



**HAL**  
open science

**L'analyse d'images appliquées à des problèmes structuraux: fracturation du site de barrage de Vinça (Pyrénées orientales), structure d'un marbre de Carrare, déformation des quartzites du massif de Dora Maira (Alpes).**

Françoise Chatagnon

► **To cite this version:**

Françoise Chatagnon. L'analyse d'images appliquées à des problèmes structuraux: fracturation du site de barrage de Vinça (Pyrénées orientales), structure d'un marbre de Carrare, déformation des quartzites du massif de Dora Maira (Alpes).. Tectonique. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1982. Français. NNT: . tel-00578907

**HAL Id: tel-00578907**

**<https://theses.hal.science/tel-00578907>**

Submitted on 22 Mar 2011

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

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

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ SCIENTIFIQUE ET MÉDICALE  
DE GRENOBLE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE 3<sup>e</sup> CYCLE  
de Géologie Appliquée

par

**Françoise CHATAGNON**

S U J E T

**L'analyse d'images  
appliquée à des problèmes structuraux :**  
**- Fracturation du site de barrage de Vinça (Pyrénées Orientales)**  
**- Structure d'un marbre de Carrare**  
**- Déformation des quartzites du Massif de Dora Maira**

---

Soutenue le 13 Septembre 1982 devant la Commission d'Examen

M. G. PERRIER	Président
M. P. VIALON	Rapporteurs
M. J.-P. MORLEVAT	
M. P. ANTOINE	Examinateur

GRENOBLE

## RESUME

L'analyse d'images consiste à extraire de manière quantitative une part de l'information que contient une image. Cette méthode d'analyse est utilisée ici pour des problèmes bien différents : fracturation, forme des grains dans une roche et orientation cristallographique du quartz.

Le premier exemple traité concerne l'étude des fractures relevées sur le site du barrage de Vinça (Pyrénées Orientales). L'interprétation structurale associe la fracturation du massif à un grand accident connu sous le nom de faille de Catalogne.

Le second exemple porte sur la forme des grains de calcite dans un marbre de Carrare. L'analyse des images permet de mettre en évidence, par l'étude de l'orientation des joints, une faible anisotropie de forme des grains de la roche, expliquant ainsi l'anisotropie de déformation observée en chauffant le marbre.

Dans le troisième exemple, l'étude de l'orientation cristallographique du quartz (par détermination de l'orientation de l'axe c par analyse d'images) dans les quartzites du massif de Dora Maira montre que la déformation correspond à un cisaillement simple avec déplacement des zones hautes vers l'Ouest.

## MOTS-CLES

Analyse d'images ; Vinça (Pyrénées Orientales) ; Fracturation ; Faille de décrochement ; Marbre ; Joint de grains ; Orientation ; Dora Maira ; Quartzite ; Pétrofabrique ; Cisaillement simple.

*Alfred...*

## AVANT-PROPOS

Au moment de présenter ce travail, je tiens à remercier tout particulièrement :

- Monsieur PERRIER qui m'a fait l'honneur de présider mon jury
- Monsieur VIALON qui a orienté cette étude et qui m'a suivie dans l'avancement de mes travaux
- Monsieur MORLEVAT pour m'avoir ouvert son laboratoire. Son aide et ses encouragements m'ont été précieux.
- Monsieur ANTOINE pour avoir accepté de juger ce travail
- Monsieur JOLIVET pour sa disponibilité et sa patience de tous les instants.

Je remercie également tous ceux qui par leur amitié et leurs conseils m'ont aidée à mener à bien ce travail, en particulier Messieurs FABRE et GRATIER interlocuteurs disponibles et attentifs à mes problèmes.

Enfin, je ne saurais oublier mes parents qui m'ont toujours encouragée à parfaire mes études, ainsi que Bruno et Cédric qui ont souvent supporté ma préoccupation.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I : L'ANALYSE DES IMAGES	3
I.1. PRINCIPE DES ANALYSEURS	5
I.1.1. PRISE D'INFORMATION	5
I.1.1.1. Modes d'entrée de l'image	5
I.1.1.2. Visualisation	6
I.1.2. DETECTION ET TRAITEMENT DE L'INFORMATION	6
I.1.2.1. Détection	6
I.1.2.2. Principe de la mesure	7
I.1.2.3. Précision de la détection et de la mesure	7
I.1.2.3.1. Qualité de l'échantillon	8
I.1.2.3.2. L'image optique	8
I.1.2.3.3. Choix de la caméra et du seuil de détection	8
I.1.3. PERIPHERIQUES DE SORTIE	9
I.2. APPAREILLAGE UTILISE ET SES POSSIBILITES	9
I.2.1. SCHEMA D'ENSEMBLE DU OTM 720	9
I.2.2. POUVOIR DE RESOLUTION	11
I.2.3. MASQUES DE MESURE	11
I.2.4. CARACTERISTIQUES DES CAMERAS PLUMBICON ET VIDICON	11
I.2.5. DIMENSIONS DES IMAGES	14
I.2.6. MESURES ACCESSIBLES	14
I.2.6.1. Fonctions de base	14
I.2.6.2. Associations de mesures	16
I.3. UTILISATIONS DES ANALYSEURS D'IMAGES	16
I.3.1. DEFINITION DE LA STRUCTURE DES MATERIAUX	17
I.3.1.1. Organisation générale	17
I.3.1.2. Constituants et positions respectives	17
I.3.1.2.1. Reconnaissance des constituants	17
I.3.1.2.2. Géométrie des constituants	17
I.3.1.2.3. Répartition des constituants	18
I.3.1.3. Stéréologie	18
CHAPITRE II : DEFINITION ET CALCUL DE QUELQUES PARAMETRES	23
II.1. ROSE DES DIRECTIONS	25
II.1.1. DEFINITION	25
II.1.2. MESURES UTILISEES ET CALCUL	26
II.1.3. CHOIX DE n et 3 - PRECISIONS	27
II.2. DEGRE D'ORIENTATION	28
II.3. DENSITES	28

CHAPITRE III : ANALYSE QUANTITATIVE DE LA FRACTURATION - EXEMPLE DU SITE DE BARRAGE DE VINCA	31
III.1. ANALYSE QUANTITATIVE DES FRACTURES	33
III.1.1. LA MESURE QUANTITATIVE	33
III.1.1.1. Buts de l'analyse quantitative	33
III.1.1.2. Méthodes de l'analyse quantitative	34
III.1.2. ETUDE DE LA FRACTURATION PAR ANALYSEUR D'IMAGES	35
III.1.2.1. Nature de l'image	36
III.1.2.2. Grandeurs mesurées	36
III.2. ETUDE DE LA FRACTURATION DU SITE DE BARRAGE DE VINCA	37
III.2.1. PRESENTATION DU SITE	37
III.2.1.1. Situation géographique et géologique	37
III.2.1.2. Aspect géotechnique	39
III.2.1.3. Premières descriptions de la fracturation	39
III.2.2. ANALYSE D'IMAGES DE LA FRACTURATION	41
III.2.2.1. Roses des directions	41
III.2.2.2. Densité de la fracturation	44
III.2.3. INTERPRETATIONS	45
III.2.3.1. Interprétation structurale	46
III.2.3.1.1. Fractures liées à une zone de décrochement	46
III.2.3.1.2. Structure du massif d'appui du barrage	49
III.2.3.2. Conséquences géotechniques	55
III.2.4. CONCLUSIONS	56
CHAPITRE IV : ANALYSE DE LA FORME ET DE L'ORIENTATION CRISTALLOGRAPHIQUE DES GRAINS D'UNE ROCHE - APPLICATION AU MARBRE DE CARRARE ET AUX QUARTZITES DE DORA MAIRA	59
IV.1. DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE QUANTITATIVE DES STRUCTURES CRISTALLINES	61
IV.1.1. L'ANALYSE GEOMETRIQUE	61
IV.1.2. GRANDEURS MORPHOLOGIQUES	62
IV.1.2.1. Taille des grains	62
IV.1.2.2. Forme des grains	62
IV.1.2.3. Anisotropie structurale	62
IV.1.2.3.1. Rose des directions	63
IV.1.2.3.2. Degré d'orientation	63
IV.2. ORIENTATION CRISTALLOGRAPHIQUE DU QUARTZ	67
IV.2.1. INTRODUCTION	67
IV.2.2. CRISTALLOGRAPHIE ET PROPRIETES OPTIQUES DU QUARTZ	67
IV.2.3. METHODES COURANTES DE DETERMINATION DE L'ORIENTATION DE L'AXE C DU QUARTZ	68
IV.2.3.1. Microscope polarisant usuel	68
IV.2.3.2. Platine universelle	69
IV.2.3.3. Goniométrie de texture	70
IV.2.3.4. Photométrie	70
IV.2.3.5. Cellule photoélectrique	70

IV.2.4. DETERMINATION DE L'ORIENTATION CRISTALLOGRAPHIQUE DU QUARTZ PAR ANALYSE D'IMAGES	70
IV.2.4.1. Principe	70
IV.2.4.2. Conditions d'analyse	72
IV.2.5. INTERPRETATION DE L'ORIENTATION PREFERENTIELLE DE L'AXE C DU QUARTZ	72
IV.2.5.1. Mécanisme du développement de l'orientation préférentielle	72
IV.2.5.1.1. Glissement intracristallin	73
IV.2.5.1.2. Réorientation du cristal	73
IV.2.5.2. Conditions physiques	74
IV.2.5.3. Régime de la déformation	75
IV.2.5.4. Quantité de déformation	75
 IV. 3. STRUCTURE D'UN MARBRE DE CARRARE	 77
IV.3.1. PRESENTATION DU PROBLEME	77
IV.3.2. IMAGES ANALYSEES	79
IV.3.2.1. Photographies	79
IV.3.2.2. Dessins	79
IV.3.3. ANALYSE DES IMAGES - RESULTATS	79
IV.3.3.1. Rose des directions des joints de grains	79
IV.3.3.2. Degré d'orientation	81
IV.3.3.3. Taille moyenne des grains	81
IV.3.4. INTERPRETATION	84
IV.3.4.1. Définition de la structure du marbre	84
IV.3.4.2. Cause de l'anisotropie de dilatation	86
IV.3.5. CONCLUSIONS	88
 IV.4. ETUDE DE QUELQUES QUARTZITES DU MASSIF DE DORA MAIRA	 89
IV.4.1. SITUATION GEOGRAPHIQUE ET GEOLOGIQUE DU MASSIF	89
IV.4.2. LES CONGLOMERATS DE LA VALLEE DE LA GERMANASCA	91
IV.4.2.1. Descriptions des conglomérats	91
IV.4.2.2. Echantillons analysés	93
IV.4.2.3. Allongement et orientation cristallographique des grains de quartz	95
IV.4.2.4. Interprétation	96
IV.4.3. QUARTZITES PLISSES DE CALCINERE	97
IV.4.3.1. Description	97
IV.4.3.2. Echantillons analysés	98
IV.4.3.3. Allongement et orientation cristallographique du quartz	99
IV.4.3.4. Interprétation	104
IV.4.4. QUARTZITES PLISSES DE SANFRONTE	106
IV.4.4.1. Description	106
IV.4.4.2. Echantillons analysés	107
IV.4.4.3. Interprétations tirées de l'étude des quartzites	108
IV.4.5. CONCLUSIONS GENERALES SUR LE MASSIF DE DORA MAIRA	111
 CHAPITRE V : CONCLUSIONS	 
V.1. UTILISATION DU QUANTIMET POUR LES DIFFERENTS PROBLEMES TRAITES	115
V.2. DEVELOPPEMENTS RECENTS DES ANALYSEURS ET PERSPECTIVES DANS LE TRAITEMENT DES IMAGES EN GEOLOGIE	116
 BIBLIOGRAPHIE	 119

## INTRODUCTION GENERALE

Ce mémoire présente l'application à quelques problèmes géologiques et plus spécialement à certains problèmes structuraux, d'une technique récente, l'analyse d'images. Ce moyen d'étude consiste à extraire de manière quantitative et plus ou moins automatique une part de l'information que contient une image. Les analyseurs d'images offrent de nouvelles possibilités en science des matériaux car ils permettent l'acquisition de données objectives et contrôlables. Capables de caractérisations géométriques poussées en des temps très brefs, ils sont devenus des outils non seulement pour définir la texture des matériaux, mais aussi pour déterminer son incidence sur l'explication ou la prévision de leur comportement mécanique, physique ou chimique.

Cette méthode d'analyse n'est pas encore très répandue dans le domaine de la géologie, excepté dans le traitement des réseaux de fractures ou en minéralogie où elle apporte des moyens nouveaux de caractérisation. Les exemples présentés ici montrent que les analyseurs peuvent être utilisés pour différents problèmes.

Ce travail expose donc tout d'abord le principe des analyseurs d'images et en particulier celui du Quantimet 720 utilisé dans le cadre de cette étude. Leurs applications dans différents domaines font également l'objet du premier chapitre.

