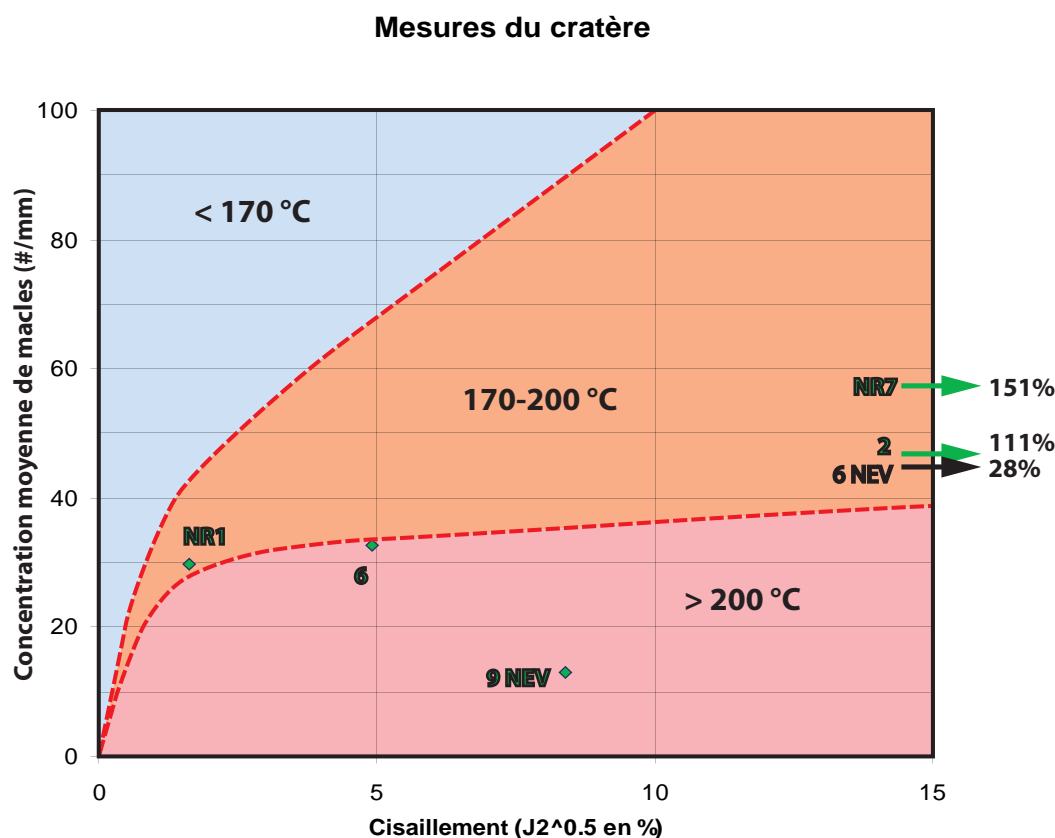
Il est logique que les trois graphiques donnent des résultats équivalents, car le cisaillement J2 provient de la contrainte qui découle, après calculs, du pourcentage de macles des grains de calcite. Les trois termes sont donc reliés. Le pourcentage de macle est le produit de l'épaisseur moyenne de la macle et de la concentration moyenne de macles par grains. C'est pour cette raison que les barres d'erreur ne sont que sur le graphique *4c*, celui qui représente toutes les données, MEB et échantillons n° 5 compris.

## 5.4 Mesures provenant de l'impact

Le graphique de la *figure 5* permet d'observer les données provenant d'échantillons dont la déformation provient de l'impact selon le *chapitre 3: Déformations mesurées au cratère*.

Les mesures qui ont un cisaillement très important, proviennent de l'impact du cratère, selon la technique CSG. L'origine est sûre pour les mesures 2 et NR7.

Pour la déformation 6 NRV, estimée peu robuste par la méthode CSG, le grand cisaillement permet, par comparaison avec les échantillons 2 et NR 7, de le classer dans les déformations dues à l'impact.



**Figure 5** : diagramme des données des échantillons selon les caractéristiques mesurées sur leurs macles. Les données en verts proviennent de l'impact. La donnée 6 NEV provient sans doute de l'impact, mais n'est pas assez robuste pour assurer son origine.

## **5.5 Interprétation**

Une hypothèse pour expliquer les températures mesurées est l'enfouissement normal des roches avant l'impact. En effet, une corrélation existe entre la profondeur et la température des roches.

La température calculée semble surévaluée car les roches mesurées n'ont jamais été enfouies assez profondément. Dans cette étude, les échantillons seraient maclés avec un enfouissement supérieur à 5 km : une quantité de roches sédimentaires qui n'a jamais existée dans la région pour la période de la formation alpine à aujourd'hui.

L'hypothèse de la température due à la pression de l'impact semble mieux expliquer les hautes températures. Elle permet en effet d'atteindre les températures mesurées sur les macles. En extrapolant le diagramme de Gupta, Love et Ahrens (1999), la pression était d'environ 5 GPa lors de l'impact, créant une température de 200 °C.

Il y a cependant deux problèmes avec cette hypothèse :

La température ne devrait être élevée que pour les données provenant des macles originaires de l'impact. Pourtant, tous les échantillons mesurés montrent, selon la méthode de ce chapitre, une température moyenne d'environ 200°C

De plus, un gradient de température devrait être observable selon la distance des échantillons avec le centre du cratère ; la pression due au choc étant plus importante en s'approchant du cratère.

Aucun gradient ne peut être observé dans les diagrammes. Dans la *figure 5*, les données les plus proches du cratère ne sont pas celles où les températures les plus élevées sont mesurées.

## **5.6 Conclusion**

La méthode de Ferrill et *al.* (2004) ne donne pas les résultats attendus pour cette étude. En effet, les températures obtenues sont élevées (~200°C) et homogène. Il n'y a pas de différenciation de température de formation dans les données provenant du cratère et celles dues aux Alpes. La seule différence est que les mesures avec un grand cisaillement proviennent de l'impact. Cette caractéristique permet de classer la mesure 6 NEV dans le groupe provenant du cratère.

La précision des mesures ne permet pas d'expliquer l'impossibilité de différencier l'origine des mesures selon leur température. Les barres d'erreurs ne changent pas les catégories des mesures.

Les mesures effectuées au microscope électronique peuvent sembler plus cohérente avec la température attendue. Mais elles ne sont pas représentatives car ces macles sont choisies pour leurs caractéristiques particulières (nombreuses macles par millimètre) et donc ne permettent pas de les considérer comme représentatives de l'échantillon.

# 6



## Description d'affleurements

### 6.1. Introduction

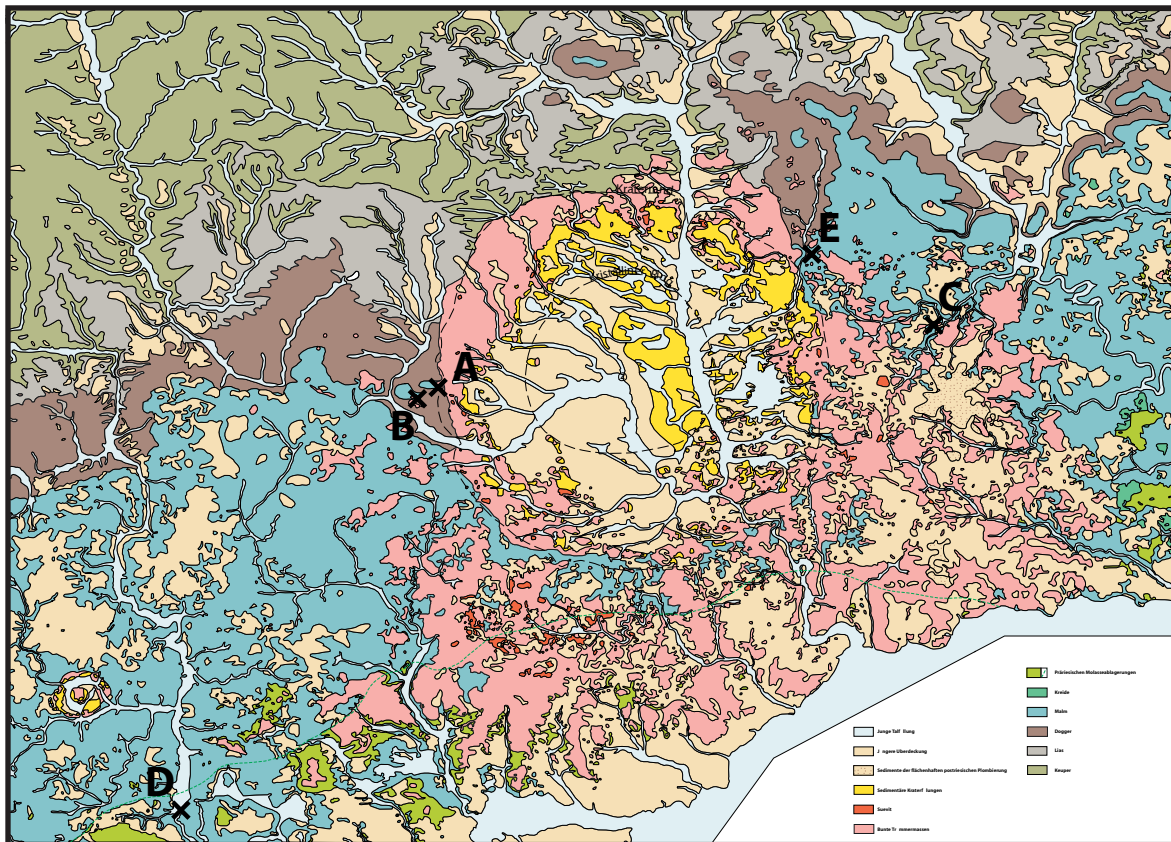
Les affleurements sont décrits selon leurs caractéristiques sédimentologiques et structurales. Les lames minces sont utilisées pour décrire les microfaciès et donc pour déterminer le type de calcaire du Jurassique. Pour cela, la classification de Dunham (1962) est utilisée. Elle repose sur la quantité de boue carbonatée présente dans l'échantillon. L'observation de l'arrangement des clastes entre eux est aussi pris en compte. L'apport de cette classification est de donner des indications sur l'hydrodynamisme du dépôt. Beaucoup de boue implique un environnement de basse énergie (milieux profonds ou protégés). Des indications sur les types de clastes sont aussi données.

Les observations sur le terrain fournissent les indications structurales et sur la géologie locale. Elles sont représentées par des illustrations et des stéréogrammes.

On utilise les mesures de macles du *chapitre 3* pour comparer les failles et les stries avec les déformations calculées grâce aux macles.

## Lieux d'étude

Les affleurements se situent dans la région du cratère du Nördlingen-Ries. La carte permet de situer précisément les affleurements dans un contexte géologique régional. *Figure 1*

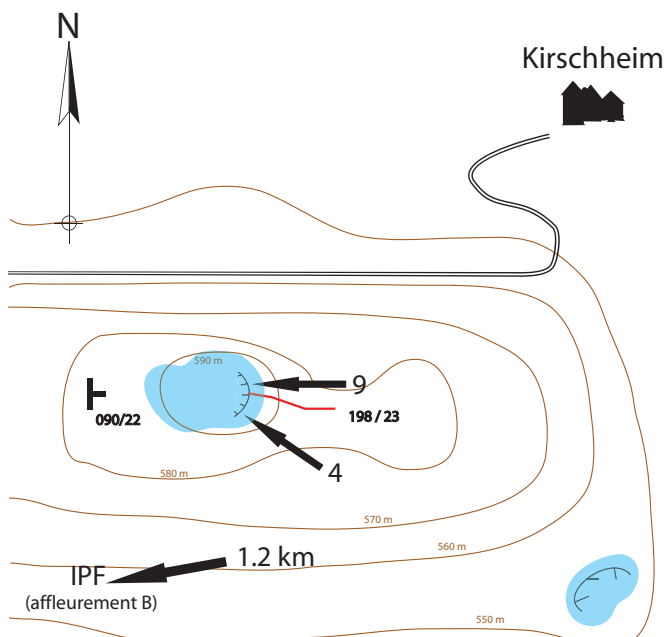


*Figure 1: Lieux d'étude des affleurement*

## 6.2 Affleurement A

Cet affleurement se situe dans une excavation située à 200m km S-W de Kirschheim (54°14'50"N / 6°01'78"E). Ce lieu se trouve donc juste à la limite ouest du cratère.

Il s'agit d'une excavation d'environ 10m de large creusée dans du calcaire. *Figure 2*.



*Figure 2: Plan de situation de l'affleurement.*

Ligne brune: courbes de niveau  
 Nombre: Lieux des prises d'échantillons  
 en bleu: observation du calcaire  
 en rouge: faille observée

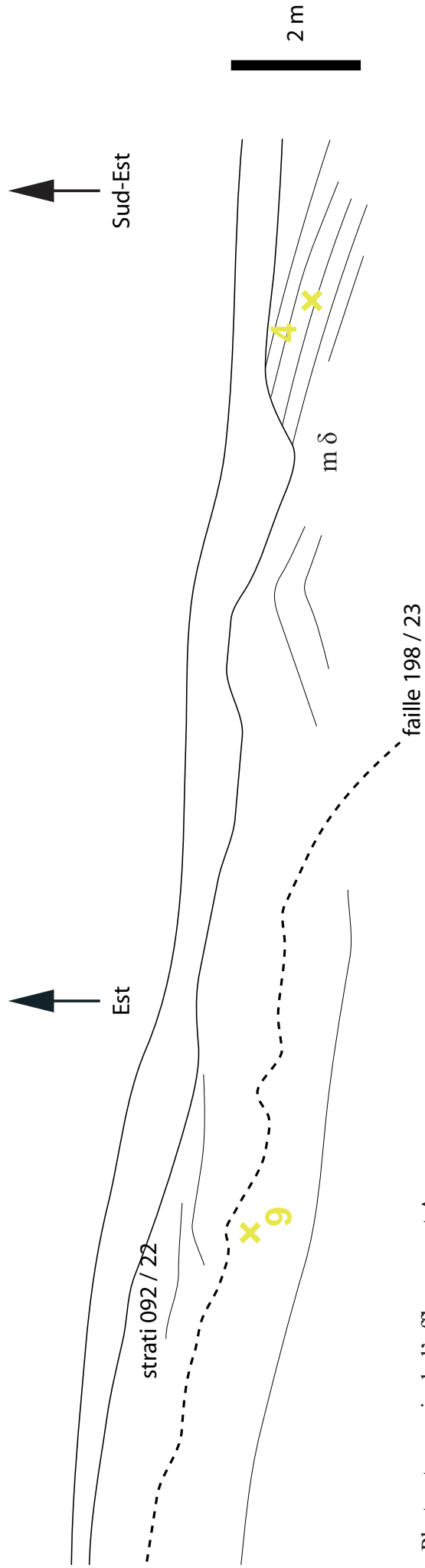


Photo et croquis de l'affleurement A

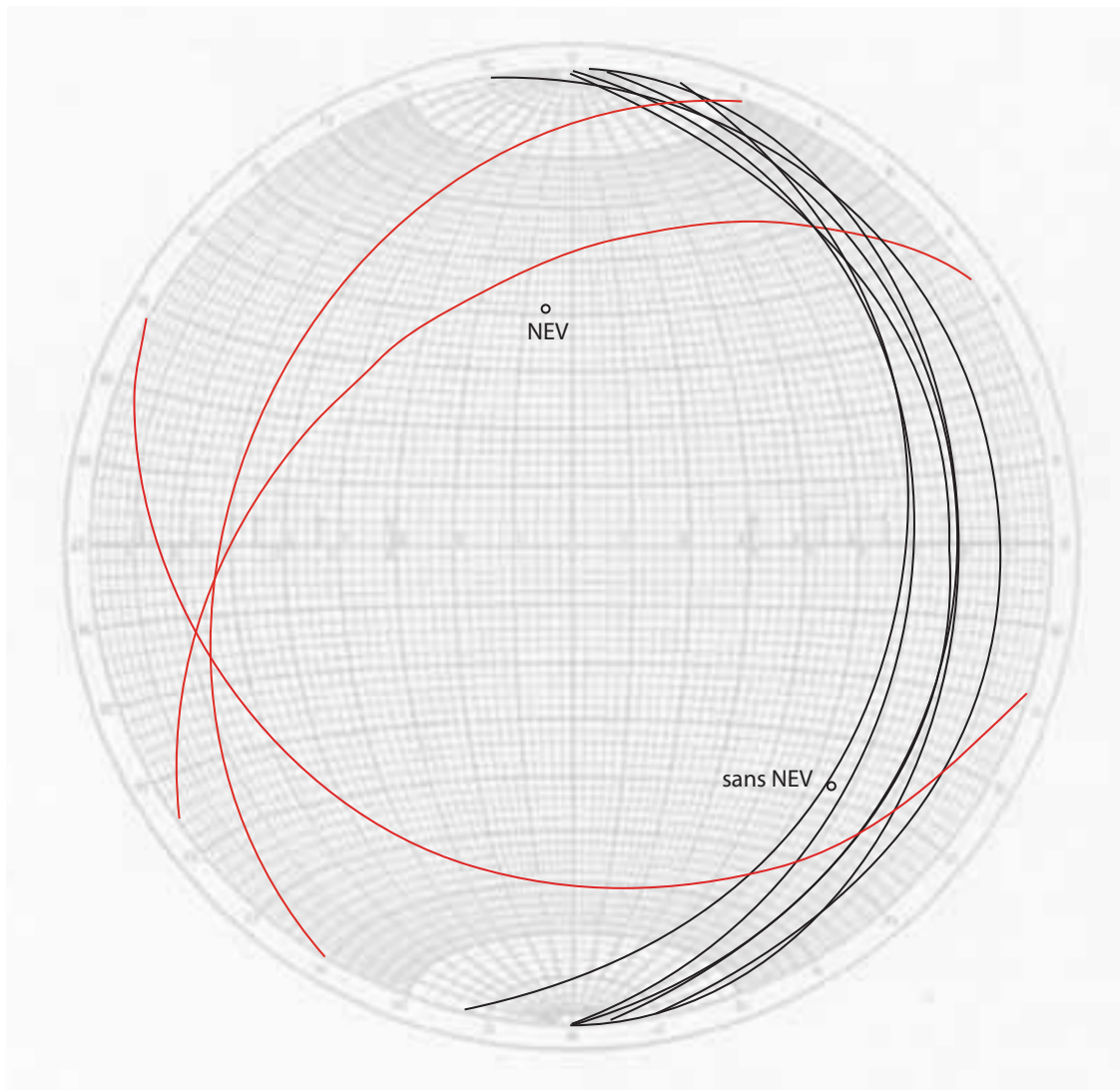
La stratigraphie est de 092 / 22 au dessus de la faille.

Une faille orientée 198 / 23 coupe l'affleurement. Mais la taille de l'affleurement ne permet pas de dire si cette faille est locale ou si elle continue sur une grande distance. Son sens de décalage n'est pas observable.

Il y a également une famille de fracturation de petites tailles orientées 326 / 44.

L'orientation des failles est comparée avec les déformations calculées grâce aux macles de la calcite.

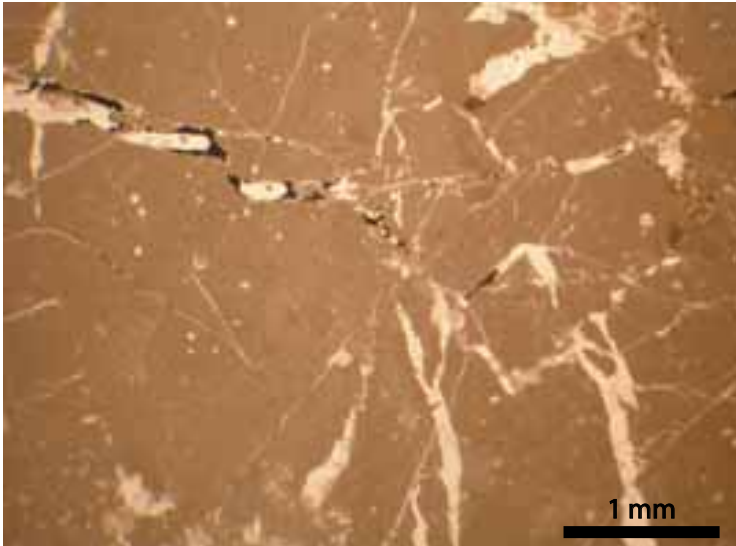
Aucune relation n'est immédiatement visible. La déformation «sans NEV» est sur le même plan que la stratigraphie et d'orientation NNW-SSE. Les deux petites failles mesurées, avec un pendage vers le NE peuvent avoir pour origine la formation des Alpes. De plus elles ont le même azimut que le vecteur «NEV», qui est estimé comme formé par l'orogénèse alpine.



**Figure 3:** Stéréogramme des failles et de la stratigraphie mesurées sur l'affleurement: les points NEV et sans NEV correspondent aux directions de compression ( $\sigma_3$ ) calculées grâce aux macles. en rouge: les failles, en noir, la stratigraphie

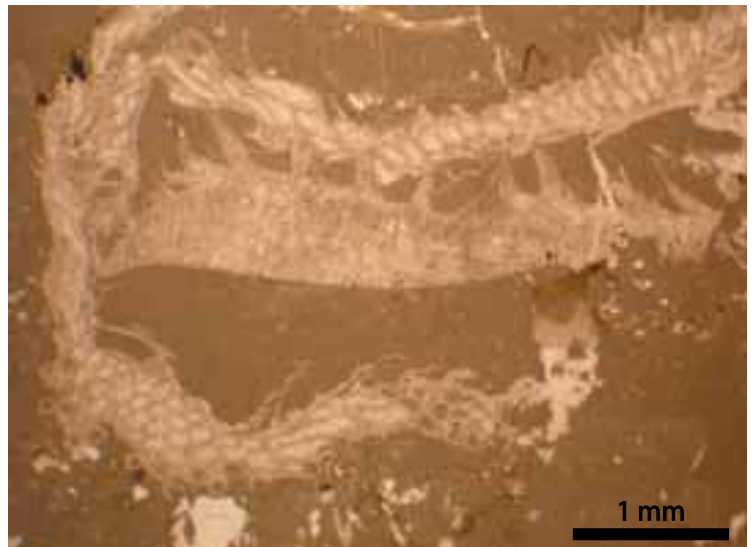
Les échantillons décrits proviennent des deux côtés de la faille. L'idée était de rechercher une différence dans le type de roche afin de déterminer le type de faille. Le décalage de la faille n'est pas assez important pour créer un changement de lithologie.

## Echantillon 4

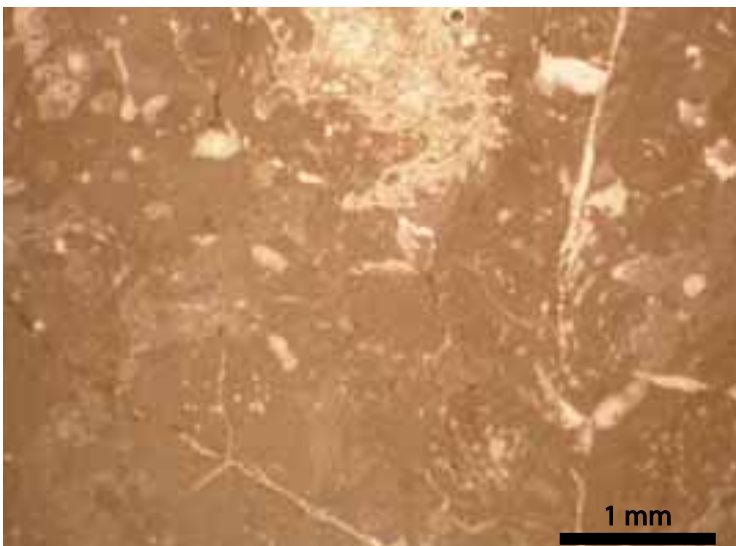


L'échantillon est très fracturé. Des clastes micritiques de taille millimétrique sont cimentés par des veines sparitiques, mais où se trouvent encore de nombreux vides. La micrite est inhomogène: plus ou moins foncée.

Il y a un grand microfossile dans la lame mince. Il s'agit d'un bryzoaire. Le reste de la lame est composée de micrite.



## Echantillon 9



Il y a aussi un grand microfossile dans la lame mince (au centre en haut). Il s'agit d'un bryzoaire. Le reste de la lame est composée de micrite inhomogène. La présence du même type de fossile et de la même matrice implique que les deux échantillons sont du même type de calcaire

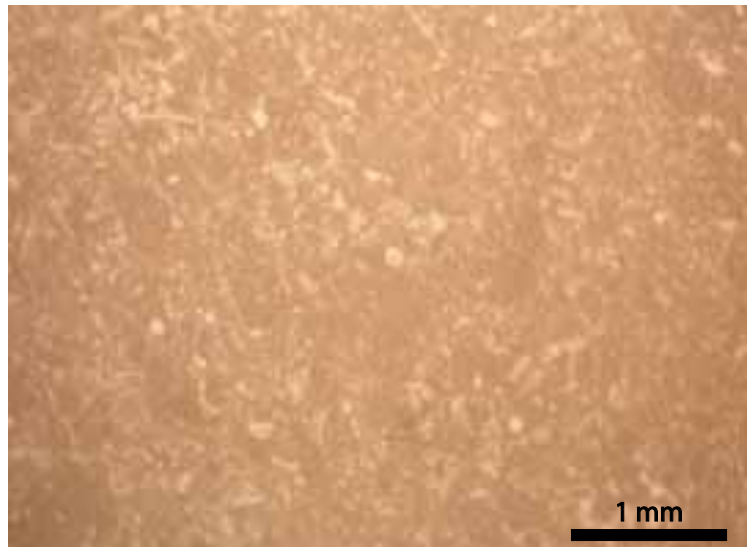
Les observations sur les lames minces ne permettent pas de différencier le sens de mouvement de la faille. En effet, les échantillons en dessus (4) et en dessous (9) possèdent la même lithologie.

## **6.2 Affleurement B: IPF**

Cet affleurement peut être relié avec l'affleurement A. En effet, leur éloignement est faible (1,2 km), mais le type de calcaire est différent. Le pendage est de 122 / 08. On remarque que cette valeur est compatible avec les données mesurées pour la stratigraphie de l'affleurement A. Par contre, le type de calcaire varie. L'affleurement n'est pas représenté car aucune autre indication (plis, failles...) n'est présente.

### **Echantillon 3**

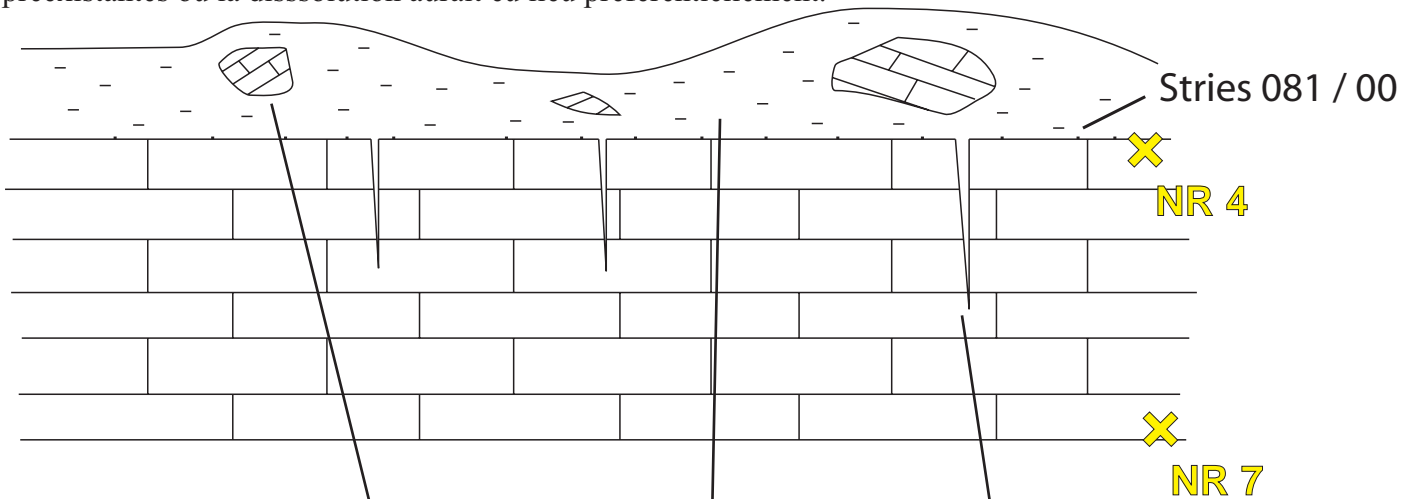
Il y a de nombreux bioclastes. Ceux-ci sont de tailles millimétriques. La matrice est composée de micrite. L'échantillon est classé micrite à bioclastes de type wackstone.



### 6.3 Affleurement C

Cet affleurement se situe à environ 2.5 km au Nord de Ursheim (54°11'38"N /6°20'56"E). C'est une carrière de calcaire. Un toit de banc affleure sur une grande surface. Celui-ci possède des stries de la même morphologie que des stries de failles. L'orientation moyenne des stries est de 81° par rapport au Nord. Leur origine est le frottement effectuée par la brèche située au-dessus. Celle-ci a été formée lors de l'impact et a glissé, poussée par le «souffle» de l'impact. Elle est composée principalement d'argile avec des blocs décimétriques de calcaire. Il y a aussi des «filons» de charbon d'une dizaine de centimètres. Ils proviennent de la végétation rapidement recouverte lors du mélange de la brèche lors de l'impact.

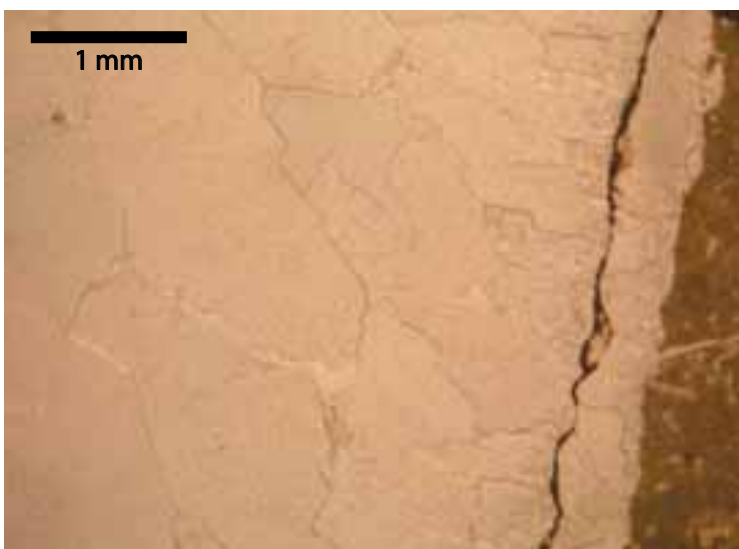
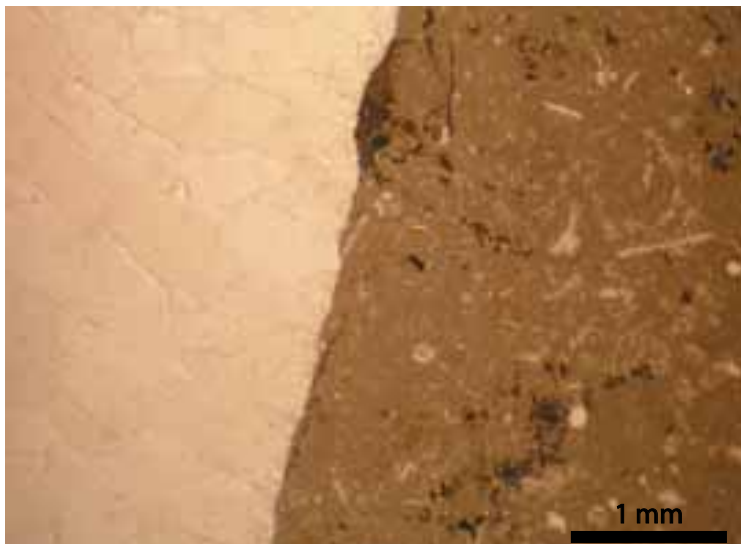
Des fentes karstiques sont présentes. Leurs orientations semblent aléatoires et n'indiquent pas de failles préexistantes où la dissolution aurait eu lieu préférentiellement.