Le chapitre II décrit quelques paramètres fournis par l'analyseur et qui seront utilisés dans les exemples suivants. Leur définition et leur mode d'acquisition sont brièvement expliqués.

Le chapitre III est consacré à la fracturation des roches et développe un exemple d'application de l'analyseur d'images à ce problème général des massifs. L'exemple traité porte sur l'analyse des fractures relevées sur le site de barrage de VINCA et l'étude a pour but d'expliquer les caractéristiques géotechniques du site par la compréhension génétique des fractures observées.



Le chapitre IV présente les possibilités de description quantitative de la structure et de la forme des grains d'une roche ainsi que l'étude de l'orientation cristallographique du quartz, ce qui permet d'accéder indirectement à la structure intracrystalline. Le premier exemple porte sur la forme des grains, abordée par l'examen de leurs joints ou des discontinuités plus ou moins réglées qui les séparent. Cette étude concerne ici l'organisation et la structure des différentes discontinuités d'un marbre analysé pour définir son comportement thermique. Il s'agit de comprendre quel est le rôle joué par les fissures préexistantes de la roche lors de sa dilatation. Un modèle de l'organisation des discontinuités de ce marbre est établi en prenant en compte les directions et les densités des différentes familles de fissures ou de joints de grains. Dans le second exemple, les grains de la roche sont analysés non pas par leurs limites mais par leur orientation cristallographique. Il s'agit ici de quartzites du Massif de Dora Maira et c'est essentiellement l'orientation des plans (0001) du quartz qui est étudiée, dans le but de définir le régime de la déformation enregistrée par ces quartzites.

Enfin le chapitre V apporte des conclusions quant à l'application de l'analyse d'images aux exemples présentés, ainsi que les perspectives d'utilisation offertes par le développement récent des analyseurs.

## CHAPITRE I

# L'ANALYSE DES IMAGES

I.1. PRINCIPE DES ANALYSEURS

I.2. APPAREILLAGE UTILISE ET SES POSSIBILITES

I.3. UTILISATIONS DES ANALYSEURS D'IMAGES

## L'ANALYSE DES IMAGES

Les progrès récents de l'électronique dans l'instrumentation scientifique ont permis le développement des méthodes d'analyse d'images. Ce nouveau moyen d'analyse consiste à extraire de manière quantitative et plus ou moins automatique une part de l'information que contient une image ; il intéresse plus précisément tout ce qui concerne la structure des objets : forme, orientation des joints de grains ou de toute discontinuité, pourcentage des différents constituants éventuels, etc... L'image est décrite en termes mathématiques, d'une manière rapide, précise et surtout quantitative et objective, au moyen de procédés opto-électroniques.

### I.1.- PRINCIPE DES ANALYSEURS

Globalement, les analyseurs d'images sont composés d'un système de prise d'information, d'une unité de traitement du signal et d'un ou plusieurs périphériques de sortie.

#### I.1.1. Prise d'information

##### I.1.1.1. Modes d'entrée de l'image

Les images analysées peuvent être de différentes sortes : schémas, documents photographiques de toute provenance en allant des photographies aériennes aux clichés de microscopie électronique, ou encore aux échantillons polis.

Deux systèmes différents permettent d'examiner ces images : un microscope optique et un épidiastroscope.

Le microscope est utilisé pour les lames minces ou les sections polies de tout matériau.

L'épidiastroscope est plus adapté pour tous les documents et également pour les échantillons polis.

Enfin lorsqu'une liaison est établie entre l'analyseur d'images et des appareils comme le microscope électronique à balayage ou encore la microsonde, c'est le signal électronique qui est analysé (Mathy, 1975).

#### I.1.1.2. Visualisation

L'image est transmise sur un écran de télévision par l'intermédiaire d'une caméra, permettant à l'opérateur de contrôler à tout moment la nature de l'objet et les mesures effectuées. La caméra ne transcrit les images qu'en des teintes s'étendant du noir au blanc.

#### I.1.2. Détection et traitement de l'information

##### I.1.2.1. Principe de la détection

L'image est balayée par un spot d'analyse qui parcourt des lignes horizontales successives juxtaposées, délivrant un signal électrique en chaque point de l'image. L'amplitude de ce signal est fonction du niveau de gris ou du pouvoir réflecteur de l'objet. La figure 1(a et b) montre les impulsions électriques résultant du passage d'une ligne de balayage à travers les objets de gris plus ou moins foncé sur un fond blanc.

Ces signaux sont ensuite comparés à des niveaux d'amplitude de référence ajustables, afin de sélectionner les objets sur lesquels porteront les mesures (fig. 1 c).

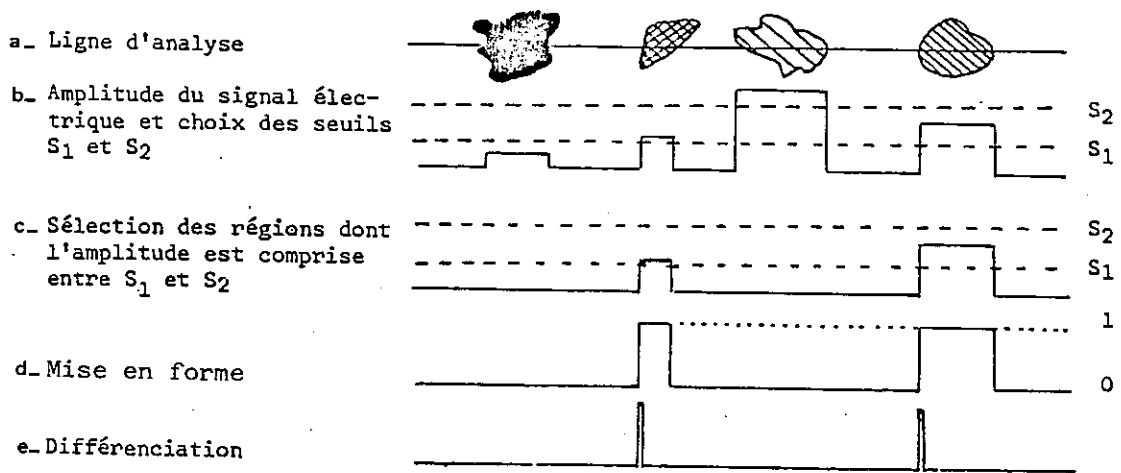


Figure 1 : Principes de la détection et de la mesure d'après Gateau (1978).

### I.1.2.2. Principe de la mesure

- Après mise en forme, les impulsions sélectionnées acquièrent la même amplitude (fig. 1 d) ; l'image est alors visualisée sur l'écran, tout en noir ou en blanc : c'est une image binaire. La durée d'un signal dépend du temps de passage du spot d'analyse à travers l'objet donc de la largeur de celui-ci. La surface de la phase sélectionnée par les seuils de détection sera donc proportionnelle à la largeur des impulsions électriques obtenues après mise en forme.

- Les impulsions passent ensuite dans un différenciateur où elles acquièrent la même largeur (fig. 1 e). La différenciation donne accès au nombre d'intersections entre les lignes de balayage et les objets.

- Pour permettre le comptage, un système d'anticoïncidence compare les signaux des différentes lignes d'analyse pour ne donner qu'une seule impulsion par objet.

### I.1.2.3. Précisions de la détection et de la mesure

Une mesure correcte dépend du bon réglage de l'appareil, mais elle est surtout conditionnée par la qualité de l'objet analysé.

#### I.1.2.3.1. Qualité de l'échantillon

Si l'observation est faite à partir du microscope, il faut avant tout que la surface étudiée soit parfaitement polie. D'autre part, les objets analysés ne sont sélectionnés que s'ils sont suffisamment contrastés par rapport au fond de l'image. Ce contraste peut être amélioré dans un premier temps au niveau de la préparation de l'échantillon en utilisant des techniques comme les attaques chimiques ou électrolytiques qui mettent certaines phases en évidence. Une imprégnation de produits fluorescents ou colorés dans le matériau étudié permet également de visualiser son espace poreux (Caye et al., 1970).

Donc en préparant l'échantillon ou le document photographique, il faut chercher à obtenir un contraste homogène et assez intense.

#### I.1.2.3.2. L'image optique

Dans le cas d'une observation au microscope, de nombreuses méthodes instrumentales peuvent être employées, soit pour visualiser les différentes phases d'une préparation, soit pour en augmenter le contraste. Le choix d'une de ces techniques est fait suivant la nature de l'échantillon et du problème à résoudre. Toutes ces méthodes sont décrites dans Locquin et al. (1978) ; retenons les principales : observations en fond noir (Nazaré et al., 1969), examens en lumière réfléchie, microscopie en infrarouge ou ultraviolet, fluorescence, dispositif de contraste de phase et microscope polarisant.

L'obtention d'une bonne image nécessite aussi un éclairage uniforme du champ, ce qui est obtenu avec l'alignement des axes optiques.

Enfin la mise au point est également un facteur important à surveiller lors des mesures.

#### I.1.2.3.3. Choix de la caméra et du seuil de détection

Il existe plusieurs sortes de caméras qui diffèrent essentiellement par leur sensibilité, leur résolution ou leur courbe de réponse en fonction de la longueur d'onde ; l'utilisateur choisira celle dont les caractéristiques conviendront le mieux à la nature de son image et des paramètres qu'il veut mesurer.

Les objets étant sélectionnés par un seuil de détection, la précision du réglage de ce seuil a une grande incidence sur les mesures (Roche, 1968). Il faut savoir également que ce seuil varie en fonction de l'environnement de l'objet ou de la taille de celui-ci.

### I. 1. 3. Périphérique de sortie

Les mesures sont transmises en général à un ordinateur qui peut exécuter un traitement statistique des données, des classifications ou d'autres opérations mathématiques.

## I.2 - APPAREILLAGE UTILISE ET SES POSSIBILITES

Le Laboratoire de Métallurgie du Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble dispose d'un système d'analyse d'images qui est le Quantimet 720 ou QTM 720 (abrégé de Quantitative Television Microscopy). Cet appareil utilisé dans le cadre de cette étude est capable de mesures globales à partir d'images entièrement digitalisées.

### I.2.1. Schéma d'ensemble du QTM 720

La figure 2 schématise le fonctionnement de tout le système qui est du type modulaire. L'utilisation commence par la formation d'une image produite soit par un microscope, soit par un épidiastroscope. L'image est analysée par un système de balayage Vidicon ou Plumbicon, dont la sortie est adressée à un détecteur qui trie les détails à mesurer selon leur niveau de gris. Le ordinateur effectue les différentes mesures sur les objets détectés. Le module de traitement des données classe, compare et éventuellement cumule les valeurs brutes, puis les résultats sont inscrits sur une télécrite. A tout moment, l'image vidéo (issue de la caméra), l'image détectée, les caractéristiques mesurées et les résultats numériques peuvent être visualisés sur l'écran. Enfin, un certain nombre de paramètres de réglage et de fonctions de mesure peut être fixé et mis en oeuvre automatiquement au moyen d'un programme rédigé par l'opérateur.

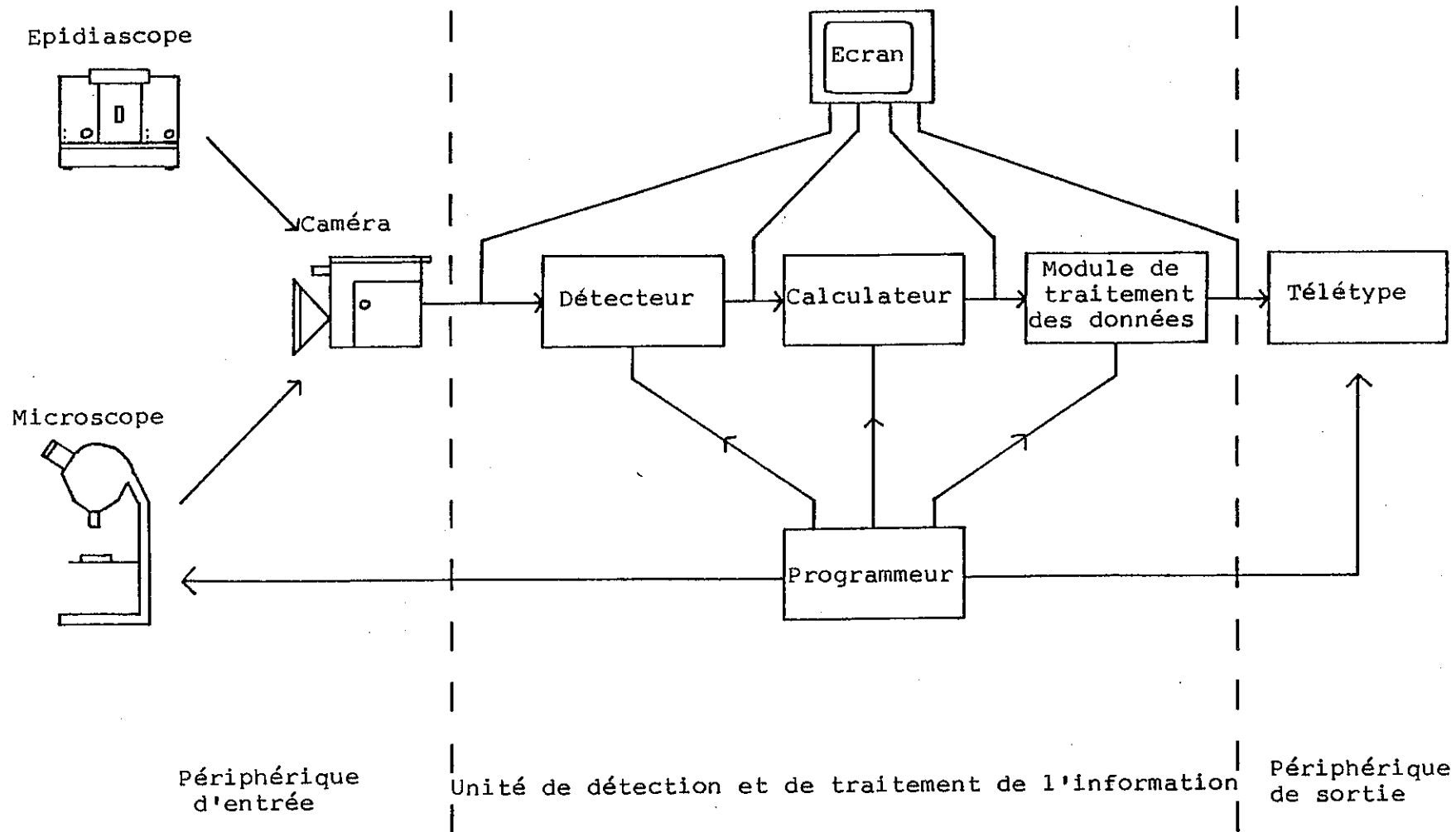


Figure 2 : Schéma de fonctionnement du Quantimet 720



### I.2.2. Pouvoir de résolution

L'image est balayée par 720 lignes horizontales, chaque ligne étant constituée de 910 points appelés points image (PI). L'écran entier est donc composé d'une grille de 650 000 PI, mais les mesures se font dans une fenêtre de 500 000 PI (625 lignes de 800 points).

### 1.2.3. Masques de mesure

La fenêtre standard de 500 000 PI peut être réduite à volonté et positionnée à différents endroits de l'écran. Sur cet appareil, la forme du masque de mesure est soit carrée (le plus petit est le point-image), soit rectangulaire. Avec un stylo électronique, une fenêtre de forme différente, circulaire par exemple, peut être dessinée directement sur l'écran. Ce crayon permet également de transformer manuellement une image et de la mettre en mémoire pour des mesures comparatives par exemple.

### 1.2.4. Caractéristiques des caméras Plumbicon et Vidicon

Le QTM 720 utilise soit une caméra Vidicon, soit une caméra Plumbicon. Les principales caractéristiques invoquées pour justifier leur choix se résument en trois points :

- Diminution du contraste pour des figures de faible dimension : l'amplitude du signal décroît lorsque la longueur de traversée de l'objet diminue (fig. 3). Ce phénomène est moins important avec la caméra Vidicon, ce qui justifie l'emploi de celle-ci pour l'étude de petites particules.
- Sensibilité aux différentes longueurs d'onde : l'amplitude du signal varie avec la longueur d'onde et les courbes respectives des deux caméras sont différentes (fig. 4). Ceci guidera lors du choix de la caméra pour des objets colorés ainsi que du type de coloration à réaliser pour une meilleure détection.
- Courbes de transfert intensité lumineuse - signal électronique (fig. 5) : La caméra Vidicon est mieux adaptée pour les faibles valeurs de l'intensité lumineuse mais si le flux lumineux global perçu par la caméra est intense, la différenciation d'objets à haut pouvoir réflecteur sera plus facile avec la caméra Plumbicon.

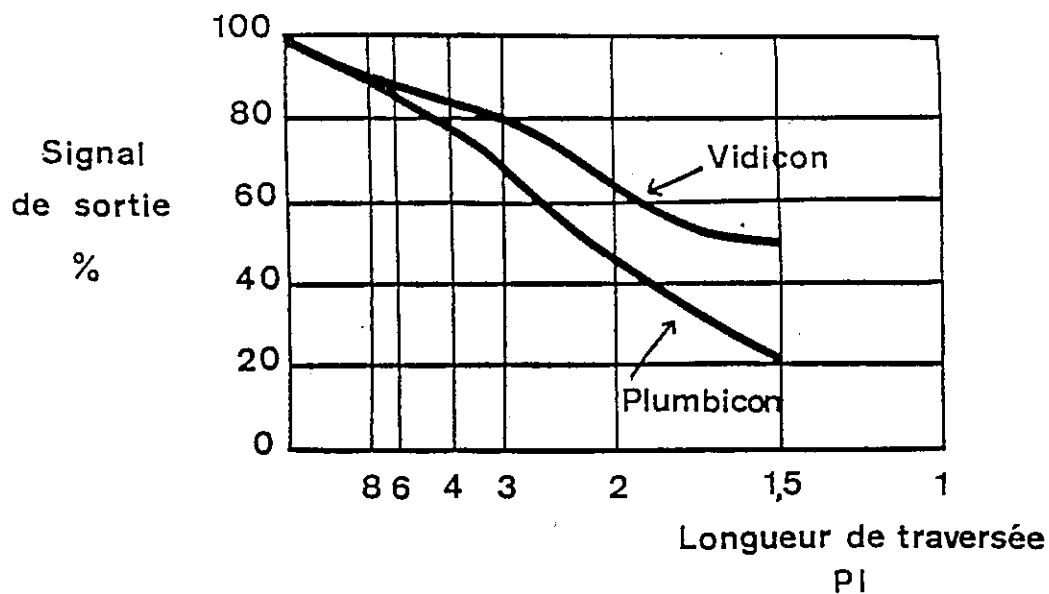


Figure 3 : Variation de l'amplitude du signal en fonction de la dimension linéaire de traversée pour les caméras Vidicon et Plumbicon (Fisher, 1971)

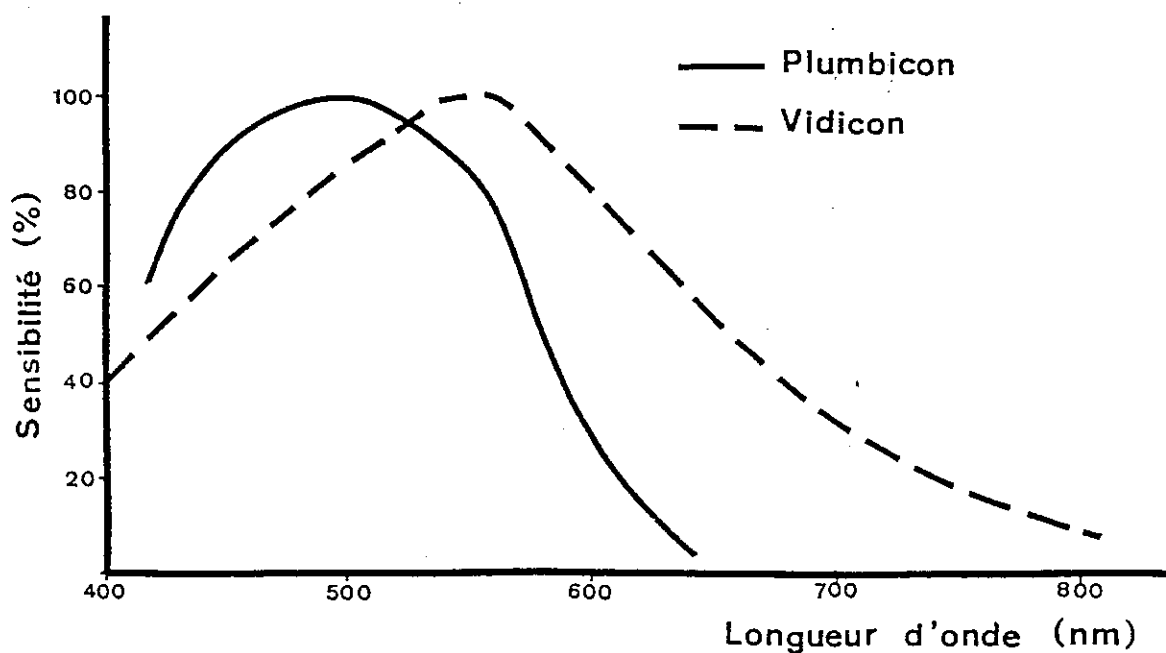


Figure 4 : Sensibilité des caméras Plumbicon (P) et Vidicon (V) aux différentes longueurs d'onde.

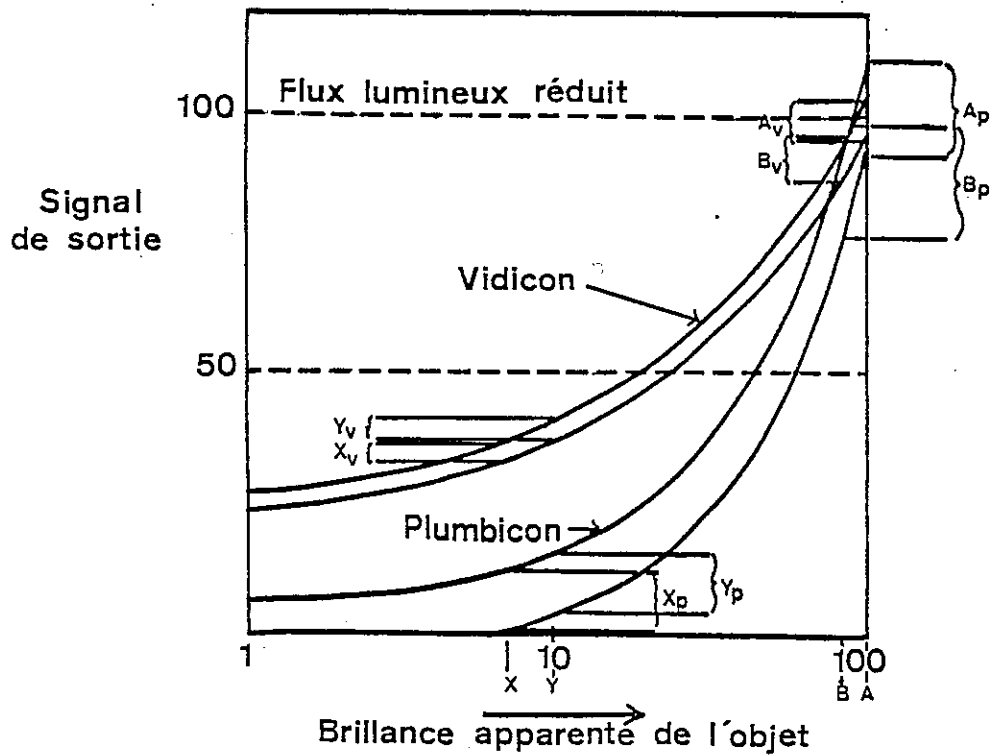
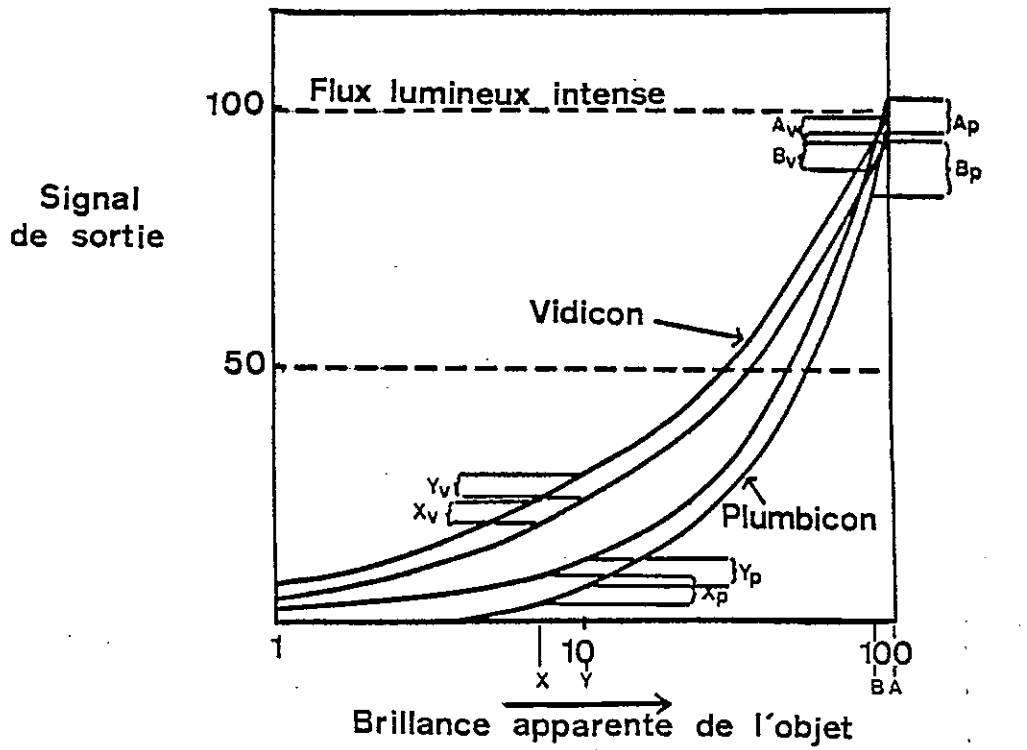


Figure 5 : Réponse des caméras Plumbicon (P) et Vidicon (V) en fonction des conditions d'éclairage et du pouvoir réflecteur de l'objet (Fisher, 1971).