R. Jubin

## Echantillon NR4

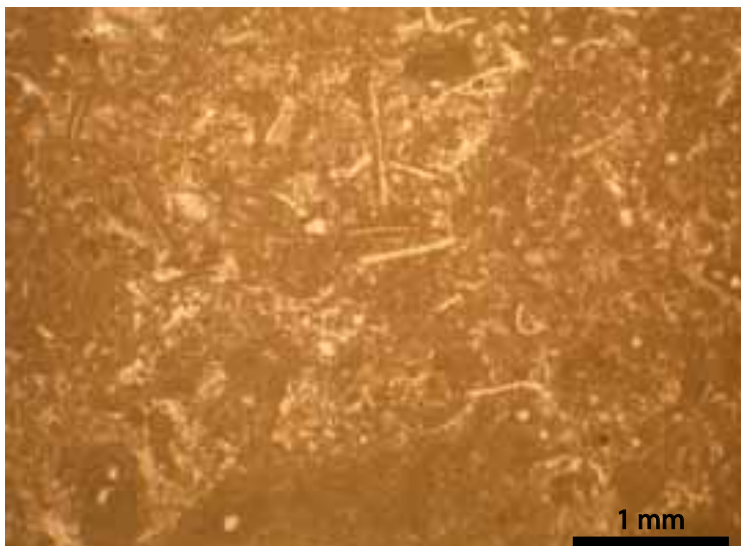
L'échantillon est micritique avec de nombreux bioclastes. (malm  $\alpha$ ) Il y a des accumulations de fer dans certaines zones (en brun-noir). L'observation de cet élément est faite lors des mesures au microscope électronique à balayage. Dans la veine sparitique, les grains ont une taille décroissante dans la limite de la veine. Le bord de la veine semble très nette.



Il s'agit d'un agrandissement de la veine photographiée ci-dessus. Il y a une veine qui s'est formée dans la veine principale sparitique. Cela s'explique par une formation en plusieurs étapes où le remplissage par les grains sparitiques est réactivé par un nouvel écartement dans la veine.

## Echantillon NR7

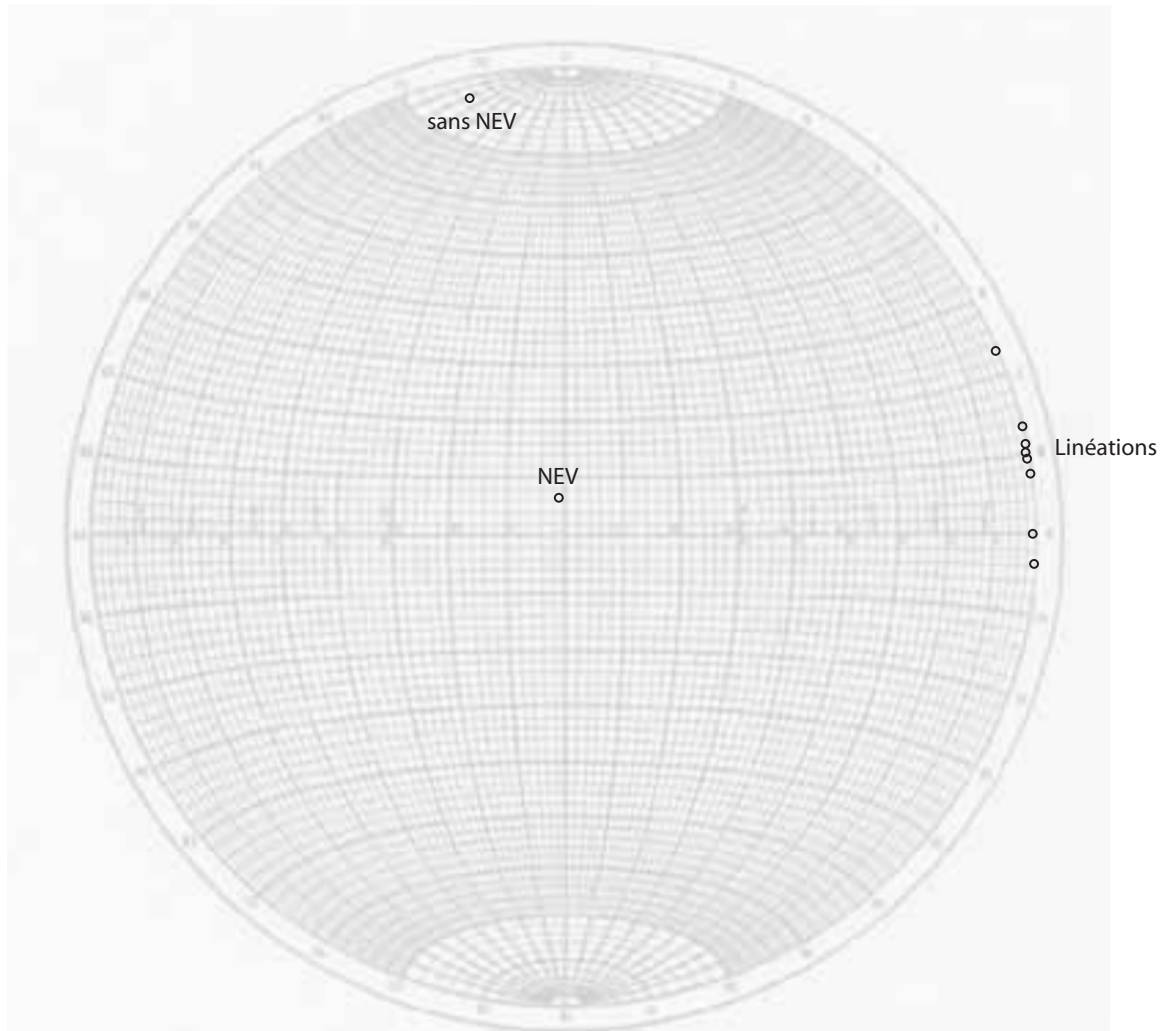
L'échantillon est micritique avec de nombreux bioclastes. Il est de la même composition que la roche de l'échantillon NR4.



Les stries sur le calcaire peuvent être comparées avec les orientations des déformations mesurées grâce aux macles de la calcite. figure ci-dessous .

Les linéations et la déformation dans les roches ne sont pas reliées.

En effet, les macles permettent d'observer la déformation alpine (sans NEV) et la compaction sédimentaire (NEV). Les linéations sont un effet observable uniquement sur la surface et ne se mesurent pas dans les roches.



Représentation des linéations mesurées sur la surface du calcaire et les orientations des déformations ( $\sigma_3$ ) des roches calculées grâce aux macles. Les deux déformations sont reprises des calculs du chapitre 3

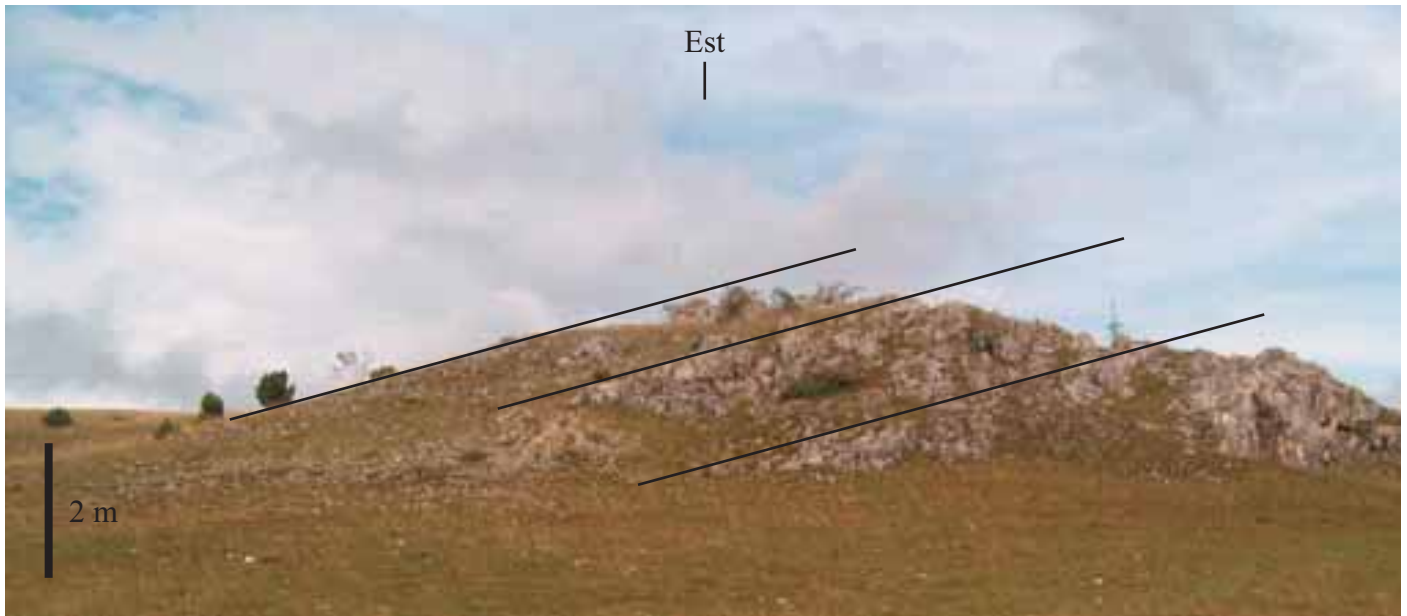
## 6.4 Affleurement D

Le lieu se situe à 400m au Sud de Herbrechtingen au lieu-dit du Radberg (53°85'15"N/5°86'50"E)

Cet affleurement a été choisi pour sa distance avec le cratère, et donc pour échantillonner des roches si possible non déformées par l'impact de la météorite.

Il s'agit de malm très fracturé. L'orientation des failles est difficilement mesurable, mais aucune orientation préférentielle n'a été remarquée. La stratigraphie a une orientation de 357 / 15.

Mais comme aucun autre affleurement n'a été observé vers ce lieu, il est difficile de déterminer si ce pendage est local ou à plus grande échelle. Ce pendage est compatible avec les déformations mesurées grâce aux macles. Les deux déformations sont dans le même plan. Leur orientation est probablement originaire de la formation alpine

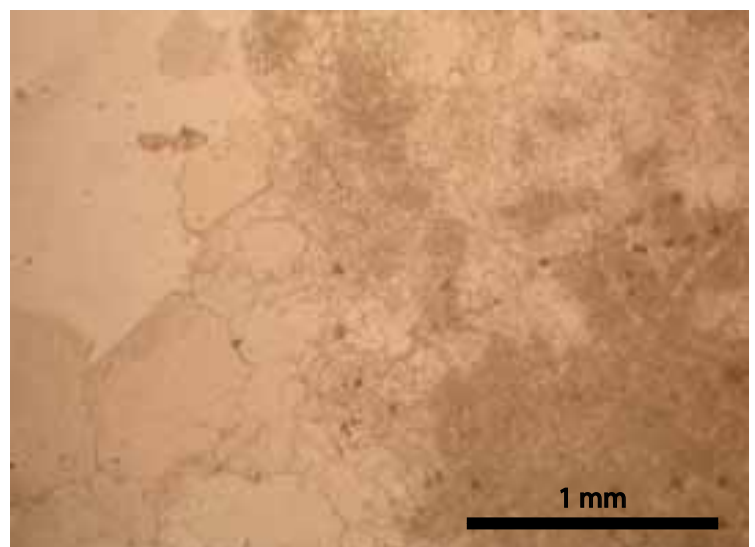


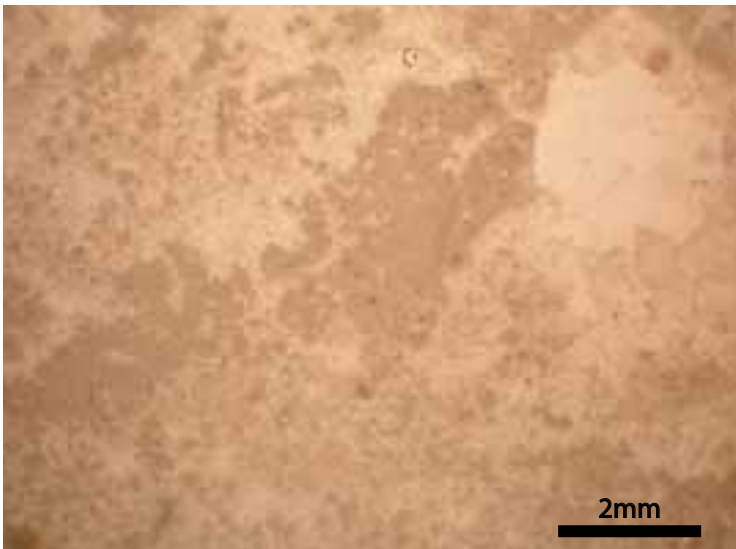
L'échantillon 1 provient de cet affleurement. Il s'agit d'une brèche très friable composée de morceaux de calcaire de quelques centimètres.

Les photos de lames minces proviennent de cet échantillon. Grâce à celles-ci, le calcaire peut être classé comme Malm  $\beta$  ou de Malm  $\gamma$ . Cette classification est faite grâce à l'absence de bioclastes et d'oolithes. Mais la bréchification empêche d'être catégorique.

### Echantillon 1

Il y a plusieurs tailles de grain de calcite. La micrite se trouve en bas à droite sur la photo et les grains sparitiques (taille  $\sim 0.5$  mm) autour des pores, en haut à gauche. Il n'y a pas de bioclastes ni d'oncoïde. Cette roche peut être classée comme micrite à zone sparitique. La photo est prise dans une zone riche en micrite. Dans la lame complète, le taux micrite/sparite est estimé à 80%.



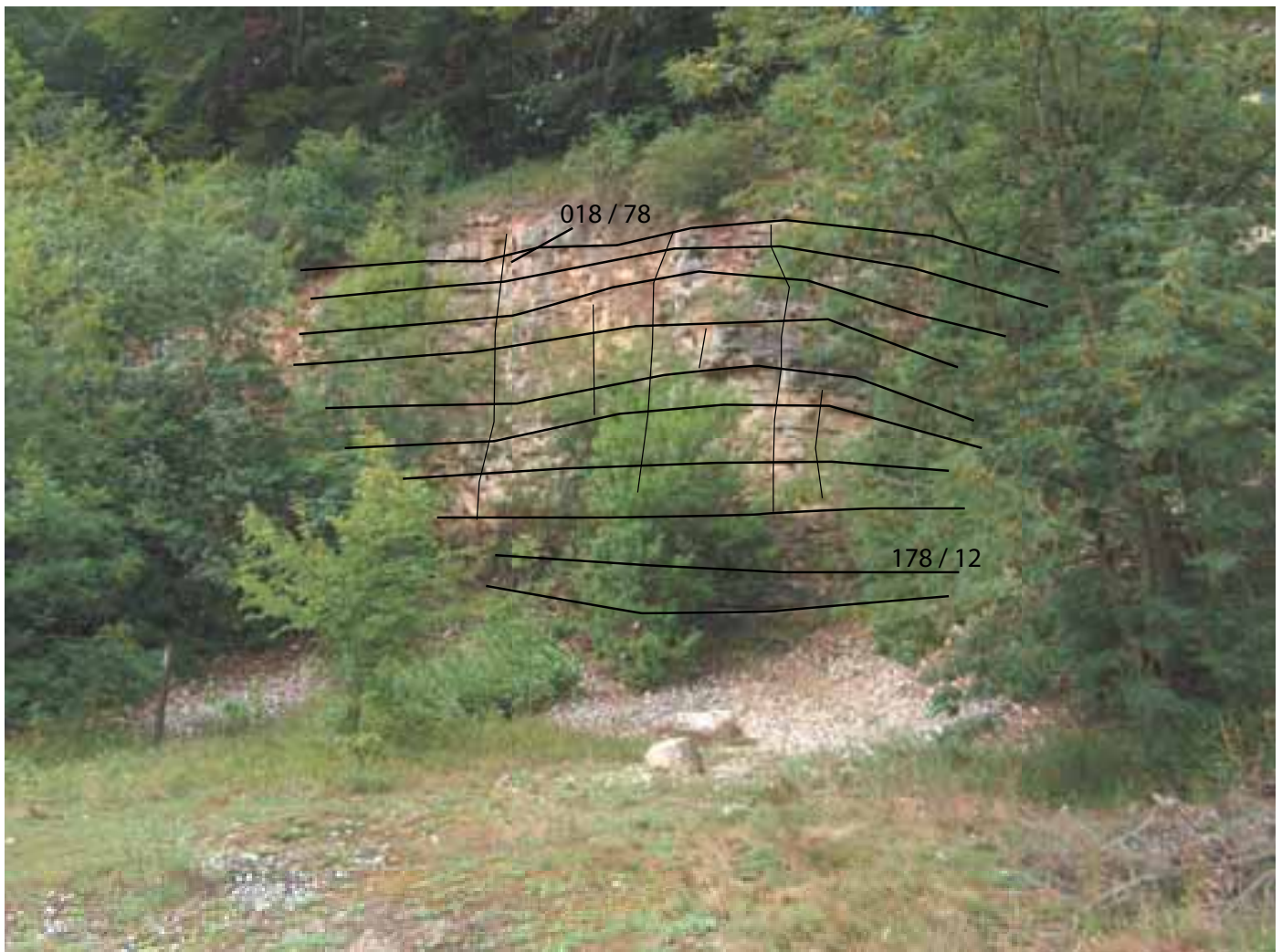


La micrite se retrouve en alterance avec des zones sparitiques. Il n'y a pas de bioclastes ni d'oncoïde. Les veines de sparite sont dues au fait que l'échantillon est une brèche avec des clastes centimétriques composés de micrite.

## **6.5 Affleurement E**

L'affleurement se situe à 1.5 km au Nord de Ursheim ( 48°58'00"N/ 10°43'15"E)

Il s'agit de bancs de malm. Les bancs sont orientés à 178/12 et d'une épaisseur moyenne de 20cm. Une fracturation de 018 / 78 est mesurée. Une carrière décrite par Chao (1987) se situe à environ 100 m et permet de créer un profil entre les deux sites.



S

N

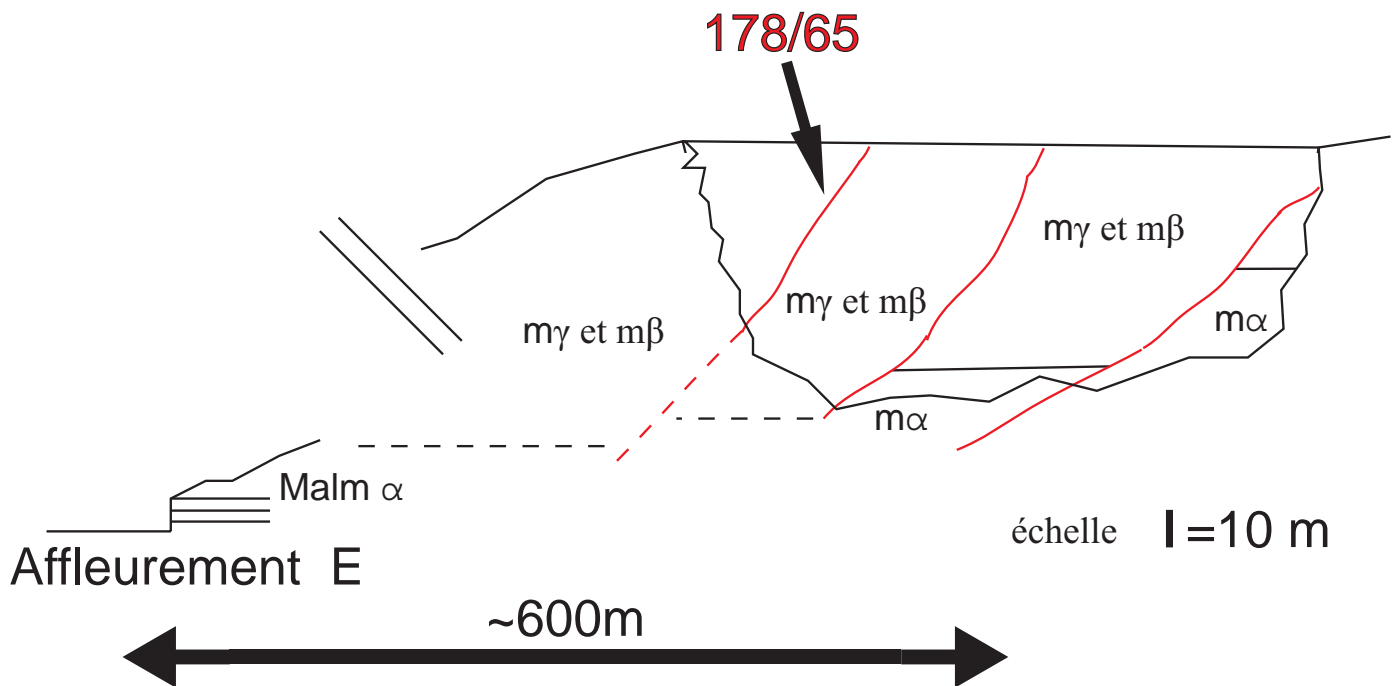
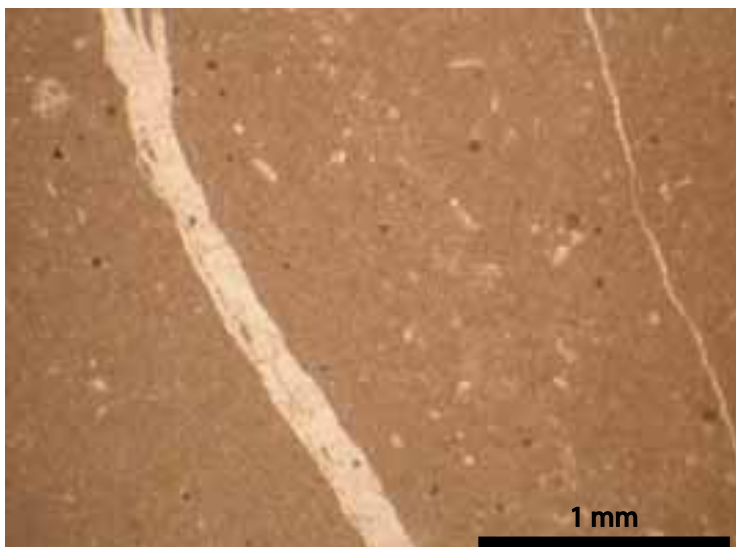


Figure : Schéma de l'affleurement et de la carrière voisine. En rouge sont représentées de grandes failles normales.

Une grande famille de failles peut être mesurée. Elles ne sont pas reliées à l'impact. Leur formation est à mettre en relation avec une phase de déformation souabe (Chao, Hüttner, Schmidt-Kaler, 1983). Les mesures de déformations mesurées dans les macles montrent aussi que les déformations mesurées ne proviennent pas du cratère.

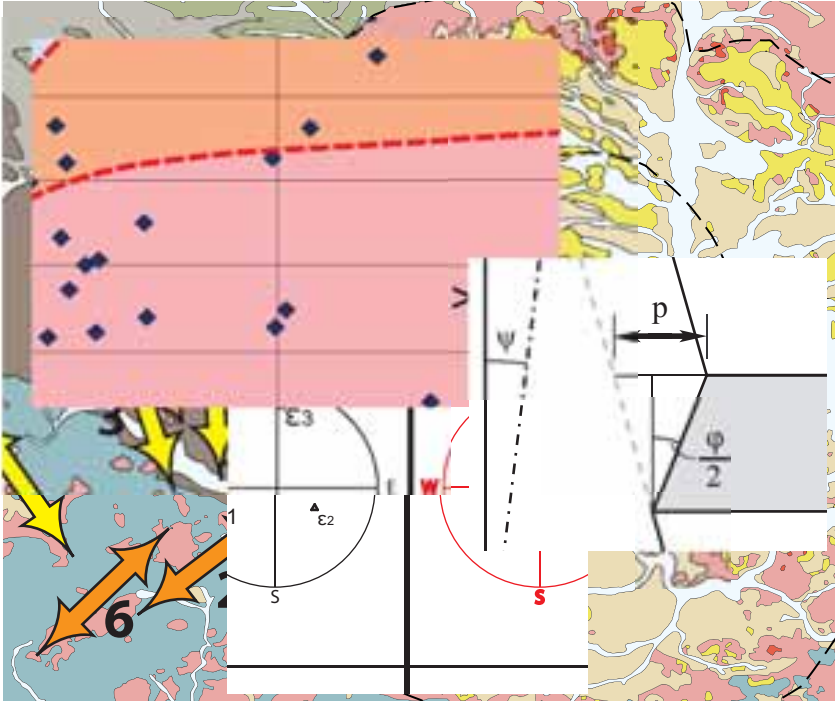
Les failles mesurées dans l'affleurement E peuvent être reliées avec les grandes failles de la carrière. En effet, la différence d'orientation entre les deux familles de failles est faible.

### Echantillon 8



Il s'agit d'une roche micritique avec quelques bioclastes. Au centre se trouve une veine de sparite. Il s'agit donc d'une micrite à bioclaste qui est classée comme calcaire malm  $\alpha$ .

# 7



## Conclusion

L'impact au cratère du Ries a produit une déformation facilement mesurable grâce aux macles de la calcite. Ces déformations se mesurent grâce à du matériel simple (microscope optique) sur des lames minces orientées. Cette méthode est donc bien adaptée pour effectuer des mesures sur de nombreux échantillons. Un autre avantage est que cette méthode permet l'observation de deux étapes de déformation.

Grâce à l'orientation des déformations mesurées dans les échantillons, leur origine peut être déterminée. Les cartes montrent que les mesures robustes sont orientées soit NNW-SSE, soit radialement au cratère d'impact. L'explication de ces directions distinctes est leur origine. L'orientation NNW-SSE provient de la phase de déformation alpine, l'autre provenant de l'impact de la météorite. Les autres orientations mesurées peuvent être reliées à des mesures incertaines. Seules deux vecteurs de résultats robustes posent problèmes. Il s'agit d'un effet local pour un échantillon et de la compaction sédimentaire pour l'autre. Les résultats sont représentés sur la carte ci-dessous.

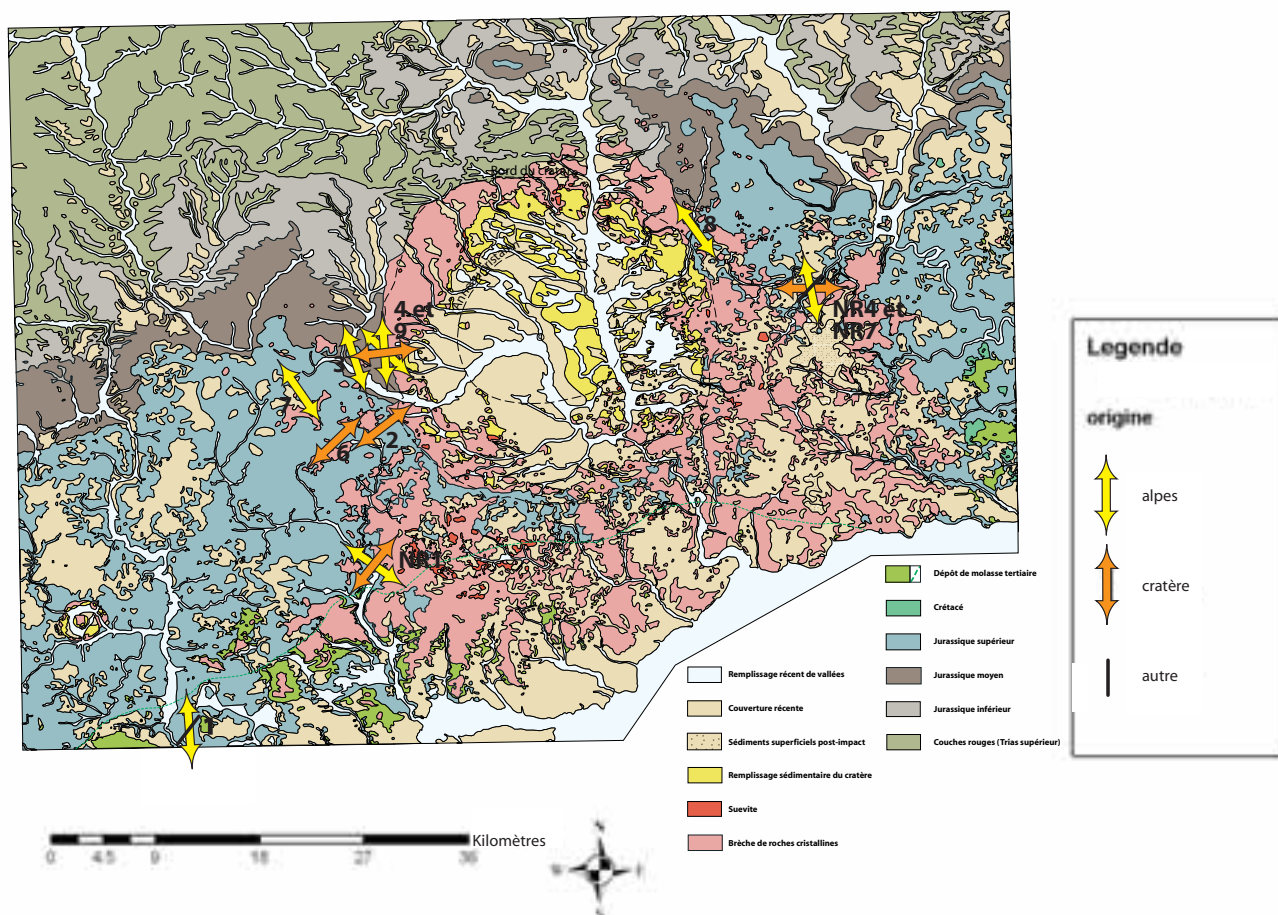
Des déformations dues à l'impact sont mesurées jusqu'à 20 km, même 40 km, mais avec un échantillon dont l'origine du vecteur déformation n'est pas certaine, car son orientation est proche de celle de la formation des

Alpes.