### I.2.5. Dimensions des images

La surface de l'échantillon pouvant être analysée est conditionnée par la dimension de l'écran et les grossissements du microscope et des caméras. En utilisant l'épidiascope, le plus faible grossissement permet de visualiser un document de 75 x 95 mm. Si l'analyse nécessite une rotation de l'image (c'est le cas pour la détermination des roses des directions), le document doit pouvoir être inscrit dans un cercle de 75 mm de diamètre.

Le QTM 720 utilisé ici ne peut pas prendre en compte de plus grandes images mais l'adaptation d'objectifs spéciaux sur la caméra est possible sur certains appareils, permettant par exemple de visualiser des documents de grande dimension. (On peut réduire aux dimensions requises une image plus grande, mais la précision dans la détection sera moins bonne).

Au microscope, avec les plus faibles grossissements, la section visualisée a une dimension de 4 x 3 mm environ. Par ailleurs, le grandissement choisi doit être tel que le plus petit objet à détecter corresponde à au moins un point-image.

### I.2.6. Mesures accessibles

#### 1.2.6.1. Fonctions de base (fig. 6)

Les grandeurs de base directement accessibles par l'appareil sont les suivantes :

- Surface S
- Périmètre P
- Comptage
- Projection horizontale (ou Intercept) PH et verticale PV
- Diamètre de Feret horizontal FH et vertical PV.

Les mesures peuvent soit concerner l'ensemble des objets (on obtient une valeur globale du paramètre mesuré), soit s'appliquer séparément à chaque particule, pour établir des distributions.

Objet

Ecran

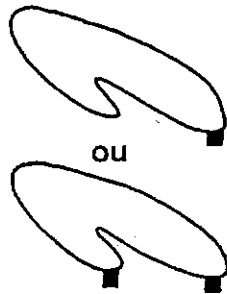
Fonctions



Surface

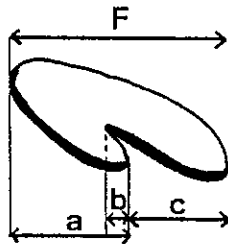


Périmètre



ou

Comptage



Projection  
verticale  
 $Pv = a+b+c$

Féret horizontal  
 $F = a+c$



Projection  
horizontale  
 $Ph = a+b$

Féret vertical  
 $F = b$

Figure 6 : Mesures de base du QTM 720

### I.2.6.2. Associations de mesures

Les fonctions de base sont parfois associées pour donner des caractérisations géométriques plus complètes :

#### - Facteur de forme K

Le QTM est équipé d'un système de reconnaissance de forme qui associe deux mesures

$$K = \frac{\text{Surface}}{(\text{Périmètre})^n}$$

Ce rapport caractérise l'allongement des particules par rapport à un cercle.

#### - Granulométries

Les distributions granulométriques peuvent être obtenues en nombre ou en mesure (Gateau et al., 1975 ; Prévosteau, 1976) mais l'équipement actuel du Quantimet utilisé ne les rend applicables qu'aux milieux individualisés. Les distributions des particules en classes sont établies par rapport à la valeur d'un paramètre : surface, périmètre, facteur de forme, etc... Si le contenu de la classe est égal au nombre de particules, c'est une granulométrie en nombre ; si le contenu de la classe est égal à la valeur cumulée du paramètre correspondant, c'est une granulométrie en mesure. Les granulométries en nombre privilégient les petites particules ; les granulométries en mesure favorisent au contraire les grosses particules.

### I.3. UTILISATIONS DES ANALYSEURS D'IMAGES

Les analyseurs d'images fournissent les valeurs des paramètres de caractérisation géométrique nécessaires à l'étude des structures. Les disciplines intéressées sont variées ; les principales sont la métallurgie, la biologie et la géologie. D'autres matériaux, comme les ciments ou les papiers sont également concernés par cette méthode d'analyse.

Les mesures effectuées ont pour but de définir l'aspect général d'une structure puis d'analyser les différents constituants de celle-ci, afin d'expliquer le mode d'acquisition de la structure observée et d'essayer de prévoir son évolution en fonction de sollicitations nouvelles.

### I.3.1. Définition de la structure des matériaux

#### 1.3.1.1. Organisation générale

Tous les matériaux présentent une organisation plus ou moins réglée de leurs constituants et cette structure peut s'observer à plusieurs échelles : au niveau atomique, au niveau des grains, de l'échantillon, etc...

Dans le cas de réseaux de fractures, et quelles que soient leurs dimensions (failles, microfissures), on définit l'orientation générale et celle des principales familles s'il en existe plusieurs. De la même façon, les grains (ou les joints de grains) qui constituent les matériaux cristallins sont analysés pour décrire leur forme, et éventuellement définir une orientation privilégiée de la structure. Plusieurs sortes de systèmes de lignes (les lignes représentant des joints de grains, des fissures...) sont ainsi définis d'après l'orientation des différents éléments linéaires. Ces systèmes sont considérés tout d'abord dans un plan mais l'étude peut être menée dans l'espace à trois dimensions ( § I.3.1.3.).

#### 1.3.1.2. Constituants et positions respectives

##### 1.3.1.2.1. Reconnaissance des constituants

Les éléments qui constituent l'image observée présentent des caractéristiques différentes dans leur taille, leur forme ou encore dans leur teinte ou leur orientation. L'opérateur peut donc en choisissant les paramètres appropriés reconnaître certains objets et les isoler.

Ainsi, on peut citer l'exemple des discontinuités observées sur un terrain ou sur un échantillon, triées selon des critères de direction et d'élongation des éléments de fracture (Gateau et al., 1975). Dans un autre domaine, il peut être également utile de pouvoir faire une discrimination entre les différents types de porosités (porosité intergranulaire ou intragranulaire) dans le but de les étudier séparément. Le critère de sélection est dans ce cas l'environnement des pores (Gateau et al., 1973).

##### 1.3.1.2.2. Géométrie des constituants

Les éléments de la structure sont décrits par des paramètres morpholo-

giques qui font intervenir les mesures de surface, nombre, forme, orientation... Des granulométries sont possibles à partir de ces paramètres (§ I.2.6.1.).

Notons également que les mesures de surface faites sur une section donnent accès au pourcentage volumique d'un constituant, à condition que les théories de l'échantillonnage soient applicables (Hersant et al., 1975).

Tous les caractères géométriques sont très utilisés dans la description quantitative des milieux poreux, que ce soit dans les matériaux métalliques frittés, les produits céramiques (Le Doussal, 1978) mais aussi dans les minerais (Gateau et al., 1973), les argiles (Murphy, 1977), les roches carbonatées (Harvey et al., 1971), les grès (Prévosteau, 1971) ou d'autres roches (Caye et al., 1970). Outre les caractérisations de la porosité d'un matériau, les grandeurs géométriques intéressent les particules comme les grains (Gateau et al., 1977) ou les inclusions (Mathy et al., 1978).

#### I.3.1.2.3. Répartition des constituants

Dans une structure polyphasée, l'examen de l'agencement des différents constituants entre eux apporte des informations utiles, comme par exemple en minéralogie pour révéler les associations minérales (Barbery, 1976).

Il est actuellement possible d'étudier certaines relations de voisinage (proximité, contacts) pour chaque couple de phase (Jeulin, 1978).

La teneur d'un constituant peut varier d'un point à l'autre : pour mettre en évidence ces variations, par exemple celles de la concentration dans les zones minéralisées, on établit des cartes de la distribution de certains minéraux ou de leur association. De la même façon, les cartes d'isodensité de la fracturation d'un terrain permettent de visualiser les zones fortement fracturées.

#### I.3.1.3. Stéréologie

Tous les paramètres structuraux décrits précédemment concernent uniquement la section bidimensionnelle étudiée. Il peut être avantageux de considérer les structures dans l'espace à trois dimensions à partir de l'observation dans un plan. Cette démarche, la stéréologie, consiste donc en l'interprétation spatiale d'images planes, en utilisant des procédés statistiques et géométriques (Underwood, 1970). Le tableau de la figure 7 résume les relations existant entre les quantités mesurées et les quantités calculées, sous réserve



que les mesures soient statistiquement uniformes.

Dimension (arbitraire)	mm <sup>0</sup>	mm <sup>-1</sup>	mm <sup>-2</sup>	mm <sup>-3</sup>
Points	(P <sub>P</sub> )	(P <sub>L</sub> ) → (P <sub>A</sub> ) → (P <sub>V</sub> )		
Lignes	(L <sub>L</sub> )	(L <sub>A</sub> )	(L <sub>V</sub> )	-
Surfaces	(A <sub>A</sub> )	(S <sub>V</sub> )	-	-
Volumes	(V <sub>V</sub> )	-	-	-

Figure 7 : Relations entre quantités mesurées (○) et calculées (□) (Underwood, 1970).

Les lettres P, L, A, et V désignent respectivement des points, des longueurs, des aires et des volumes. L'indice représente l'unité de référence. Par exemple P<sub>A</sub> est le nombre de points par unité de surface d'analyse et V<sub>V</sub> est le volume des particules par unité de volume d'analyse.

Relations stéréologiques :

$$V_V = A_A = L_L = P_P \quad \text{mm}^0$$

$$S_V = (4/\pi)L_A = 2P_L \quad \text{mm}^{-1}$$

$$L_V = 2 P_A \quad \text{mm}^{-2}$$

$$P_V = \frac{1}{2} L_V S_V \equiv 2 P_A P_L \quad \text{mm}^{-3}$$

Ces équations donnent accès par exemple à la proportion en volume des différents constituants dans un matériau, à partir d'une analyse ponctuelle linéaire ou surfacique. Le pétrographe Delesse, en 1848, utilisait déjà l'équivalence entre la surface occupée sur une section quelconque par un constituant d'un agrégat homogène et le volume occupé dans la masse de la roche par le constituant en question. Cette méthode est utilisée, à l'aide du compteur de points, pour déterminer la composition des roches au microscope (Cherotzky, 1976).

Les relations stéréologiques font apparaître des paramètres quantitatifs tels que surfaces, longueurs ou nombres en volume, distributions des dimensions, des formes en volume et des répartitions dans l'espace (De Hoff et al., 1972). L'accès à certains paramètres comme le nombre par volume nécessite toutefois des hypothèses quant à la forme des objets.

### I.3.2. Intérêt des mesures

#### 1.3.2.1. Interprétation explicative

Un matériau soumis à des efforts acquiert une structure (ou organisation des constituants) dont les caractéristiques dépendent de la nature de ce matériau et des conditions de déformation (temps, pression, température). L'examen de la structure finale doit permettre d'expliquer sa genèse (Vialon et al., 1976), c'est-à-dire en géologie de retrouver les états de déformation successifs subis par la roche ou bien d'approcher l'histoire géologique d'une région et l'état initial de la structure. Souvent, l'établissement de modèles facilite l'interprétation de structures observées par ailleurs.

#### 1.3.2.2. Interprétation prévisionnelle

L'examen d'un matériau, pratiqué à des fins de contrôle, aboutit à l'estimation de la qualité par une évaluation chiffrée et objective de caractères bien précis (Chone, 1978) ; les descriptions qualitatives, même détaillées ne sont pas suffisantes.

Dans d'autres études, les paramètres structuraux sont reliés aux propriétés physiques ou mécaniques (Nazaré et al., 1974) comme par exemple la résistance à la rupture (Mathy, 1978).

Quant aux caractéristiques géométriques d'un milieu poreux quel qu'il soit, elles sont corrélées à la perméabilité (Jacquin, 1964). Dans le cadre des sciences de la terre, ces études de porosité intéressent principalement l'hydrogéologie, la géologie pétrolière et la mécanique des sols et des roches ; elles concernent également les phénomènes de diffusion d'éléments ou d'altération.