Les affleurements, grâce à leurs failles, permettent de confirmer les déformations obtenues par la méthode CSG.

Les mesures de température de formation des macles ne permettent pas de séparer les macles provenant de la formation des Alpes de celles provenant de l'impact du cratère ; leur origine étant mesurée dans le chapitre GSC. La température déterminée est élevée  $\sim 200^{\circ}\text{C}$  pour tous les affleurements. Cette température ne peut être expliquée par l'enfouissement sédimentaire. L'hypothèse de l'augmentation due au choc de la météorite ne permet non plus d'expliquer les températures mesurées. Pour cette hypothèse, un gradient de température augmentant avec la proximité du cratère devrait être observé.

On remarque que les vecteurs possédant un grand cisaillement proviennent de l'impact, ce qui permet de s'assurer de l'origine d'une déformation d'un échantillon qui est peu robuste.



**Carte:** Carte des origines des déformations mesurées grâce aux macles de la calcite.

En jaune: Les déformations provenant de l'impact de la météorite.

En orange: Les déformations provenant de l'orogénèse alpine

En noir: Les déformations d'autres origines

## Bibliographie

- Angelier, Mechler, 1977, Sur une méthode graphique de recherché des contraintes principales également utilisable en tectonique et en sismologie: la méthode des dièdres droits, *Bull. de la Soc. Géol. France*, 6, 1309-1318
- Burkhard M., 1993, Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review, *Journal of Structural Geology* 15, 351-358
- Cojan I. et Renard M., 2000, Sédimentologie, *Ed. Dunod*
- Cornelis C., 2002, Mineral Science, *John Wiley & Sons*
- Craddock, Farris, Robertson, 2004, Calcite-twinning constraints on stress-strain fields along the Mid-Atlantic Ridge, Iceland, *Geol. Soc. of America*, 32, 49-52
- De Bresser, Spiers, 1997, Strength characteristics of the r, f, and c slip systems in calcite, *Tectonophysics* 272 1-23
- Deer, Howie, Zussman, Rock-Forming Minerals, Volume 5B, *Longman Group Limited*
- Evans et Groshong, 1994, A computer program for the calcite strain-gauge technique, *Journal of Structural Geology* 16, 277-281
- Ferrill, Morris, Evans, Burkhard, Groshong Jr., Onasch, 2004, Calcite twin morphology: a low-temperature deformation geothermometer, *Journal of Structural Geology* 26
- Ferrill D.A., 1998, Critical re-evaluation of differential stress estimates from calcite twins in coarse-grained limestone, *Tectonophysics* 285 77-86
- Geyer, Gwinner, 1968, Einführung in die Geologie von Baden-Württemberg, *E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung*
- Gnos et al., 2006, cours de microscopie électronique à Berne
- Groshong Jr., 1972, Strain calculated from twinning in calcite, *Geol. Soc. Amer. Bull.* 82 2025-2038
- Groshong Jr., 1976, Experimental test of least-squares strain gage calculation using twinned calcite, *Geol. Soc. Amer. Bull.* 87 868-872
- Groshong Jr., Teufel, Gasteiger, 1976, Precision and accuracy of the calcite strain-gage techniques, *Geol. Soc. Amer. Bull.* 87 357-363
- Gupta, Ahrens, Wenbo Yang, 2000, Shock induced vaporization of anhydrite CaSO<sub>4</sub> and calcite CaCO<sub>3</sub>, *Shock Compression of Condensed Matter* 1259-1262
- Gupta, Love, Ahrens, 1999, Shock temperature in calcite (CaCO<sub>3</sub>): Implication for shock induced decomposition, *Shock Compression of Condensed Matter (AIP Press, 2000)* pp 1263-1266
- W.R. Jamison, J.H. Spang, 1976, Use of calcite twin lamellae to infer differential stress, *Geol. Soc. Amer. Bull.* 87, 868-872
- Herwegh M., 2000A new technique to automatically quantify microstructures of fine grained carbonate mylonites: two-step etching combined with SEM imaging and image analysis *Journal of Metamorphic Geology*, *Journal of Structural Geology* 22(4), 391-400
- Hüttner, 1983, Aufschlüsse im Ries-Meteoriten-Krater, *Bayerische Geologisches Landesamt*, 84 pp
- Klein, 2002, Mineral Science, *John Wiley & Sons, Inc*
- Langenhorst, Deutsch, Ivanov, Hornemann, On the shock behaviour of CaCO<sub>3</sub>: Dynamic loading and fast unloading experiments – Modeling – Mineralogical observations, *Lunar and Planetary Science XXXI, Lunar Planetary Institute CD ROM, Abstract # 1851*
- Lacombe O., 2006, Cours sur les macles de la calcite, <http://lacombe77.free.fr>
- Laurent P., Kern H., Lacombe O., 2000, Determination of deviatoric stress tensors based on inversion of calcite twin data from experimentally deformed monophase samples. Part II: uniaxial and triaxial stress experiments, *Tectonophysics*, 327, 131-148
- Lespinasse M. et Cathelineau M., 1995, Paleostress magnitudes determination by using fault slip and fluid inclusions planes data. *J. Geophys. Res.*, 100, B3, 3895-3904
- Love, Ahrens, Measured shock temperatures in calcite and their relation to impact-melting and devolatilization, *Lunar and Planetary Science XXIX*
- Nesse W.D., 2004, Introduction to Optical Mineralogy, *Oxford University Press*
- Pohl et Gall, 1977 ; Aufschlüsse im Ries-Meteoriten-Krater, *Bayerische Geologisches Landesamt*
- Schedl, 2006, Applications of twin analysis to studying meteorite impact structures, *Earth and Planetary Science Letters*
- Schmidt-Kaler, 1983, Geologische Situation und geschichtliche Entwicklung, Aufschlüsse im Ries-Meteoriten-Krater, *Bayerische Geologisches Landesamt*
- Seong-Seung Kang, Jun-Mo Kim, Bo-An Jang, 2005, Paleostress fields from calcite twins in the Pyeongan Supergroup, Suoth Korea, *The Island Arc*, Volume 14, Number 2, pp. 137-149(13)
- Shoemaker et Chao, 1961, Aufschlüsse im Ries-Meteoriten-Krater, *Bayerische Geologisches Landesamt*
- Turner F.J., 1953 Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae of three marbles, *Am. J. Sci.* 251 276-298.
- Van der Pluijm, Marshak, 1997, Earth Structure: an introduction to structural geology and tectonics, *WCB / McGraw-Hill*
- Waller et al., 1992, Geologie von Mitteleuropa, *E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung*
- Wenk, Lonardelli, Vogel, Tullis, 2005, Dauphiné twinning as evidence for an impact origin of preferred orientation in quartzite: An exemple from Vredefort, South Africa, *Geol. Soc. of America* 33(4), 273-276

# Annexe I : Utilisation de la platine universelle Fedorov

La méthode décrite ci-dessous est utilisée pour le programme « /twin » dans FORTRAN de *Groshong* (1987). Elle permet de mesurer les macles, leur orientation, ainsi que l'axe c des cristaux de calcite. Ces mesures sont utilisées ensuite pour calculer la déformation dans les échantillons. Cette méthode est reprise d'un protocole de mesures écrit par *Burkhard* et *Pfiffner*.

## Préparation de la table

Pour les mesures, on n'utilise que trois des cinq axes de la table Fedorov. Il s'agit de :

1. L'axe vertical interne de la platine (Inner Vert.)
2. L'axe horizontal N-S interne
3. L'axe horizontal E-W externe

Les deux autres axes restent fixes. L'axe vertical externe (« platine de la table Fedorov ») est réglé de manière à ce que le 0 se trouve à l'arrière (au Nord). Ce qui fait que la table de l'axe vertical interne a la graduation 180 au Nord.

## Tableau des données et stéréogramme

Les mesures sont notées sur un formulaire puis entrées sur Excel. Celui-ci a une ligne pour chaque macle mesuré, et en colonne, on trouve les différentes mesures.

lame:				date								
N° grain	optic axes			Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		

Lame :	Numéro de la lame. Le premier chiffre correspond au numéro de l'échantillon.
N° grain :	Chaque ligne est une macle différente. Plusieurs macles peuvent appartenir au même grain de calcite.
CVIV innen vert :	Mesure permettant de trouver l'azimut de l'axe c.
CVP pole :	Angle de l'axe c par rapport à l'horizontal de la lame (~pendage)
E=2 W=4 :	Permet de préciser l'orientation, Est ou Ouest, de la mesure de CVP pole.
TWINIV inner vert :	Mesure permettent de trouver l'azimut du pôle de la macle
TWIN pole :	Angle du pôle de la macle par rapport à l'horizontal de la lame (~pendage)
N=1 S=3 :	Permet de préciser l'orientation, Nord ou Sud, de la mesure de TWIN pole
Total M :	Nombre total de macle fin dans le grain.
Ep :	Estimation de l'épaisseur des macles fins.(mesure précise d'épaisseur impossible)
Total M :	Nombre total de macles épaisses.
Ep. int et ext :	Epaisseur de l'intérieur et de l'extérieur des macles
ep. Perpendi :	Epaisseur du grain de calcite mesurée perpendiculairement à la macle.
ep. Parra :	Epaisseur du grain de calcite mesurée parallèlement à la macle

Le stéréogramme est utilisé pour vérifier les mesures. En effet, dans un cristal de calcite, le pôle d'une macle

et l'axe c sont séparés par un angle de  $26^\circ$ . Il suffit donc de reporter ces deux mesures sur un stéréogramme et de lire l'angle entre eux pour vérifier leur précision.

## Acquisition des données

Au départ, tous les axes sont horizontaux.

### Macle

Une macle est orienté E-W par une rotation du cercle interne, puis on cherche à mettre la macle en position verticale par la rotation du tambour (axe horizontale externe E-W).

On note la position sur le formulaire : *TWINIV inner vert* (« azimuth »), *TWIN pole* (pendage) et le côté de lecture sur le tambour  $N=1$   $S=3$ .

Le pôle de la macle est reporté sur le stéréogramme.

On souhaite le pourcentage de macle par rapport à la longueur du grain choisi. On mesure donc l'épaisseur de la macle et la longueur du cristal grâce à l'échelle dans l'objectif vertical. On les note sur le formulaire dans les rubriques *Microtwins* ou *Thicktwin*s, selon si on a des macles fines ou épaisses. Le formulaire contient 7 colonnes, mais seules 3 sont suffisantes pour connaître le pourcentage.

### Axe c

Le but est de positionner le plan qui contient l'axe c ( $n_a$ ) parallèle à l'axe horizontal E-W. La difficulté est de le différencier de son plan perpendiculaire ( $n_j$ ), car ils sont tous les deux noirs avec l'analyseur du microscope.

Le compensateur Berek permet d'identifier  $n_a$  de  $n_j$ .

Avec l'analyseur du microscope, le grain est tourné (avec le cercle interne) dans une position éclairée. On tourne alors le compensateur Berek depuis sa position de base. Deux cas sont possibles :

1.  $n_a$  du grain est aligné avec le compensateur, les couleurs se décale dans le gris. (voir la charte de Michel-Lévy pour les couleurs)
2.  $n_j$  est aligné avec le compensateur, les couleurs montent.

On trouve donc l'axe c. Le cercle interne est tourné pour aligner  $n_a$  avec l'axe E-W. C'est une position d'extinction maximale. En basculant le tambour et l'axe interne N-S, on cherche la position dans laquelle le cristal reste toujours noir, quelque soit la position du tambour. Maintenant, l'axe c est parallèle à l'axe E-W du tambour.

La position sur le formulaire est notée comme suit : *CVIV innen vert*. (azimut), *CVP pole* : (pendage que l'on lit sur un goniomètre) et  $E=2$   $W=4$  selon si on prend le goniomètre de droite ( $E=2$ ) ou de gauche ( $W=4$ ).

L'axe c est noté sur le stéréogramme.

Il peut avoir plusieurs macles mesurables dans un même grain (jusqu'à trois), mais majoritairement une ou deux. On procède exactement de la même manière pour chaque macle, c'est-à-dire on ajoute une nouvelle ligne dans le formulaire.

Le formulaire complété est alors introduit dans le programme `/twin`, après avoir été converti en fichier de type `.txt`. Voir *l'annexe III : Explication du fichier d'entrée dans Cygwin*

# Annexe II : Liste des mesures de macles

Ce sont les mesures brutes des macles obtenues avec la table Fedorov. Elles sont regroupées par lame.

Le « ' » dans « lame X.X' » indique que le talon est le même que pour la lame X.X.

Pour les explications des en-têtes des tableaux, voir l'*annexe I* : « Utilisation de la table Fedorov »

## Lame 1.1

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
4	49	29	4	107	10	3	3	0.1			17	18	
5	206	32	4	108	5	1	6	0.1			18	18	
6	105	36	4	200	25	1	1	0.1			6	9	
9	243	15	4	104	13	3	12	0.1			39	25	
10	227	20	4	109	11	3	6	0.1			17	17	
11	138	46	4	186	8	1	6	0.1			22	16	
12	138	46	4	83	4	3	1	0.1			16	21	
14	76	0	2	129	22	3	2	0.1			15	13	
15	76	0	2	206	0	1	1	0.1			14	11	
16	11	4	4	321	27	3	2	0.1			27	28	
17	20	49	4	311	22	3	2	0.1			25	30	
18	140	36	4	200	5	3	2	0.1			18	18	
19	105	32	4	177	23	3	3	0.1			12	19	

## Lame 1.2

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	69	22	4	9	8	3	2	0.05			22	24	
4	131	28	2	132	14	3	4	0.1			31	27	
6	131	28	2	83	0	3	1	0.1			33	27	

## Lame 1.3

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	120	54	2	15	27	1	3	0.1			34	41	
2	120	54	2	187	50	1	1	0.2			26	47	
3	86	23	4	125	33	1	1	0.1			16	13	
4	211	57	4	125	33	3	1	0.1			16	23	
5	231	49	4	126	29	3	2	0.1			12	14	
6	100	41	2	222	34	3	1	0.1			53	30	
7	100	41	2	164	26	3	1	0.1			27	36	
8	321	41	2	79	36	3	1	0.1			31	25	
9	187	57	4	125	24	3	1	0.1			10	14	
10	69	55	2	188	36	3	2	0.1			31	35	
11	69	55	2	119	41	3	1	0.1			30	37	
12	147	50	2	174	26	1	2	0.1			19	20	
13	147	50	2	198	31	1	2	0.1			19	20	
14	147	47	2	198	31	1	1	0.1			9	10	
15	145	47	2	251	32	3	3	0.1			19	21	
16	145	47	2	192	45	3	1	0.1			16	20	
17	161	62	4	179	38	3	1	0.2			27	42	
18	69	52	2	182	39	1	1	0.1			14	10	
19	232	30	2	35	11	1	3	0.1			21	20	

## Lame 2.1

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	69	5	2	181	8	3	4	0.1			23	12	
2	52	15	2	158	1	3	3	0.1			2	2	

## Lame 2.2

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	140	28	2	145	8	3	1	0.1			9	9	

## Lame 2.3

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	118	37	4	180	20	1	1	0.1			6	5	

## Lame 3.1

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	37	5	4	286	5	1	4	0.1			10	10	
2	242	42	2	350	16	3	6	0.1			13	4	
3	250	41	2	129	22	1	10	0.1			10	11	
4	127	36	2	200	15	3	5	0.1			4	2	
5	272	42	2	216	32	1	3	0.1			8	8	

## Lame 3.2

Pas de macle mesurée dans cette lame

## Lame 3.2'

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	42	29	4	146	53	1	2	0.2			9	6	

### Lame 3.3

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole		N=1 S=3	Microtwins		Thicktwins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole		Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	105	4	2	165	6	1	1	0.2			22	39	
2	169	34	4	89	14	1	3	0.1			7	4	
3	19	32	4	92	55	1	1	0.1			5	3	
4	126	47	2	200	19	3	2	0.1			9	24	
5	277	18	2	210	12	1	2	0.2	2	0.2 / 0.3	17	4	
6	203	42	4	306	12	1	1	0.1			3	10	

### Lame 4.1

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole		N=1 S=3	Microtwins		Thicktwins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole		Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	114	60	4	220	32	1	4	0.1			48	34	
2	47	20	4	154	7	1	1	0.1			8	8	
3	185	49	4	30	30	3	6	0.1			5	8	
4	147	34	2	208	23	3	5	0.1	3	0.2 / 0.3	4	5	

### Lame 4.2

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole		N=1 S=3	Microtwins		Thicktwins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole		Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	59	10	4	138	40	1	3	0.1			11	14	
2	102	20	4	203	7	3	3	0.1			6	7	
3	200	48	4	244	43	3	10	0.2			10	6	
4	200	48	4	291	20	3	4	0.1			12	10	
5	33	22	4	104	12	1	9	0.05			43	25	
6	172	49	4	233	30	1	2	0.1			21	10	

### Lame 4.2'

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole		N=1 S=3	Microtwins		Thicktwins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole		Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	56	3	4	133	10	3	3	0.1			5	4	
2	111	28	2	232	27	3	7	0.2			15	6	
3	320	26	4	69	14	1	10	0.2			10	7	
4	99	11	2	204	10	3	2	0.1			10	20	
5	19	23	4	92	3	3	3	0.1			7	4	
6	112	3	4	224	5	3	3	0.1			4	2	
7	232	2	2	124	5	3	4	0.1			6	3	
8	315	41	2	243	22	1	2	0.1			10	7	
9	128	45	4	245	41	1	3	0.1			12	15	
10	218	18	2	102	82	3	4	0.1	3	0.1 / 0.2	12	7	
11	112	50	2	82	35	3	2	0.1			5	5	
12	47	20	4	135	0	1	2	0.2			8	7	
13	168	47	2	103	29	1	1	0.1			4	5	
14	94	19	2	206	0	3	2	0.1			11	12	
15	95	11	4	211	4	1	1	0.1			26	24	
16	95	12	4	210	10	1	2	0.1			6	2	
17	55	12	4	162	8	3	1	0.1			6	5	
18	210	44	2	90	30	1	2	0.1			7	9	
19	24	42	4	91	27	1	1	0.1			10	9	
20	265	4	2	51	55	3	3	0.2			22	19	
21	114	32	2	174	4	3	3	0.1			24	2	
22	93	44	4	206	28	1	6	0.1			24	6	
23	80	46	2	127	42	3	6	0.1			24	30	
24	70	42	4	122	41	1	4	0.1			15	20	
25	332	40	2	62	28	3	2	0.1			6	18	
26	332	40	2	162	28	3	4	0.1			6	18	
27	194	60	2	69	51	1	7	0.1			12	25	

### Lame 4.3

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole		N=1 S=3	Microtwins		Thicktwins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole		Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	187	46	4	123	36	3	6	0.1			20	20	
2	6	2	4	110	14	1	1	0.1			20	17	
3	156	6	4	224	30	1	8	0.1			18	20	
4	127	8	2	236	29	3	3	0.1	2	0.2 / 0.1	10	16	
5	139	31	4	215	21	3	36	0.1			100	62	
6	339	6	4	64	22	1	18	0.1			49	36	
7	287	52	4	246	55	3	5	0.2			12	27	
8	84	30	2	178	0	3	2	0.2			16	31	
9	74	10	2	135	17	3	11	0.1			17	19	
10	182	31	2	119	32	1	1	0.1			5	7	
11	123	26	2	230	10	3	6	0.2			14	22	
12	12	7	2	126	13	1	4	0.1			6	5	

### Lame 4.3'

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole		N=1 S=3	Microtwins		Thicktwins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole		Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	74	58	4	142	33	1	1	0.1			31	40	
2	74	58	4	207	55	1	4	0.1			32	35	
3	132	44	4	207	20	1	8	0.2			20	19	
4	148	22	2	226	10	1	7	0.1			60	13	
5	16	48	2	269	25	3	6	0.1			11	15	
6	16	48	2	151	19	3	1	0.1			8	7	
7	309	54	4	49	54	1	1	0.1			8	7	
8	153	53	4	214	41	1	2	0.1			5	9	

### Lame 5

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole		N=1 S=3	Microtwins		Thicktwins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole		Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	23	10	4	330	8	1	1	0.1			11	11	
2	128	4	2	355	8	1	2	0.2			8	13	
3	280	10	4	25	26	3	2	0.01			12	8	

### Lame 6.1

grain	optic axes			E=2 W=4	Twin Pole		N=1 S=3	Microtwins		Thicktwins		ep. Perpendi	ep. Parra
	CVIV innen vert.	CVP pole			TWINIV inner vert.	TWIN pole		Total M	ep.	Total M	ep. int et ext		
1	193	18	2	274	0	3					7	14	
2	22	31	4	318	21	3	2	0.1	8	0.2 / 0.3	6	6	
3	36	25	4	336	32	3			2	0.2 / 0.3	5	3	
4	34	27	4	341	32	3	3	0.2 / 0.1	3	0.2 / 0.1	2	5	
5	34	27	4	290	10	3	3	0.1			5	7	
6	35	29	4	332	33	3					5	7	
7	39	29	4	349	51	3	2	0.1	3	0.2 / 0.1	5	17	
8	236	42	2	4	2	3	4	0.2 / 0.1	4	0.2 / 0.1	5	6	
9	71	35	4	5	20	3	5	0.1			15	14	
10	38	46	2	342	35	1	3	0.1			5	15	
11	215	30	4	159	28	3	2	0.1			7	8	
12	50	40	2	350	23	1	2	0.1			7	8	
13	48	28	2	170	44	3			1	0.2 / 0.1	4	20	

### Lame 6.2

grain	optic axes			Twin Pole			N=1		Microtwins		Thickt看ins		
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra	
1	27	44	4	119	14	1	2	0.1			9	8	
2	28	46	2	306	27	1	1	0.1			2	5	
3	342	54	2	266	31	3	1	0.1			2	11	
4	209	42	2	302	10	3	1	0.1			9	9	

### Lame 6.3

grain	optic axes			Twin Pole			N=1		Microtwins		Thickt看ins		
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra	
1	106	31	4	177	13	1	1	0.1			3	5	

### Lame 7.1

Pas de macle mesurée dans cette lame

### Lame 7.1'

grain	optic axes			Twin Pole			N=1		Microtwins		Thickt看ins		
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra	
1	26	56	2	110	2	3	3	0.1			8	10	

### Lame 7.2

grain	optic axes			Twin Pole			N=1		Microtwins		Thickt看ins		
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra	
1	241	12	4	154	12	1	3	0.1			18	21	
2	80	26	4	23	26	3	12	0.1			20	7	

### Lame 7.3

grain	optic axes			Twin Pole			N=1		Microtwins		Thickt看ins		
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra	
1	121	30	4	180	36	1	2	0.1			35		
2	290	50	4	237	40	3			3	0.2 / 0.3	28		
3	102	27	4	207	2	3			15	0.2	53		
4	344	39	4	267	16	3	11	0.1			30	27	
5	320	5	4	256	13	3	14	0.1			28	40	
6	303	3	2	12	13	1	2	0.1			17	29	
7	303	37	2	58	15	1					12	30	
8	282	2	2	18	0	1	1	0.1			19	21	
9	112	34	2	352	46	1	2	0.1			16	16	
10	194	42	4	107	14	3	4	0.3			25	20	
11	90	37	4	326	31	3	11	0.1			20	20	
12	263	0	2	146	4	1	6	0.1	4	0.2 / 0.3	19	17	

### Lame 8.1

grain	optic axes			Twin Pole			N=1		Microtwins		Thickt看ins		
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra	
1	324	4	2	29	2	3	1	0.1			20	25	
2	232	15	4	250	21	3					5	10	

### Lame 8.2

grain	optic axes			Twin Pole			N=1		Microtwins		Thickt看ins		
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra	
1	46	14	4	343	11	3	2	0.1			5	3	
2	134	31	4	49	1	3	1	0.1	2	0.1 / 0.3	10	12	
3	139	7	2	273	4	3	2	0.1			8	13	
4	139	7	2	203	13	3	2	0.1			12	16	
5	19	14	2	308	28	1	2	0.1			7	6	
6	319	47	2	67	22	3	2	0.5			12	14	
7	193	48	4	115	25	3	2	0.1			8	12	
8	318	47	2	238	22	1	2	0.05			5	6	
9	342	47	4	48	34	1	3	0.1			10	13	
10	240	13	4	352	11	3	1	0.1			5	5	

### Lame 8.3

grain	optic axes			Twin Pole			N=1		Microtwins		Thickt看ins		
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra	
1	144	37	4	83	37	1	2	0.1			18	26	
2	230	46	2	136	21	1	1	0.1			12	24	

### Lame 8.3'

grain	optic axes			Twin Pole			N=1		Microtwins		Thickt看ins		
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra	
1	249	15	4	299	39	3	2	0.05			22	20	

### Lame 9.1

grain	optic axes			Twin Pole			N=1		Microtwins		Thickt看ins		
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra	
1	191	35	2	229	19	3	1	0.1			23	22	
2	220	50	2	341	42	3	1	0.1			12	30	
3	41	29	4	145	8	1	1	0.01			17	31	
4	191	38	2	124	21	1	1	0.1			22	20	
5	86	49	4	150	31	1	2	0.1			6	11	
6	40	45	2	138	70	3	1	0.1			3	4	
7	334	4	2	219	3	1	3	0.2			9	10	
8	334	4	2	262	4	1	3	0.1			10	8	
9	81	30	2	342	0	1	13	0.1			10	15	

## Lame 9.2

grain	optic axes			Twin Pole			Microtwins		Thicktwins			
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra
1	315	35	2	206	14	1	3	0.1			14	25
2	238	38	4	168	43	3	2	0.1			9	16
3	146	27	2	236	2	3	11	0.2			31	6
4	330	24	2	89	26	1	4	0.1			19	23

## Lame 9.3

grain	optic axes			Twin Pole			Microtwins		Thicktwins			
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra
1	253	32	2	240	18	1	9	0.1			31	20
2	256	34	2	220	29	1	4	0.1			28	34

## Lame NR 1.1

grain	optic axes			Twin Pole			Microtwins		Thicktwins			
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra
1	175	29	4	224	39	1	1	0.1			4	6
2	112	28	2	181	22	3	2	0.1			5	6
3	272	45	2	216	32	1	2	0.1			5	7
4	168	45	4	237	30	1	2	0.05			5	10
5	126	48	2	203	30	3	2	0.1			8	12
6	121	15	4	182	25	1	2	0.1			4	3
7	144	23	4	237	3	3	1	0.2			5	3
8	32	3	2	212	7	3	1	0.1			5	5
9	322	3	2	257	15	3	2	0.1			5	4
10	350	45	4	294	31	3	1	0.1			5	10

## Lame NR 1.2

grain	optic axes			Twin Pole			Microtwins		Thicktwins			
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra
1	116	32	4	186	17	1	2	0.1			5	4
2	106	50	4	227	34	1	2	0.1			9	10
3	64	36	4	138	17	1	2	0.1			4	6

## Lame NR 1.3

grain	optic axes			Twin Pole			Microtwins		Thicktwins			
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra
1	117	10	4	234	16	1	1	0.1			6	5
2	34	31	4	96	22	1	1	0.1	1	0.2 / 0.3	4	4
3	309	14	4	22	2	3	6	0.1			19	7
4	286	29	2	25	1	1	1	0.1			4	4
5	58	55	2	346	35	1	3	0.1			20	29
6	89	63	2	50	45	1	2	0.1			5	6
7	114	8	2	219	33	3	8	0.1			18	18
8	261	10	2	198	6	3	7	0.1			21	26
9	274	0	2	209	7	3	5	0.1			10	6
10	309	3	4	54	27	1	1	0.1			10	12
11	297	11	4	45	17	1	3	0.1			7	9
12	28	15	4	278	10	3	10	0.1			10	8
13	106	41	4	204	8	1	1	0.1			10	9
14	300	26	2	3	45	3	2	0.1			9	14

## Lame NR 4.1

Pas de macle mesurée dans cette lame

## Lame NR 4.2

Pas de macle mesurée dans cette lame

## Lame NR 4.3

grain	optic axes			Twin Pole			Microtwins		Thicktwins			
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra
1	337	8	2	43	7	3	1	0.2			25	20
2	19	12	4	316	26	3	8	0.1			50	46
3	19	6	4	311	9	3	2	0.1			20	24
4	19	6	4	266	32	3	1	0.1			19	22
5	189	8	2	260	24	3	1	0.1			20	15
6	191	28	2	170	10	3	2	0.1			15	12
7	129	2	2	196	1	3	9	0.1			23	20
8	156	7	2	216	2	3	3	0.1			18	10
9	230	17	2	162	9	1	8	0.1			15	16
10	80	8	2	201	2	3	4	0.2	3	0.2 / 0.3	9	9
11	194	7	2	133	1	3	3	0.2			30	21
12	194	7	2	187	8	3	3	0.2			30	21
13	204	17	2	141	42	1	2	0.1			18	30
14	80	25	4	186	55	1	3	0.1			22	29
15	194	29	2	90	30	1	7	0.1			16	16
16	20	24	2	112	2	3	13	0.1			47	52
17	20	24	2	141	45	3	4	0.1	3	0.2 / 0.3	39	52
18	20	24	2	76	55	3	4	0.1			31	52
19	205	14	4	97	46	3	2	0.1			13	37
20	244	43	2	185	26	1	5	0.1			20	31
21	174	30	4	237	53	1	2	0.1			13	22

### Lame NR 7.1

grain	optic axes			Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins			
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra
1	74	13	2	180	3	1			4	0.4 / 0.6	10	9
2	87	60	4	123	53	1	2	0.1			31	43
3	116	14	4	179	13	1	2	0.1			90	83
4	116	14	4	222	5	3	4	0.1			90	76
5	110	33	4	156	43	1	3	0.1			47	46
6	69	12	4	138	10	3	3	0.1			19	12

### Lame NR 7.2

grain	optic axes			Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins			
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra
1	31	44	4	123	55	1	5	0.2			7	16
2	139	43	4	186	50	1	2	0.1			8	4

### Lame NR 7.3

grain	optic axes			Twin Pole			Microtwins		Thickt看ins			
	CVIV innen vert.	CVP pole	E=2 W=4	TWINIV inner vert.	TWIN pole	N=1 S=3	Total M	ep.	Total M	ep. int et ext	ep. Perpendi	ep. Parra
1	318	34	2	38	12	3	40	0.1			47	54
2	318	34	2	84	40	3	53	0.1			49	45
3	323	21	2	75	1	1	8	0.1			16	17
4	270	19	4	25	11	1	3	0.1			32	20
5	39	60	4	312	32	3	40	0.05			26	27



## Deux premières lignes (rectangle bleu clair)

idata    igepsi    ict    icon    idev    icompr  
ratio    ifudge

### Première ligne

idata = 1 imprimer les données d'entrée, =0 omettre

igepsi = 1 imprimer l'azimut et le pendage des axes e,c et g et l'angle entre e et c et  $\tan(\varphi/2)$ , =0 omettre

ict = 1 calculer et imprimer les axes de compressions de tensions et l'espacement des lamelles de macles, 0= omettre

icon = 1 effectuer l'analyse numérique dynamique selon Spang, = 0 omettre  
important, si ict =1, alors icon doit valoir 1

idev = 1 imprimer la déviation des mesures de déformations calculées par rapport à la contrainte, = 0 omettre

icompr = 1 effectuée pour chaque valeur un test sur le tenseur de contrainte, utilisé pour connaître les valeurs attendues (expected value) et calculer les déviations des valeurs, =0 omettre

### Seconde ligne

ratio = fraction de macle par micro-macle mesurée

ifudge = épaisseur effective des macles épaisses

= 1 utiliser l'épaisseur extérieure, = 2 utiliser l'épaisseur intérieure,

= 3 utiliser l'épaisseur moyenne

## Lignes de lame (rectangle rouge clair)

```
r11          1-0.7849  0.4532  0.4226  0.3660-0.2113  0.9063  0.5000  0.8660  0.0000
1
1.          49.   29.   4  107.   10. 3   3. 0.10          17.   18.
2.         206.  32.   4  108.   5. 1   6. 0.10          18.   18.
3.         105.  36.   2  200.  25. 3   1. 0.10           6.    9.
4.         243.  15.   4  104.  13. 1  12. 0.10          39.   25.
5.         227.  20.   2  109.  11. 3   6. 0.10          17.   17.
6.         138.  46.   4  186.   8. 1   6. 0.10          22.   16.
7.         138.  46.   4   83.   4. 3   1. 0.10          16.   21.
8.          76.   0.   2  129.  22. 3   2. 0.10          15.   13.
9.          76.   0.   2  206.   0. 1   1. 0.10          14.   11.
10.         11.   2.   4  321.   7. 3   2. 0.10          27.   28.
11.         20.  49.   4  311.  22. 3   2. 0.10          25.   30.
12.        140.  36.   4  200.   5. 3   7. 0.10          16.   18.
13.        105.  32.   4  177.  23. 3   3. 0.10          12.   19.
999.
```

La première ligne correspond aux cosinus directeurs. Ces données permettent de situer la lame dans le système de coordonnées géographiques standard. On l'obtient en utilisant le programme ./rotate dans Cygwin (Groshong 1987).