Par ailleurs, on peut essayer dans certains cas de prévoir les transformations de structures existantes sous l'effet de nouveaux efforts.

Dans l'étude de la fracturation d'une région, des prévisions peuvent être établies sur les zones masquées, si celles-ci font partie d'un même ensemble (pétrographique, tectonique...). En effet, il est utile dans l'exploitation d'une mine, d'estimer l'intensité et l'orientation des fractures à partir des caractéristiques mesurées en surface (Gaviglio, 1980 ; Bouché et al., 1971). Pour la construction de tout ouvrage (barrage, tunnel, tranchée...) la fracturation fait l'objet d'une attention particulière car elle joue un rôle primordial dans la stabilité.

Dans le cadre de l'exploitation de matériaux, les mesures quantitatives apportent des renseignements importants sur le plan prévisionnel. Ainsi, les paramètres de la fracturation intéressent particulièrement le domaine pétrolier puisqu'ils conditionnent largement la production (Quiblier, 1980).

Par ailleurs, les minéralogistes déduisent les possibilités de récupération théorique du minéral intéressant à partir des mesures de teneur, de granulométrie et des estimations des inclusions.

## CHAPITRE II

### DEFINITION ET CALCUL DE QUELQUES PARAMETRES

II.1.. ROSE DES DIRECTIONS

II. 2. DEGRE D'ORIENTATION

II.3. DENSITES

## DEFINITION ET CALCUL DE QUELQUES PARAMETRES

### II.1 - ROSE DES DIRECTIONS

#### II.1.1. Définition

La rose des directions est un mode de représentation utilisé pour les directions de lignes ou de plans (dans le cas d'un plan, il s'agit souvent simplement de la ligne d'intersection de ce plan avec la surface ou avec le plan d'une carte).

Ces directions sont mesurées angulairement par rapport à une direction de référence qui peut être le Nord géographique ou magnétique. La longueur des lignes dans une direction donnée, en pourcentage par rapport au total, est également calculée. La rose montre ainsi les directions de plus forte densité d'orientation d'un plan ou d'une ligne.

Dans ce travail, les directions repérées par rapport au Nord sont notées de 0 à 180° en effectuant une rotation vers l'Est (fig. 8).

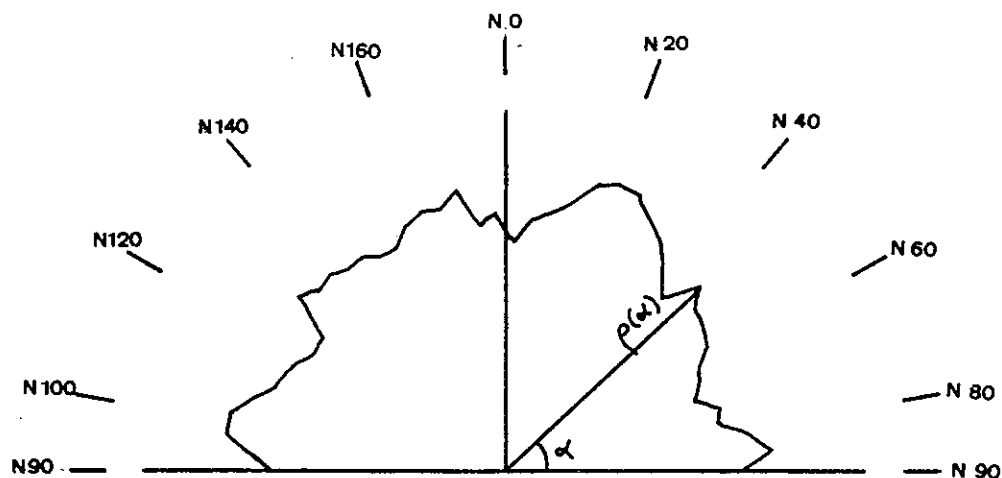


Figure 8 : Définition de la rose des directions.

### II.1.2. Mesures utilisées et calcul

L'élaboration de la rose des directions nécessite la mesure de la fonction intercept de l'analyseur d'images (c'est-à-dire le nombre d'intersections des lignes de balayage avec les objets détectés) dans différentes directions. On effectue donc, sur 180 ° et pas à pas, une rotation du document et l'intercept est mesuré pour chaque orientation de l'image (le pas de rotation est choisi à l'avance).

La méthode de calcul utilisée (Maire, 1977) est résumée ici : la rose des directions d'une figure X est le graphe de la fonction  $\rho(\alpha)$   $d(\alpha)$  (fig. 8) qui représente la longueur des portions du contour de X ayant une direction comprise entre  $\alpha$  et  $\alpha + d\alpha$ . L'intégration de  $\rho(\alpha) d\alpha$  donne le périmètre de X ou la longueur totale d'un réseau de lignes. La quantité  $\rho(\alpha)$  vérifie la relation :

$$\rho(\alpha) = \frac{1}{2} \left\{ D(\alpha) + \frac{d^2 D(\alpha)}{d\alpha^2} \right\}$$

où  $D(\alpha)$  est à une constante près le nombre d'intercepts que peut mesurer l'analyseur. Pour calculer la dérivée seconde de  $D(\alpha)$ , on utilise une technique de lissage. On suppose que la courbe  $D(\alpha)$  est, au voisinage de  $\alpha_0$ , assimilable à une parabole d'équation

$$a_{\alpha_0} (\alpha - \alpha_0)^2 + b_{\alpha_0} (\alpha - \alpha_0) + c_{\alpha_0}$$

Les coefficients  $a_{\alpha_0}$ ,  $b_{\alpha_0}$  et  $c_{\alpha_0}$  sont estimés par un ajustement de type moindres carrés sur  $2n + 1$  mesures encadrant  $D(\alpha_0)$  :

$$D(\alpha_0 - n\beta), \dots, D(\alpha_0), \dots, D(\alpha_0 + n\beta)$$

Ces valeurs sont le résultat de  $2n + 1$  mesures pour des angles ayant un incrément de  $\beta$ .

Compte tenu du lissage et de l'ajustement précédent, on écrit :

$$\rho(\alpha_0) = \frac{1}{2} \{ 2 a_{\alpha_0} + c_{\alpha_0} \}$$

Puisque  $a$  et  $c$  sont fonction de  $n$  et de  $\beta$ , la qualité de l'ajustement dépend du choix de  $n$  et de l'incrément  $\beta$ .

Le programme de calcul comprend donc trois entrées :

- $D(\alpha)$  fourni par l'analyseur
- $n$  entré manuellement
- $\beta$  entré manuellement.

Il restitue à la sortie la valeur de  $\rho(\alpha)$  définie pour tous les angles  $\beta$  entrés et le diagramme polaire correspondant. Il délivre également la longueur totale du réseau de lignes ou du périmètre de  $X$ , qui est la somme des valeurs de  $\rho(\alpha)$  obtenues pour chaque angle.

Si pour des raisons de dimension, le document a été analysé en plusieurs champs, les valeurs de  $\rho(\alpha)$  correspondant aux mêmes orientations sont cumulées et la rose finale est représentative de l'ensemble.

### II.1.3. Choix de $n$ et de $\beta$ - Précisions.

Le calcul de la rose dépend donc uniquement des valeurs de  $n$  et de  $\beta$ . Pour les essais effectués dans le cadre de cette étude,  $n$  est fixé en général à 5 et l'on choisit  $\beta$ , d'une manière empirique également, égal à 2 ou 5 degrés selon l'aspect de l'image. Des essais ont été effectués sur plusieurs exemples

avec différentes valeurs de  $n$  et de  $\beta$  : il en ressort qu'un incrément de 5 degrés est suffisant pour une structure isotrope ou faiblement anisotrope comme les dessins de joints de grains. Mais, pour analyser un réseau de fractures présentant plusieurs orientations privilégiées, un pas de rotation de l'image de 2 degrés est nécessaire pour améliorer les détails de la rose des directions et pour distinguer des orientations voisines.

Pour de telles valeurs de  $\beta$ , l'erreur sur le calcul de la longueur totale reste inférieure à 5 %. Les erreurs peuvent être dues à l'épaisseur des lignes ou des traits, et dans ce cas la longueur est surestimée. Elle est au contraire sous-estimée quand il s'agit d'un réseau de lignes sécantes.

Le choix de  $\beta$  peut faire varier la résolution angulaire : plus l'incrément est petit, plus la rose est détaillée, mais en dessous de 2 degrés il est souvent difficile d'affirmer si certaines irrégularités de la rose représentent effectivement des directions appartenant à l'image.

## II.2 - DEGRE D'ORIENTATION $\Omega$

Ce paramètre fait l'objet du paragraphe IV.1.2.3.2. Soulignons uniquement que le degré d'orientation exprime l'allongement par rapport à un cercle et qu'il peut être utile pour comparer des structures entre elles. Exprimé en pourcentage,  $\Omega$  est nul pour une structure isotrope. Un système totalement orienté a un degré d'orientation égal à 100. Ce paramètre est obtenu grâce à la mesure de l'intercept pour deux orientations particulières de l'image par rapport aux lignes de balayage de l'écran.

## II.3 - DENSITES

Elles s'expriment en nombre, longueur ou surface par unité de surface.

Pour un réseau de lignes (fractures), on utilise la densité en nombre et surtout la densité linéaire. Dans ce cas, la longueur  $L$  peut être calculée de différentes manières :

- Par la Surface 
$$L = \frac{\text{Surface occupée par les traits}}{\text{Epaisseur des traits}}$$



Cette méthode convient pour des dessins où l'épaisseur est constante mais elle n'est pas très précise.

- Par le périmètre 
$$L = \frac{\text{Périmètre des traits}}{2}$$

On a recours à ce procédé plus précis que le précédent, lorsque la rose des directions n'est pas recherchée.

- Par le calcul de la rose des directions

$$L = \sum_{\alpha=0}^{180^\circ} \rho(\alpha) \quad (\S . II.1)$$

Une relation stéréologique donne également accès à la longueur par unité de surface  $L_A$  :

$$L_A = \frac{\pi}{2} P_L, \text{ où } P_L = \text{nombre de points d'intersections/unité de longueur de ligne expérimentale.}$$

Cette relation est utilisée par Karcz et al., (1979) pour déterminer l'intensité de fracturation.

Une densité peut également se référer à l'unité de volume. C'est le domaine de la stéréologie ( §. I.3.1.3.). Les grandeurs telles que  $L_V$ ,  $S_V$  et  $V_V$  sont ainsi accessibles.

## CHAPITRE III

### ANALYSE QUANTITATIVE DE LA FRACTURATION

#### EXEMPLE DU SITE DE BARRAGE DE VINCA

#### III.1. ANALYSE QUANTITATIVE DES FRACTURES

#### III.2. ETUDE DE LA FRACTURATION DU SITE DE BARRAGE DE VINCA

## ANALYSE QUANTITATIVE DE LA FRACTURATION

### EXEMPLE DU SITE DE BARRAGE DE VINCA

#### III.1 - ANALYSE QUANTITATIVE DES FRACTURES

##### III.1.1. La mesure quantitative

Les paramètres mesurés intéressent toutes les fractures, indépendamment de leur longueur, que ce soit à l'échelle du micron ou du kilomètre. Ils caractérisent principalement leur longueur apparente sur une surface de référence (carte) ou d'affleurement, leur orientation et leur densité en nombre ou longueur.

##### III.1.1.1. Buts de l'analyse quantitative

L'analyse de la fracturation des roches comprend différentes étapes qui s'échelonnent depuis la collecte des observations jusqu'au traitement des données, sous un aspect qualitatif puis quantitatif (Ruhland, 1973).

L'étude qualitative ou analyse géométrique comporte l'inventaire et la reconnaissance des divers systèmes de fractures. Ce travail peut consister en un dessin précis de la fracturation des affleurements existants, en un levé systématique des caractéristiques des fissures (orientation, taille, ouverture...) mais aussi en un essai d'interprétation en termes génétiques qui permettra peut être de mieux comprendre l'organisation des fissures. En résumé, l'analyse qualitative définit l'organisation et l'orientation de la fracturation et propose éventuellement une explication génétique.

L'étude quantitative est abordée par le dénombrement des fractures et leur agencement par unité de surface ou de volume. Elle définit donc d'une part le régime de la fracturation suivant la fréquence des fractures, d'autre part l'intensité planaire ou volumique.

L'ensemble de ces données, qualitatives et quantitatives, conduisent à la compréhension des mécanismes tectoniques de la fracturation. Il est alors possible d'établir des modèles structuraux comme par exemple celui de la fracturation liée à une structure plissée (Gruneisen et al., 1973).