Les chiffres en bleu indiquent le code indiquant au programme le début et la fin des données.

Les mesures sont organisées dans le même ordre que le fichier informatique présenté dans *l'annexe II* :

# Annexe IV : Explication des feuilles de résultats

## Cygwin

Le document suivant est un exemple pour un fichier de sortie du programme «./twin » sur Cygwin. Ci-dessous, il s'agit des trois lames de l'échantillon NR 1, qui composent un seul fichier, car ils proviennent du même échantillon.

Les encadrées ci-dessous explique les principaux éléments :

thin section	r11	number of twin sets is	10	microtwins	thick twins	grain widths
grain	optic axis orientaion	twin set orient ation	number thickness	number outer-inner thickness	normal to, parallel	
to twin	inner vert plunge	inner vert plunge				
1.0	49.	14. 4	107.	10. 3	3. 0.10	0. 0.00 0.00
2.0	206.	27. 4	108.			0.00 0.00
3.0	105.	43. 2	200.			0.00 0.00
4.0	138.	46. 4	202.			0.00 0.00
5.0	138.	46. 4	42.			0.00 0.00
6.0	76.	0. 2	141.	14. 3	2. 0.10	0. 0.00 0.00
7.0	76.	0. 2	196.	0. 1	1. 0.10	0. 0.00 0.00
8.0	18.	2. 4	321.	7. 3	2. 0.10	0. 0.00 0.00
9.0	20.	49. 4	311.	22. 3	2. 0.10	0. 0.00 0.00
10.0	128.	22. 4	200.	5. 3	7. 0.10	0. 0.00 0.00

Données de départ

data will be rotated according to the following direction cosines  
 l1 = -0.7849 m1 = 0.4532 n1 = 0.4226  
 l2 = 0.3660 m2 = -0.2113 n2 = 0.9063  
 l3 = 0.5000 m3 = 0.8660 n3 = 0.0000

slide r11 number of twin sets is 10 thicktwi n/microtwin ratio = 1.000 thick twin option is 1  
 angles are with respect to rotated coordinate system

Cosinus directeurs : réorienter la lame

grain	bearing c	plunge c	bearing e	plunge e	angle(c,e)	bearing g	plunge g	tanpsi/2
		62.4	278.1	77.2	39.8	113.1	12.3	0.0061235
		63.0	5.7	81.4	32.9	227.4	6.4	0.0115667
		7.3	171.1	4.6	22.4	261.7	7.8	0.0057833
		15.8	126.0	2.7	30.3	218.1	38.2	0.0094636
5.0	281.6	15.8	303.0	15.3	20.6	211.8	4.1	0.0021688
6.0	150.0	39.0	179.6	60.7	28.4	302.2	16.8	0.0046267
7.0	150.0	39.0	150.0	8.9	30.0	330.0	81.0	0.0024786
8.0	346.0	82.7			33.3	322.1	26.7	0.0025704
9.0	55.7	40.8			31.7	207.8	11.5	0.0027760
10.0	307.5	12.1			32.2	248.1	32.0	

Angle entre l'axe c et la macle

Psi (ψ) correspond à l'angle de déformation cristal dû au cisaillement

angles are with respect to rotated coordinate system

grain	compression axes bearing	plunge	tension axes bearing	plunge	no. of lamellae per millimeter
1.0	290.3	32.6	117.3	57.2	176.5
2.0	42.3	38.3	233.8	51.1	333.3
3.0	306.6	2.2	216.2	8.8	166.7
4.0	165.0	28.1	268.6	23.8	272.7
5.0	348.3	7.8	256.4	13.7	62.5
6.0	271.4	55.2	140.8	24.3	133.3
7.0	330.0	36.0	150.0	54.0	71.4
8.0	139.5	18.3	330.0	71.4	74.1
9.0	180.3	50.4	47.5	29.3	80.0
10.0	196.7	25.8	295.9	18.3	437.5

g : ligne de la projection de l'axe c sur le plan de la macle

thin section	r12	number of twin sets is	3	microtwins	thick twins	grain widths
grain	optic axis orientaion	twin set orient ation	number thickness	number outer-inner thickness	normal to, parallel	
to twin	inner vert plunge	inner vert plunge				
1.0	69.	22. 4	9. 8. 3	0.10	0. 0.00 0.00	22. 24.
2.0	236.	45. 2			0.00 0.00	31. 43.
3.0	142.	29. 2			0.00 0.00	33. 27.

Même chose, pour la deuxième lame

data will be rotated according to  
 l1 = 0.5000 m1 = 0.8660  
 l2 = -0.3660 m2 = 0.2113  
 l3 = -0.7849 m3 = 0.4532

slide r12 number of twin sets is 3 thicktwi n/microtwin ratio = 1.000 thick twin option is 1  
 angles are with respect to rotated coordinate system

grain	bearing c	plunge c	bearing e	plunge e	angle(c,e)	bearing g	plunge g	tanpsi/2
1.0	269.0	8.2	63.5	11.6	32.1	325.0	36.0	0.0031545
2.0	294.0	3.4	277.1	34.8	35.1	142.8	45.1	0.0022387
3.0	6.4	24.8	346.1	64.1	41.5	197.1	22.6	0.0010515

dynamic analysis of thin section r12  
 angles are with respect to rotated coordinate system

grain	compression axes bearing	plunge	tension axes bearing	plunge	no. of lamellae
-------	--------------------------	--------	----------------------	--------	-----------------

	bearing	plunge	bearing	plunge	per millimeter
1.0	290.3	32.6	117.3	57.2	176.5
2.0	42.3	38.3	233.8	51.1	333.3
3.0	306.6	2.2	216.2	8.8	166.7
4.0	165.0	28.1	268.6	23.8	272.7
5.0	348.3	7.8	256.4	13.7	62.5
6.0	271.4	55.2	140.8	24.3	133.3
7.0	330.0	36.0	150.0	54.0	71.4
8.0	139.5	18.3	330.0	71.4	74.1
9.0	180.3	50.4	47.5	29.3	80.0
10.0	196.7	25.8	295.9	18.3	437.5
1.0	20.6	33.8	279.6	15.9	90.9
2.0	220.2	64.8	118.1	5.6	129.0
3.0	219.3	65.2	7.2	21.4	30.3

thin section r13 number of twin sets is 19  
 grain optic axis orientation twin set orientation microtwins thick twins grain widths  
 to twin inner vert plunge inner vert plunge number thickness number outer-inner thickness normal to, parallel

1.0	120.	54.	2	15.	27.	1	3	0.10	0.	0.00	0.00	34.	41.
2.0	120.	54.	2	22.	50.	1	2	0.20	0.	0.00	0.00	22.	47.
3.0	86.	49.	4	10.	10.	1	1	0.10	0.	0.00	0.00	9.	13.
4.0	211.	57.	4	10.	10.	1	1	0.10	0.	0.00	0.00	16.	23.
5.0	231.	49.	4	10.	10.	1	1	0.10	0.	0.00	0.00	12.	14.
6.0	100.	41.	2	10.	10.	1	1	0.10	0.	0.00	0.00	53.	30.
7.0	100.	41.	2	10.	10.	1	1	0.10	0.	0.00	0.00	27.	36.
8.0	321.	55.	2	79.	36.	3	1.	0.10	0.	0.00	0.00	31.	25.
9.0	187.	37.	4	125.	24.	3	1.	0.10	0.	0.00	0.00	10.	14.
10.0	69.	55.	2	186.	36.	3	2.	0.10	0.	0.00	0.00	31.	35.
11.0	69.	55.	2	119.	41.	3	1.	0.10	0.	0.00	0.00	30.	37.
12.0	147.	50.	2	71.	26.	1	2.	0.10	0.	0.00	0.00	19.	20.
13.0	147.	50.	2	195.	45.	3	3.	0.10	0.	0.00	0.00	17.	21.
14.0	82.	47.	4	198.	31.	1	1.	0.10	0.	0.00	0.00	9.	10.
15.0	145.	47.	2	251.	32.	3	3.	0.10	0.	0.00	0.00	19.	21.
16.0	145.	47.	2	192.	45.	3	1.	0.10	0.	0.00	0.00	16.	20.
17.0	161.	62.	4	79.	38.	3	1.	0.20	0.	0.00	0.00	27.	42.
18.0	65.	52.	4	185.	39.	1	1.	0.10	0.	0.00	0.00	14.	10.
19.0	292.	30.	4	35.	11.	1	3.	0.10	0.	0.00	0.00	21.	20.

Même chose, pour la troisième lame

data will be rotated according to the following direction cosines

l1 = 0.7849 m1 = -0.4532 n1 = -0.4226

l2 = -0.5000 m2 = -0.8660 n2 = 0.0000

l3 = -0.3660 m3 = 0.2113 n3 = -0.9063

slide r13 number of twin sets is 19 thicktwi n/microtwin ratio = 1.000 thick twin option is 1

angles are with respect to rotated coordinate system

grain	bearing c	plunge c	bearing e	plunge e	angle(c,e)	bearing g	plunge g	tanpsi/2
1.0	350.1	31.2	343.4	2.7	29.2	86.1	77.8	0.0030618
2.0	350.1	31.2	27.6	41.0	31.5	121.5	4.6	0.0031545
3.0	140.5	73.8	124.9	44.2	30.4	292.8	45.1	0.0038556
4.0	292.5	39.9	284.2	16.9	24.2	59.7	67.0	0.0021688
5.0	302.2	27.9	283.5	12.8	23.0	25.5	42.4	0.0057833
6.0	337.9	16.3	4.9	14.3	26.2	273.0	7.7	0.0006547
7.0	337.9	16.3	315.7	1.8	26.2	47.0	34.7	0.0012852
8.0	242.5	63.5	247.8	36.7	27.0	76.6	53.0	0.0011194
9.0	263.4	30.3	280.9	8.4	27.3	178.8	54.6	0.0034700
10.0	316.1	31.1	335.0	11.1	26.5	231.3	50.3	0.0022387
11.0	316.1	31.1	282.7	26.1	29.7	20.6	15.7	0.0011567
12.0	10.1	33.1	32.1	15.9	26.3	286.8	42.8	0.0036526
13.0	10.1	33.1	341.3	20.6	28.4	83.7	29.8	0.0061235
14.0	132.6	71.5	177.0	54.2	25.6	33.5	30.1	0.0038556
15.0	10.1	29.8	29.4	21.3	19.3	287.6	27.8	0.0054789
16.0	10.1	29.8	339.0	20.4	29.6	78.2	23.2	0.0021688
17.0	267.9	59.8	249.1	38.4	24.5	34.9	46.2	0.0025704
18.0	93.6	71.8	158.9	63.8	24.5	25.3	18.8	0.0024786
19.0	349.1	6.5	184.8	9.6	22.5	284.4	44.4	0.0049571

dynamic analysis of thin section r13

angles are with respect to rotated coordinate system

grain	compression axes		tension axes		no. of lamellae
	bearing	plunge	bearing	plunge	per millimeter
1.0	290.3	32.6	117.3	57.2	176.5
2.0	42.3	38.3	233.8	51.1	333.3
3.0	306.6	2.2	216.2	8.8	166.7
4.0	165.0	28.1	268.6	23.8	272.7
5.0	348.3	7.8	256.4	13.7	62.5
6.0	271.4	55.2	140.8	24.3	133.3
7.0	330.0	36.0	150.0	54.0	71.4
8.0	139.5	18.3	330.0	71.4	74.1
9.0	180.3	50.4	47.5	29.3	80.0
10.0	196.7	25.8	295.9	18.3	437.5
1.0	20.6	33.8	279.6	15.9	90.9
2.0	220.2	64.8	118.1	5.6	129.0
3.0	219.3	65.2	7.2	21.4	30.3
1.0	152.2	41.1	355.6	46.5	88.2
2.0	83.0	31.4	337.2	24.1	45.5
3.0	298.9	0.4	204.9	83.9	111.1
4.0	91.7	26.5	306.1	58.9	62.5
5.0	70.9	18.7	324.8	39.3	166.7
6.0	49.6	4.6	318.3	15.6	18.9
7.0	96.8	22.4	355.6	25.2	37.0
8.0	71.6	8.2	223.9	80.8	32.3

9.0	127.9	28.2	247.8	42.9	100.0
10.0	183.7	24.1	298.2	42.9	64.5
11.0	239.9	6.9	334.0	30.1	33.3
12.0	243.6	16.7	349.4	42.4	105.3
13.0	124.3	5.9	29.8	36.9	176.5
14.0	198.9	12.6	74.9	68.2	111.1
15.0	247.3	4.2	340.3	35.9	157.9
16.0	119.1	1.8	28.0	31.7	62.5
17.0	53.1	4.1	310.6	71.8	37.0
18.0	191.0	24.0	51.7	59.5	71.4
19.0	223.9	37.8	332.3	22.1	142.9

spang numerical dynamic analysis  
thin section r13 number of twin sets = 32

nda x            nda xy            nda y            nda xz            nda yz            nda z  
-0.0368480    -0.0768844    -0.1535617    0.2225776    -0.0840539    0.1904678  
eigenvalues and eigenvectors  
magnitude    bearing    plunge  
0.351532    337.3    55.9  
-0.154407    130.9    31.3  
-0.197067    228.5    12.3

least squares strain calculation    no. of twin sets = 32

variance-covariance matrix            determinant = 0.6577146E+04

0.2696972E+00	-0.1011261E+00	0.2156616E-01	-0.3543542E-01	-0.1712392E-01
-0.1011261E+00	0.1993765E+00	-0.3445742E-02	-0.1705882E-01	0.2856656E-01
0.2156616E-01	-0.3445742E-02	0.1419746E+00	-0.1305829E-01	0.1905920E-01
-0.3543542E-01	-0.1705882E-01	-0.1305829E-01	0.1884810E+00	0.1674498E-01
-0.1712392E-01	0.2856656E-01	0.1905920E-01	0.1674498E-01	0.1495617E+00
sum of squares of error =	0.000653	sample variance =	0.000024	

estimated tensor in slide coordinates: extension is +

ex=-0.355515E-02    ey= 0.1024130E-03    exy=-0.1116754E-02    eyz=-0.1450693E-02    exz= 0.3015060E-02    ez= 0.3453101E-02

standard error of strain components

ex= 0.2553272E-02    ey= 0.2195310E-02    exy= 0.1852525E-02    eyz= 0.2134482E-02    exz= 0.1901380E-02    ez= 0.3367281E-02

principal strains	bearing	plunge
0.5177631E-02	316.5	61.6
-0.4383770E-03	89.9	20.4
-0.4739253E-02	187.2	18.9

Déformations selon l'intensité, la direction et le pendage

strain in plane of thin section r13            tension is +

maximum compressive strain = -0.3869504E-02  
minimum compressive strain = 0.4164025E-03  
angle from x axis to maximum compressive strain axis, positive clockwise = 0.1570399E+02 degrees

deviations of measured strains from calculated strains for thin section r13

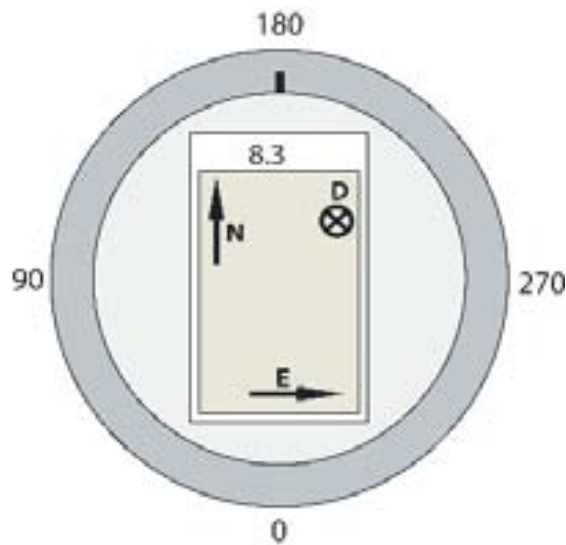
grain	tanpsi/2	expected value	tanpsi/2 - e.v.	
1.0	0.006123530	-0.001693251	0.007816780	4
2.0	0.011566667	-0.000039988	0.011606655	2
3.0	0.005783333	-0.001885526	0.007668859	5
4.0	0.009463636	0.002863801	0.006599835	6
5.0	0.002168750	0.000959152	0.001209599	22
6.0	0.004626667	-0.003248631	0.007875297	3
7.0	0.002478571	-0.002388670	0.004867241	8
8.0	0.002570370	0.003678272	-0.001107901	24
9.0	0.002776000	0.000984384	0.001791616	20
10.0	0.015181250	0.003284745	0.011896505	1
1.0	0.003154546	0.000526758	0.002627788	13
2.0	0.002238710	-0.000740204	0.002978913	12
3.0	0.001051515	-0.001059973	0.002111488	18
1.0	0.003061765	0.003098576	-0.000036811	32
2.0	0.003154546	0.000702382	0.002452163	15
3.0	0.003855556	0.001343955	0.002511600	14
4.0	0.002168750	0.002760880	-0.000592130	30
5.0	0.005783333	0.002305274	0.003478059	11
6.0	0.000654717	0.001758449	-0.001103732	25
7.0	0.001285185	0.000385054	0.000900132	27
8.0	0.001119355	0.001943017	-0.000823663	29
9.0	0.003470000	0.001514848	0.001955152	19
10.0	0.002238710	0.004538882	-0.002300172	16
11.0	0.001156667	0.002036314	-0.000879647	28
12.0	0.003652632	0.002126562	0.001526070	21
13.0	0.006123530	0.000662692	0.005460837	7
14.0	0.003855556	0.003487891	0.000367664	31
15.0	0.005478947	0.001972356	0.003506591	10
16.0	0.002168750	0.000023826	0.002144924	17
17.0	0.002570370	0.003535107	-0.000964737	26
18.0	0.002478571	0.003608619	-0.001130047	23
19.0	0.004957143	0.001444740	0.003512403	9

Ordre des contributions pour le calcul des déformations

NEV: Negative Expected Value. Si valeur négative, la mesure est incohérentes avec la déformation calculée

## Annexe V : Détermination des cosinus directeurs

On commence à noter sur la lame les orientations par rapport au référentiel du microscope. Son Nord (N) se trouve au 180° du cercle interne, l'Est (E) à 270° du cercle interne et le Down (D) vers le bas du microscope. Cf. *fig1*.



**Fig 1** : Représentation des orientations N, E et D sur la lame mince dans le cercle interne de la table Fedorov. (Vue de dessus)

Au dessus d'un stéréogramme, on oriente la lame mince dans sa vraie position géographique, mesurée sur le terrain. Le Nord du stéréogramme correspond au Nord géographique. On note alors l'orientation réelle du Nord, de l'Est et du Down de la lame dans les coordonnées géographiques en azimuth et pendage. Les mesures sont positives lorsque la direction des flèches est vers le bas (« à travers le stéréogramme »). On obtient donc pour chaque lame 6 nombres : un azimuth et un pendage pour chaque orientation N, E ou D.

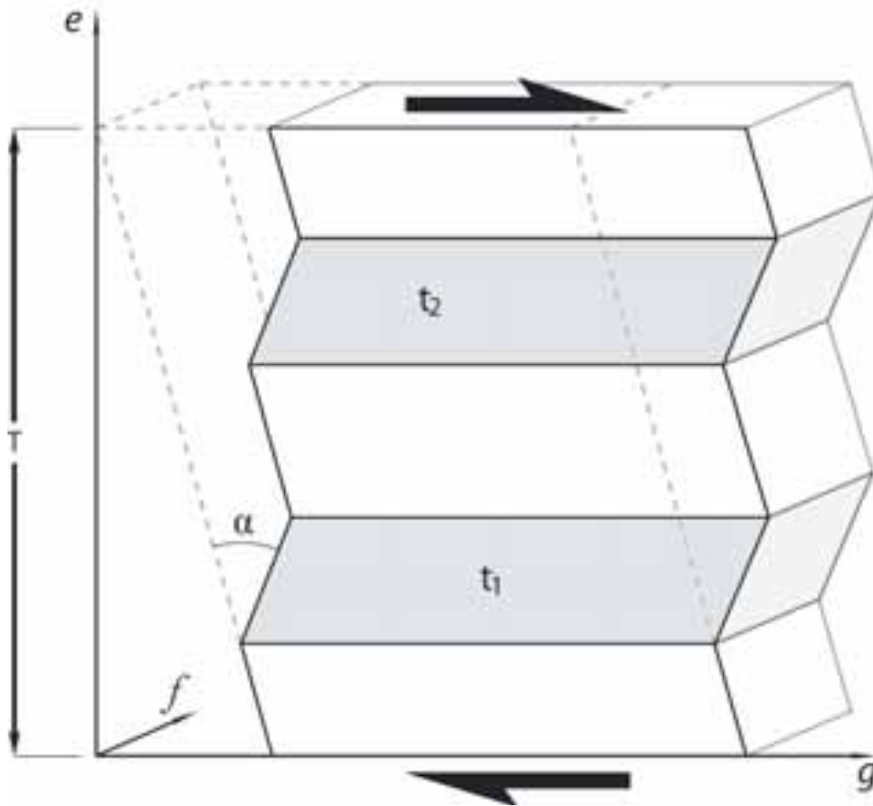
Ces données sont introduites dans un fichier .txt. Celui-ci est utilisé par le programme « Rotate » de Groshong (1987) pour transformer les 6 mesures en 9 cosinus directeurs.

Ses résultats sont alors repris dans le programme « twin » de Groshong (1987) pour directement réorienter les mesures de macles dans les coordonnées géographiques lors du calcul de déformation.

## Annexe VI : Calcul informatique dans Cygwin

Cette annexe présente la méthode de calcul utilisée par le programme ./twin dans Cygwin.

La valeur de déformation la plus probable est celle obtenue en utilisant une régression linéaire par la méthode des moindres carrés sur les cisaillements dans la calcite, mesurées grâce aux macles.



**Fig1** : schéma d'un grain de calcite maclé (modifié depuis Kang et al. , 2002)

La disposition des macles est parallèle à la direction du cisaillement sur l'axe  $g$  dans le plan  $ge$ . (Cf. **fig. 1.**) Les traits tillés représentent le grain avant la déformation. Les zones en grisées indiquent une macle. L'angle  $\alpha$  vaut  $38^{\circ}17'$  car ce sont des grains de calcites. Comme expliqué dans le chapitre 2 : **Explication de la formation de macle**, le cisaillement dans le plan  $ge$  vaut :

$$\gamma_g = \frac{2}{T} \sum_{i=1}^n t_i \tan \frac{\alpha}{2} \quad \text{Equ. 1}$$

En travaillant dans les trois dimensions, la contrainte  $[\epsilon']$  dans le système de coordonnées de grain de calcite ( $g, e, f$ ) est donné par :

$$[\epsilon'] = \begin{bmatrix} 0 & \Gamma_g & 0 \\ \Gamma_g & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \text{ avec } \Gamma_g = \frac{\gamma_g}{2} = \frac{0.347}{T} \sum_{i=1}^n t_i \quad \text{Equ. 2}$$

Le tenseur  $[\varepsilon]$  correspondant au système géographique  $(x, y, z)$  est :

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \Gamma_y & \Gamma_x \\ \Gamma_y & \varepsilon_y & \Gamma_x \\ \Gamma_x & \Gamma_x & \varepsilon_z \end{bmatrix} \quad \text{Equ. 3}$$

Avec  $\varepsilon_{ii}$  pour la compression (positif si extension) et  $\Gamma_{ij}$  pour le cisaillement ( $i, j=x, y, z$ ). Le système de coordonnées géographiques est défini comme suite : l'axe  $x$  est horizontal vers l'est, l'axe  $y$  est horizontal vers le nord et  $z$  est vertical vers le haut.

La matrice de transformation de coordonnées, depuis les géographiques vers celles de la lame :

$$[L] = \begin{bmatrix} l_g & m_g & n_g \\ l_e & m_e & n_e \\ l_f & m_f & n_f \end{bmatrix} \quad \text{Equ. 4}$$

Où  $l_i, m_i$  et  $n_i$  ( $i=g, e, f$ ) sont les cosinus directeur de la lame par rapport aux axes géographiques  $x, y$  et  $z$ . Pour trouver les cosinus directeurs à partir de l'orientation de la lame mince, on applique la méthode expliquée dans le chapitre **annexe V** : Cosinus directeurs

Le tenseur de contrainte local  $[\varepsilon']$  de l'équation 2 peut être transformé grâce aux équations 3 et 4 :

$$[\varepsilon'] = [L][\varepsilon][L]^T \quad \text{Equ. 5}$$

L'exposant  $T$  indique que la matrice  $[L]^T$  est la transposée de  $[L]$ .

On a ainsi une équation de transformation entre les coordonnées de la lame et les coordonnées géographiques.

$$\Gamma_g = l_g (\varepsilon_x l_e + \Gamma_y m_e + \Gamma_x n_e)$$

La contrainte de cisaillement  $\Gamma_{ge}$  devient donc :

$$+ m_g (\Gamma_y l_e + \varepsilon_y m_e + \Gamma_x n_e) \quad \text{Equ. 6}$$

$$+ n_g (\Gamma_x l_e + \Gamma_x m_e + \varepsilon_z n_e)$$

Dans les macles de la calcite, il n'y a que du cisaillement simple, ce qui implique qu'il n'y a pas de changement de volume. La somme  $\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$  est donc nul. L'équation 6 devient :

$$\begin{aligned} \Gamma_g &= (l_g l_e - n_g n_e) \varepsilon_x + (m_g m_e - n_g n_e) \varepsilon_y \\ &+ (l_g m_e + l_e m_g) \Gamma_y + (m_g n_e + m_e n_g) \Gamma_x \\ &+ (l_g n_e + l_e n_g) \Gamma_x \end{aligned} \quad \text{Equ. 7}$$

Les équations ci-dessus sont valables pour un seul grain de calcite.

Pour plusieurs grains de calcite, les contraintes de cisaillement mesurées pour  $n$  grains peuvent être exprimées par le vecteur:

$$\{\alpha_c\} = \left\{ \Gamma_g^1 \quad \Gamma_g^2 \quad \dots \quad \Gamma_g^n \right\} \quad \text{Equ. 8}$$

Le vecteur géographique de contrainte associé à l'équation 8 est :

$$\{\epsilon\} = \left\{ \epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \epsilon_z \quad \Gamma_y \quad \Gamma_x \quad \Gamma_z \right\} \quad \text{Equ. 9}$$

Les vecteurs 8 et 9 sont reliés par l'équation :

$$[A_c] \{\epsilon\} = \{\alpha_c\} \quad \text{Equ. 10}$$

Avec  $[A_c]$  qui est la matrice de transformation de coordonnées. Ses composants peuvent être trouvés grâce à l'équation 7.

$$[B_c] \{\epsilon\} = \{\beta_c\} \quad \text{Equ. 11}$$

La valeur la plus probable du vecteur déformation géographique est obtenue en utilisant une régression linéaire (moindres carrées) en utilisant l'équation 9 normalisée. Pour cela, on transforme l'équation 9 comme suit :

$$\text{avec } [B_c] = [A_c]^T [A_c] \text{ et } \{\beta_c\} = [A_c]^T \{\alpha_c\}$$

En inversant l'équation 11, on retrouve le vecteur déformation  $[\epsilon]$ .

$$\{\epsilon\} = [C_c] \{\beta_c\} \quad \text{Equ. 12}$$

Une fois que les composants ( $x, y, z$  et  $g, e, f$ ) sont mesurés ou calculés, on peut calculer les trois contraintes  $\epsilon_1 \epsilon_2 \epsilon_3$ .

Sur la base de la technique CSG décrite ci-dessus, un programme informatique a été développé par Groshong (1987). C'est ce programme qui est utilisée dans cette étude.

## **VII. Méthode MEB**

### **Attaque à l'acide**

Le traitement à l'acide permet de faire ressortir les limites de grains et les macles en les attaquant. Elles sont ainsi visibles en creux lors des mesures au microscope électronique.

La procédure utilisée est celle conseillée par Herwegh (2000).

Les échantillons, des talons de lames minces, sont polies pour obtenir une surface parfaitement lisse qui sera ensuite attaquée à l'acide.

Selon la méthode décrite par Herwegh, la quantité d'acide dépend du volume de l'échantillon, pour éviter des effets de tampons acide-base différents selon les échantillons. Pour cette étude, le volume des échantillons utilisés est égal à ceux utilisés dans l'étude de référence de Herwegh.

On remplit un Becher de 25ml de 15ml d'acide chlorhydrique dilué à 0.37% et l'échantillon y est plongé pendant 60s.

L'échantillon est rincé à l'eau desionisée.

On effectue un second bain dans 25ml de 15ml d'acide acétique dilué à 0.1% pendant 3 minutes (180s).

L'échantillon est de nouveau rincé à l'eau desionisée et est séché.