La connaissance de l'état de la fracturation présente de l'intérêt à plusieurs titres : les fractures sont d'abord des indicateurs de la structure géologique et de l'histoire d'une région. Par ailleurs, elles conditionnent par leur fréquence et leur orientation les exploitations de mines ou de carrières (Rabu et al., 1978) et également la stabilité des ouvrages. Pour une identification générale des terrains, les géotechniciens développent l'analyse de la fissuration des massifs en complément des caractéristiques comme la composition minérale, la porosité, le comportement mécanique... (Dayre et al., 1978). D'autre part dans les milieux fissurés, par leur fréquence et leur ouverture, les fractures conditionnent les perméabilités et par conséquent l'écoulement des eaux souterraines (Jamier et al., 1979 ; Drogue et al., 1975). De la même manière, les microfissures et les fractures, considérées en tant que réservoirs ont un intérêt évident pour la recherche et l'exploitation des ressources comme les pétroles, les gaz, l'eau et les minéralisations. L'étude des microfissures peut également contribuer à une meilleure caractérisation des propriétés mécaniques d'un matériau et de son altérabilité.

### III.1.1.2. Méthodes de l'analyse quantitative

Les méthodes classiques de la fracturation décrites par Ruhland (1973) et Vialon et al. (1976) consistent essentiellement en des représentations de la fracturation au moyen de graphiques établis à partir de relevés systématiques de la longueur et de l'orientation des fractures.

Les différents systèmes sont représentés statistiquement au moyen d'histogrammes, de diagrammes en rosace ou encore de stéréogrammes de densité. Leur représentation géométrique utilise également la projection stéréographique

mais aussi le bloc unitaire établi à partir de la fréquence des fractures et de leur orientation. La représentation la plus imagée reste le tectonogramme de fracturation qui donne dans une représentation spatiale, l'orientation, l'intensité ainsi que l'agencement des fractures.

Le traitement automatique des mesures structurales rendu possible grâce à l'emploi des ordinateurs permet d'accéder rapidement d'une part au stockage et au tri des données, d'autre part aux calculs (statistiques ou autres) et à l'automatisation des constructions sur stéréogrammes, etc...

Des procédés de conception récente et utilisant également l'ordinateur offrent de nouvelles possibilités, en triant les informations directement à partir d'une image. Parmi ces méthodes, le filtrage optique permet de corriger les défauts des photographies ainsi que d'extraire et de combiner les informations qu'elles contiennent (Henry, 1980). Le filtrage optique consiste à former le spectre en fréquence (à deux dimensions) d'un document, en lui faisant diffracter la lumière cohérente issue d'un laser. Les différentes directions de l'image peuvent être sélectionnées dans le plan du spectre grâce à un filtre en forme d'éventail. En plaçant derrière le filtre un détecteur sensible, on peut mesurer l'intensité lumineuse correspondant à la direction moyenne choisie. Cette mesure est proportionnelle à la longueur cumulée des fractures se rapportant à la direction donnée. Ce montage décrit par Drogue et al., (1975), Fontanel et al., (1967), et utilisé par Robert (1976) pour étudier la fracturation de certains massifs alpins, permet de caractériser en valeur relative l'orientation et l'intensité de la fracturation, mais il ne peut pas trier les fractures selon leurs longueurs. Il est parfois utilisé en complément des analyseurs d'images (Grillot, 1977) qui permettent eux aussi la description objective et l'analyse quantitative de la fracturation à différentes échelles.

### III.1.2. Etude de la fracturation par analyseur d'images

Dans ce paragraphe, seules les possibilités offertes par l'appareil utilisé sont citées. Les améliorations de l'image ainsi que l'accès à d'autres paramètres, rendus possibles par l'évolution récente des techniques, seront décrits au chapitre V.2.

### III. 1.2.1. Nature de l'image

L'étude de la fracturation à une échelle régionale nécessite une représentation des fractures sous forme de carte. Si ce relevé est le résultat d'observations faites sur le terrain, il ne peut s'adresser qu'à de petites surfaces, d'où la représentation statistique des champs de fractures plus ou moins proche de la réalité selon la fréquence des mesures et la qualité des stations choisies.

L'exploitation de photographies aériennes permet de représenter la distribution réelle des fractures et de prendre en compte leur extension totale. Dans ce cas, la part de subjectivité du géologue est très grande et une telle interprétation doit toujours être vérifiée et complétée par des observations de terrain. Les photographies aériennes ne sont pas étudiées directement par l'analyseur car les contrastes ne sont pas suffisants. Par ailleurs, l'appareil n'étant pas capable d'interpréter l'image, il pourrait prendre en compte des informations fausses, c'est-à-dire tous les éléments de même ton de gris que les fractures et inversement, il ne verrait pas de fractures là où pour des raisons de topographie ou autre, le géologue en placerait une. Il est donc préférable dans la plupart des cas que les clichés soient interprétés et redessinés par un géologue.

L'étude des fissures à l'échelle de l'échantillon peut être beaucoup plus directe. Des méthodes de préparation bien appropriées à la nature de la roche augmentent les contrastes entre les fissures et le matériau (§ I.1.2.3.). Parmi ces techniques, l'imprégnation par des produits colorés ou fluorescents est la plus utilisée (Molina, 1981). Mais il existe d'autres méthodes simples et donnant de bonnes images de la microfissuration. Ainsi, l'emploi d'un vernis étalé sur une face polie et décollée après séchage permet d'obtenir une réplique de la surface de la roche (Tourenq 1969). Un autre procédé simple et rapide a été employé pour visualiser la fissuration d'un marbre (§ IV.3) : la lame mince est placée directement dans un agrandisseur et la photographie est développée sur un papier à fort contraste.

### III.1.2.2. Grandeurs mesurées

La définition des paramètres caractérisant les fractures et les fonctions de l'appareil utilisées pour leur acquisition sont décrites précédemment (§ II) ainsi que les conditions d'analyse.

Les caractéristiques obtenues à partir de l'analyse d'un réseau de fractures sont donc les roses des directions et les densités. Les rosaces expriment la répartition directionnelle des fractures comptabilisées en longueurs totales cumulées ; elles représentent l'anisotropie de fissuration du milieu.

Les densités de fracturation sont égales aux développements linéaires des fractures par unité de surface. La longueur totale des fractures est calculée soit à partir de la rose des directions, soit à partir du périmètre ou de la surface occupée par les discontinuités (§ II.3). Des cartes en courbe d'isodensité permettent de visualiser les variations de densité de la fracturation dans une région. D'autre part, ces paramètres peuvent être utilisés pour caractériser les fractures en fonction du faciès, de l'épaisseur des bancs, des conditions tectoniques...

Comme l'image analysée est un réseau de lignes d'intersection des fractures avec le plan où se fait l'examen (en général la surface topographique ou le plan de la carte), seules les fractures verticales sont réellement significatives par l'orientation de ces lignes. Dans l'exemple présenté, ce seront surtout des fractures verticales qui seront traitées, rendant immédiatement interprétables les diagrammes obtenus.

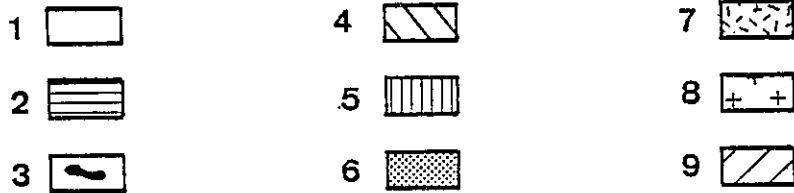
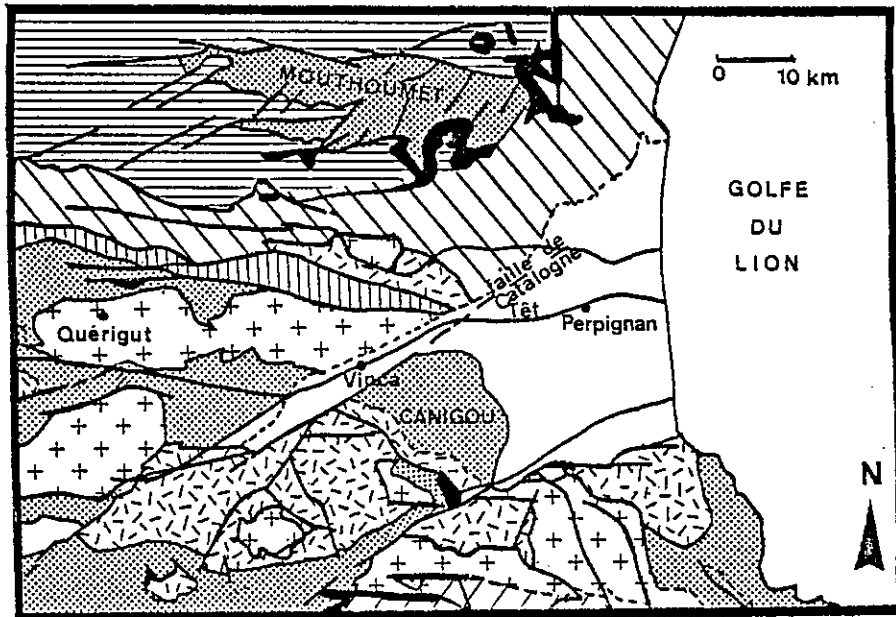
### III.2.- ETUDE DE LA FRACTURATION DU SITE DE BARRAGE DE VINCA

Lors des études géologiques d'un site de barrage, la fracturation fait en général l'objet d'une attention particulière car elle conditionne l'étanchéité et la stabilité du massif d'appui. Dans cet exemple, l'étude a pour objectif la connaissance et l'explication des caractéristiques géotechniques du site par la compréhension génétique des fractures.

#### III.2.1. Présentation du site

##### III.2.1.1. Situation géographique et géologique

Situé dans les Pyrénées Orientales, le barrage de Vinça mis en eau récemment (1978), a été réalisé dans le but de régulariser les crues de la Têt et de satisfaire aux besoins hydroagricoles. Les terrains de fondation sont essentiellement granitiques, et la cuvette de retenue est établie sur des formations néogènes (marnes, sables, conglomérats) qui reposent en discordance sur le granite. La fracturation du massif est particulièrement intense



- 1- Quaternaire et néogène
- 2- Zones sous-pyrénéennes et avant pays
- 3- Volcanisme triasique
- 4- Zones nord-pyrénéennes
- 5- Zone interne métamorphique
- 6- Paléozoïque
- 7- Cristalloyphyllien
- 8- Granite
- 9- Haute chaîne primaire

Figure 9 : Cadre géologique régional du barrage de Vinça (d'après Souquet et al., 1977).



et il faut noter le passage à proximité du site de la faille de Catalogne, grand décrochement de direction N60 à jeu senestre, qui a une grande influence sur la structure du site et de toute la région (fig.9) (Souquet et al., 1978).

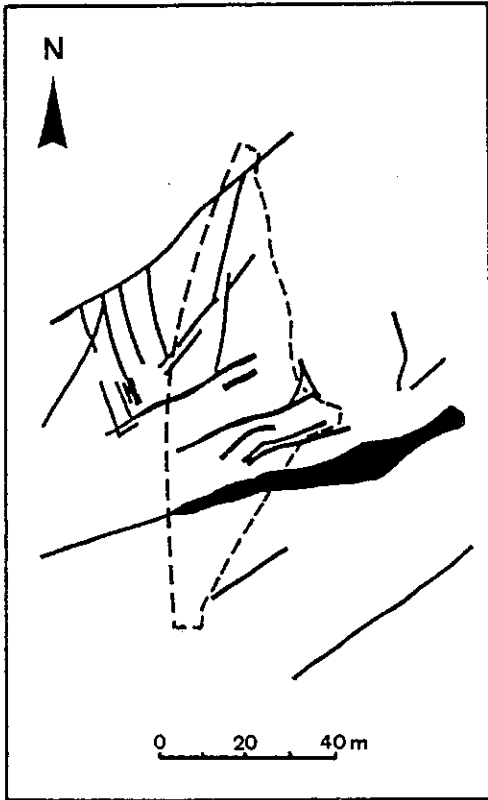
### III.2.1.2. Aspect géotechnique

La morphologie du site avait dans un premier temps orienté les études vers la réalisation d'un barrage voûte. Mais le projet a été examiné de nouveau, compte tenu du rôle que pouvait avoir une fracturation très dense sur la stabilité de l'ouvrage. C'est donc un barrage poids en béton qui a été construit.

Le problème de la perméabilité a été abordé par des forages qui ont permis de réaliser des essais d'eau. Ceux-ci ont révélé un granite peu perméable dans son ensemble. La perméabilité est plus élevée près de la surface ou dans les zones à fractures importantes sans remplissage argileux; quant aux zones très écrasées qui jalonnent les accidents principaux, elles sont pratiquement étanches. Cette faible perméabilité a été confirmée pendant les travaux, par les volumes très faibles de coulis injectés pour la réalisation du voile d'étanchéité. Les circulations d'eau au sein d'un massif granitique étant directement liées à la fracturation, il est donc intéressant d'examiner particulièrement celle-ci.

### III.2.1.3. Premières descriptions de la fracturation

Les études préliminaires soulignent déjà le fait que le massif est affecté par une fracturation intense résultant de déformations superposées, les principales fractures donnant au site un style structural bien particulier. La carte de la fracturation relevée après la réalisation des fouilles (à 10 mètres de profondeur) donne une image très complexe, confuse, et une impression de grande densité (fig. 10 b). Les directions des fractures figurant sur la carte établie pendant les études préliminaires et sur celle réalisée sur le fond de fouille, semblent les mêmes dans les deux cas. De plus, il est important de noter que toutes les fractures ont un pendage pratiquement vertical. Pour plus de précisions et pour exploiter au mieux les données recueillies lors des différents stades de l'étude, la fracturation a été traitée par analyseur d'images.



a - carte de fracturation établie au stade préliminaire et emplacement du barrage

b - levé de la fracturation du fond de fouille et limites des 3 champs analysés séparément.

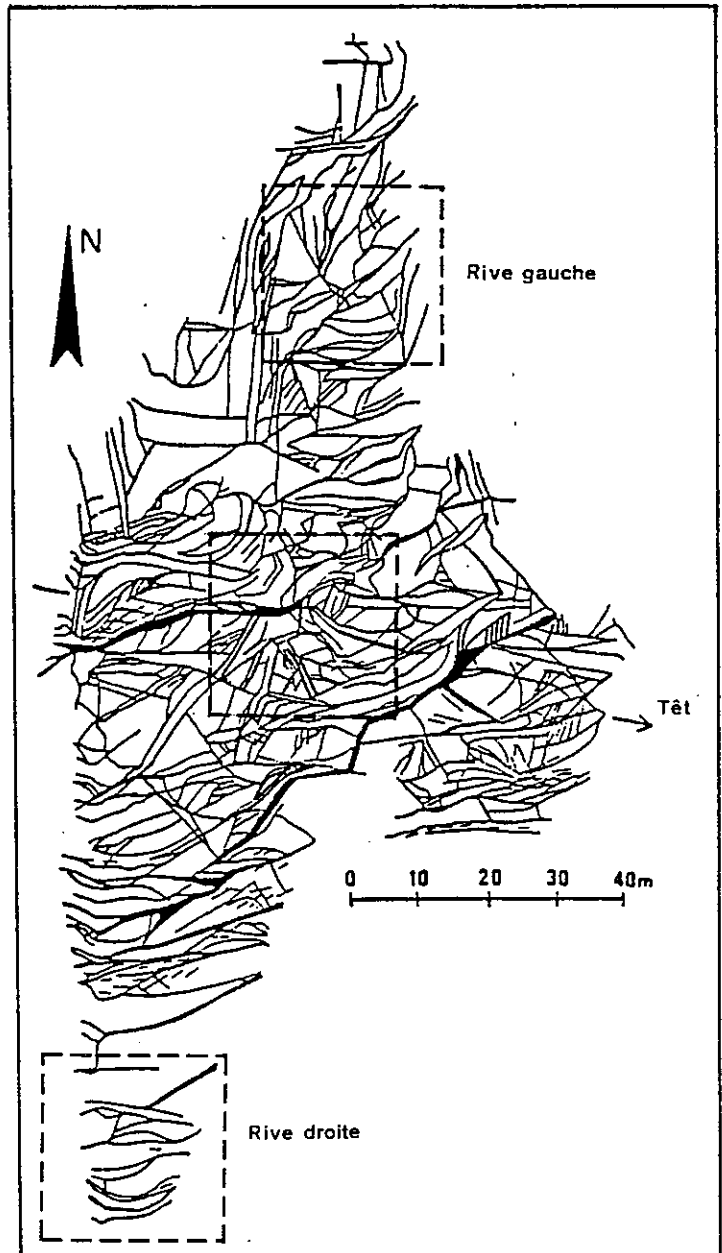


Figure 10 : Fracturation du site de barrage de Vinça

### III.2.2. Analyse d'images de la fracturation

Deux documents ont été analysés :

- La carte de la fracturation réalisée à l'échelle du 1/200ème à l'aide de moyens classiques, au cours des études géologiques préliminaires - fig. 10 a (Rapport inédit R. Barbier, P. Antoine).

- La carte de fracturation du fond de fouille, établie à l'échelle du 1/100ème à partir d'un levé systématique des fractures après la réalisation des fouilles du barrage - fig. 10 b (Antoine et al., 1979).

Pour des raisons pratiques, ces documents ont été ramenés à des dimensions utilisables par l'analyseur et la carte du fond de fouille a dû être découpée en 18 champs. Les analyses ont fourni les roses des directions ainsi que les densités de fracturation, relatives aux deux cartes.

#### III.2.2.1. Roses des directions

Elles mettent en évidence l'existence de plusieurs familles de fractures (celles-ci étant toutes subverticales, elles sont donc immédiatement significatives par leurs directions lues sur les roses).

La rosace relative au premier stade des études (carte de la figure 10 a) et représentée sur la figure 11a met en évidence des fractures dont la direction est comprise entre N0 et N80E d'une part, et N150 et N180 d'autre part. Les différentes orientations observées sont plus ou moins fréquentes avec toutefois une nette prédominance de la direction N60E (fig. 11 a).

Sur la rose des directions de la fracturation relevée sur le fond de fouille (carte de la figure 10b), toutes les directions sont présentes (fig. 11b). Les plus fréquentes sont comprises entre N50 et N100E.

Il ressort de cette première analyse que les directions N60 à N70 E sont les plus fréquentes ; elles sont représentées sur les deux rosaces. La différence essentielle entre les deux graphes est le fait que les fractures de direction N90-100 E présentes sur le fond de fouille, n'ont pas été observées en surface lors des travaux préliminaires.

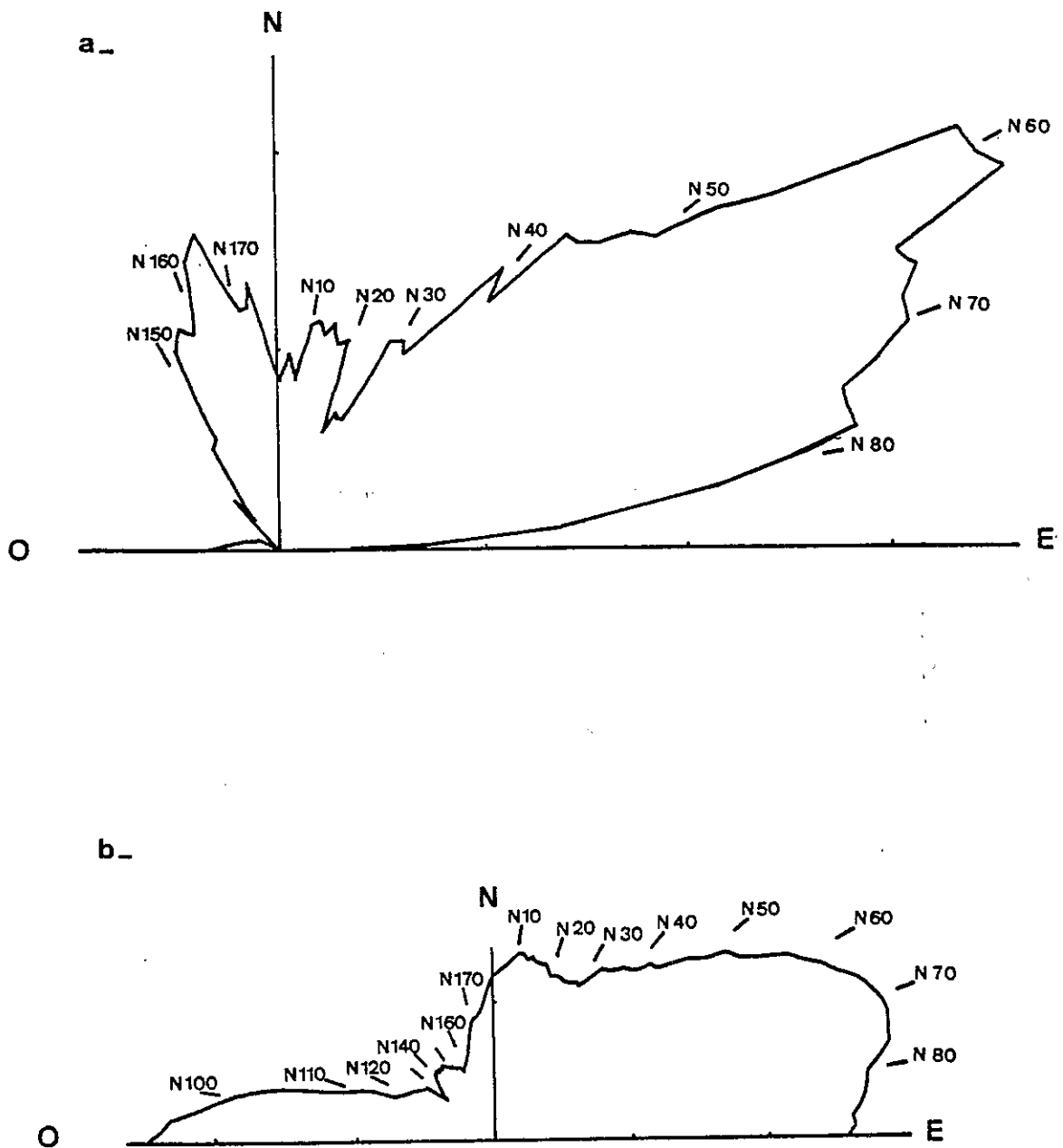


Figure 11 : Rose des directions de la fracturation du site de Vinça  
a - fractures relevées en surface (carte fig. 10 a)  
b - fractures relevées au fond des fouilles (carte fig. 10 b)

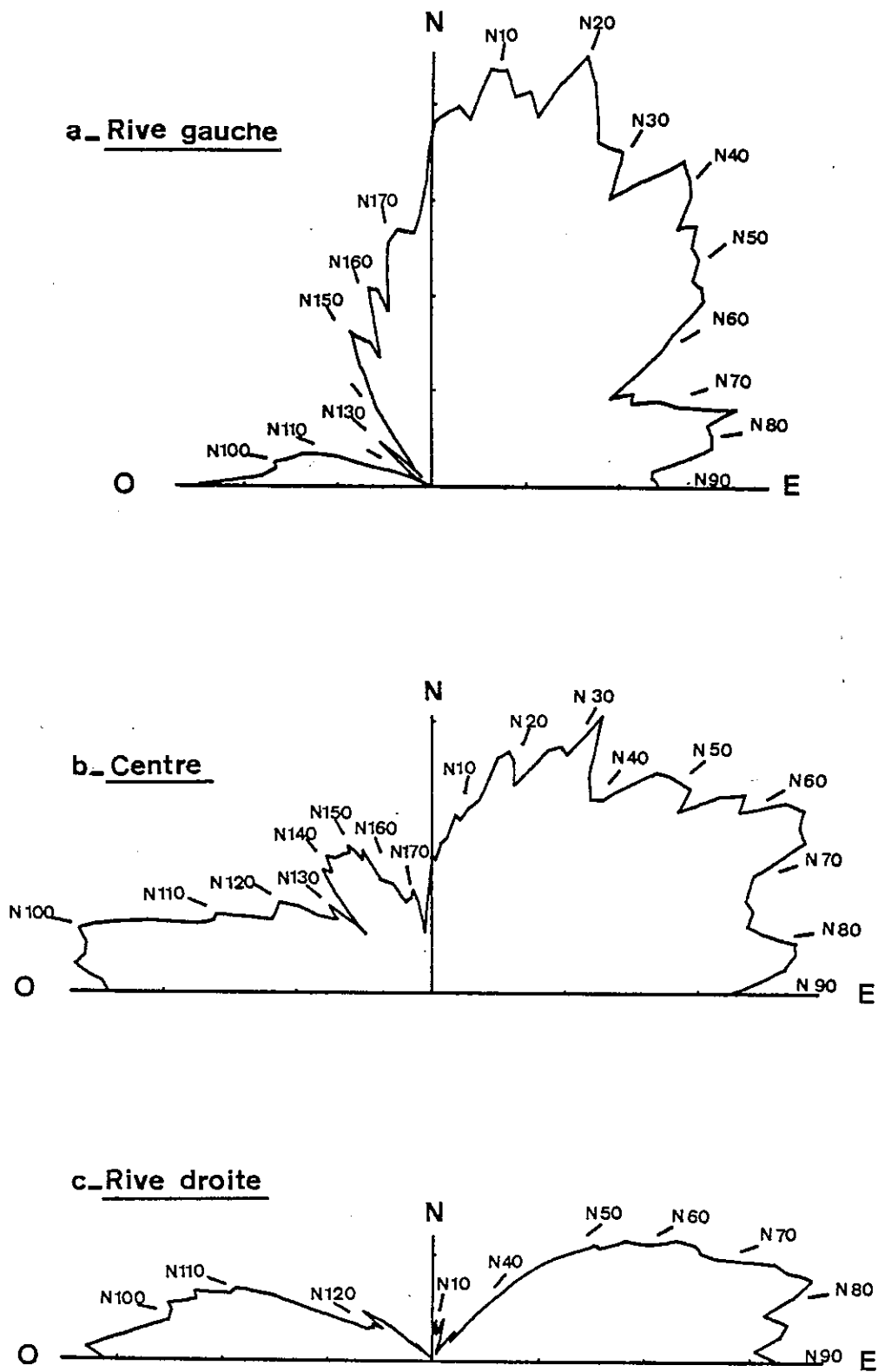


Figure 12 : Rose des directions de la fracturation de 3 secteurs du fond de fouille délimités sur la figure 10 b.

L'importance du pic d'une famille de fractures peut être plus grande sur l'une des cartes. C'est le cas de la direction N160-170 E qui est très nette sur le premier document et très faible sur le deuxième, par rapport aux autres directions.

La différence d'échelle des deux cartes analysées n'a pas été prise en compte lors du calcul de la rose. De ce fait, il est impossible de comparer directement sur les rosaces, les longueurs réelles des fractures d'une orientation donnée d'une carte à l'autre.

D'autre part, différents secteurs du fond de fouille ont été analysés séparément pour comparer les directions des fractures en rive gauche, au centre et en rive droite du site. Ces trois zones sont délimitées sur la carte de la figure 10 b et les trois roses correspondantes sont représentées sur la figure 12.

Les principales familles de fractures sont différentes d'une rive à l'autre et le centre du fond de fouille constitue un intermédiaire où toutes les familles existent. Cela pourrait être dû aux différences de pente topographique d'une rive à l'autre ou au centre. En fait, les fractures étant toutes subverticales, ce paramètre n'intervient pas même si les cartes de fractures ne sont pas ramenées à un plan horizontal.

Ainsi, les fractures de direction comprise entre N0 et N50E prédominent en rive gauche et diminuent au centre pour devenir inexistantes en rive droite où toutes les fractures ont une orientation allant de N60 à N110E.

#### III.2.2.2. Densités de fracturation

Les densités linéaires (§II) ont été calculées pour les deux documents (du stade préliminaire et du fond de fouille) en prenant la longueur totale des fissures obtenue par le calcul de la rose des directions (§II.1).

- Carte 1 = stade préliminaire des études :

$$d_1 = \frac{L_1}{S_1} = 0,049 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

- Carte 2 = fond de fouille

$$d_2 = \frac{L_2}{S_2} = 0,69 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$$

$d_1$  ,  $d_2$  = densités linéaires de la fracturation relatives aux cartes 1 et 2

$L_1$  ,  $L_2$  = longueur totale des fractures mesurées sur les cartes 1 et 2

$S_1$  ,  $S_2$  = surface de terrain où les fractures ont été relevées pour l'établissement des cartes 1 et 2

Seule la densité de fracturation du fond de fouille est proche de la réalité car au stade préliminaire, les terrains de couverture et l'altération superficielle du granite masquent de nombreuses fractures. Le document établi en surface ne représente donc que les grands accidents.

Cependant, ces valeurs de densité prises individuellement et sans points de repère n'ont pas grande signification mais elles peuvent être intéressantes pour comparer la densité de fracturation en divers points d'un site ou même d'un site à l'autre.

### III.2.3. Interprétation

L'existence sur le site d'un grand nombre de fractures de direction N60E ainsi que la proximité de la faille de Catalogne orientée également N60 (fig. 9) laissent supposer que la structure du massif d'appui et les différentes associations de fractures observées en divers points du site sont directement influencées par la proximité de cet accident.

Par ailleurs, les grandes familles de fractures mises en évidence par les rosaces et déjà plus ou moins observées lors de l'étude préliminaire, délimitent des sortes d'amygdales juxtaposées et de dimension variable dans le massif granitique. L'interprétation de cette structure revêt une grande importance pour la compréhension des propriétés géotechniques du site (Antoine et al., 1979).

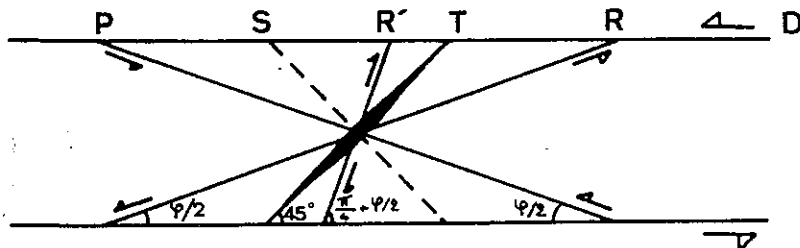
On propose donc ici une interprétation structurale et ses conséquences sur le plan géotechnique.

### III.2.31. Interprétation structurale

#### III.2.31.1. Fractures liées à une zone de décrochement

Un décrochement se définit souvent par une association de structures élémentaires qui sont souvent des discontinuités disposées suivant des règles précises. Chaque discontinuité peut apparaître à son tour comme un cisaillement élémentaire et le sens général du déplacement peut être défini par les relations angulaires entre les failles et par les mouvements élémentaires. Un plan de décrochement principal D, est parfois uniquement potentiel et n'est pas toujours exprimé par une faille.

Les principales discontinuités pouvant apparaître dans une zone de décrochement sont les suivantes (fig. 13) :



(Les angles sont fonction du coefficient de frottement interne  $\varphi$  au moment de la déformation).

Figure 13 : disposition des fractures liées à une zone de cisaillement senestre. (Tchalenko, 1970 ; Hancock, 1972 ; Vialon et al., 1976 ; Robert et al., 1976).



- les fentes d'extension T, dont la direction d'écoulement est perpendiculaire aux épontes.
  - les fractures conjuguées R et R', dites de Riedel, dont le déplacement s'effectue dans le plan des fractures, dans le même sens (R) ou de sens contraire (R') à celui de la zone de cisaillement.
  - les fractures P, avec déplacement dans le plan des fractures.
  - la schistosité S qui est le plan d'aplatissement.
- Notion d'ordre :

En changeant d'échelle d'observation, on constate que tout cisaillement élémentaire (R, R' ou P) est souvent caractérisé par un réseau de fractures associées qui définissent des zones de cisaillement de taille plus petite (fig.14). Ces différentes zones de cisaillement sont dites d'ordres successifs. Ainsi, les fractures associées (R, R', T et P) au décrochement D dit de premier ordre, sont dites de second ordre. Les éventuelles fractures plus fines qui s'organisent sur ce réseau sont de troisième ordre...

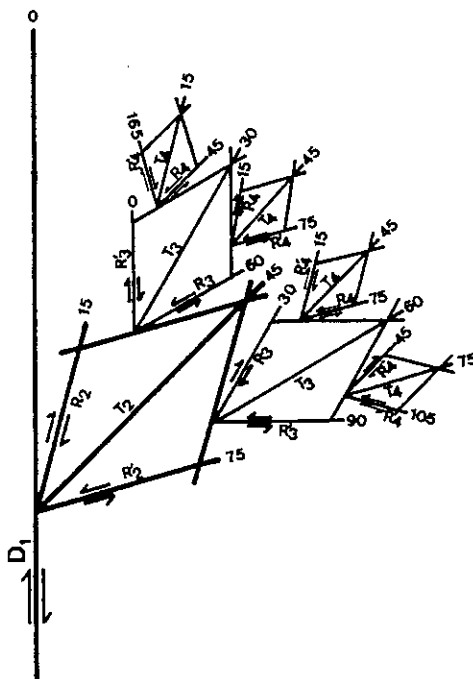


Figure 14 : Distribution des fractures associées de cisaillement (R, R', T) de quatre ordres successifs à partir d'un décrochement N-S dextre considéré de premier ordre (Vialon et al., 1976).

- Conditions d'apparition des fractures P et des fractures de Riedel

Dans une zone de cisaillement, toutes les différentes structures élémentaires décrites ci-dessus ne coexistent pas nécessairement. En général, seul existe un nombre de fractures restreint (les plus courantes sont le plan de cisaillement, le système conjugué correspondant R et R', et le réseau de fentes T). Les conditions d'apparition des fractures P, R et R' dépendent des possibilités de dilatation de la zone de cisaillement (Walon, 1979) :

- lorsqu'il y a dilatation possible de la zone de cisaillement, ce sont les fractures élémentaires de type P qui sont créées.
- lorsque la zone de cisaillement est "contenue" (dilatation perpendiculaire au plan de cisaillement impossible ou limitée, ou même avec compression selon ce plan), ce sont les fractures de Riedel (le plus souvent R) qui apparaissent.

Ainsi dans une même zone, les fractures P et R ne peuvent pas normalement être contemporaines, les ruptures P correspondant à une dilatation de la zone décrochante et les fractures R à un aplatissement. Si ces deux types de discontinuités coexistent dans une zone de cisaillement, il faut envisager leur formation à des périodes différentes correspondant à des régimes différents, en compression ou en dilatation.

- Evolution des discontinuités en amygdales :

Les ruptures élémentaires généralement disposées en relai ou en échelon sur la direction de cisaillement sont souvent associées et découpent des blocs dont les formes sont grossièrement losangiques (Robert, 1976). Si le système évolue, par glissement le long des plans de cisaillement élémentaire, les blocs losangiques se déforment ; il s'ensuit l'apparition de lentilles ou d'amygdales limitées par des failles courbes (fig. 15).

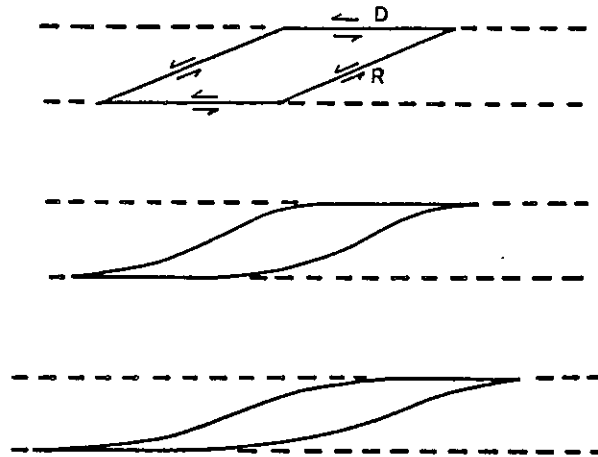


Figure 15 : Evolution de l'association de 2 discontinuités (D et R) dans le glissement.

### III.2.31.2. Structure du massif d'appui du barrage

L'observation sur le site des amygdales à l'échelle du centimètre à la dizaine de mètres, ainsi que l'existence de la faille de Catalogne à quelques kilomètres au sud de Vinça (fig. 9) nous conduisent à penser que la structure du massif est directement liée à ce grand accident de direction N60 E environ et dont le mouvement général est un coulissage horizontal senestre (Souquet, 1977).

A cette zone de cisaillement (D), est donc associé un système de fractures élémentaires dont les directions possibles sont schématisées sur la figure 16.

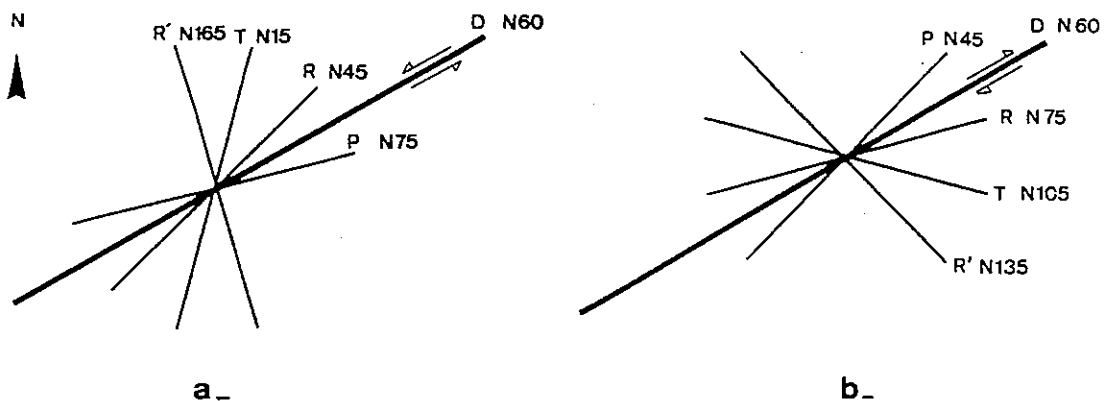


Figure 16 : Direction des discontinuités associées à un décrochement (D), de direction N60E, senestre (a) et dextre (b).

Toutes ces directions sont plus ou moins bien observées sur les rosaces obtenues sur le site (fig.11 et 12), mais la structure ne peut pas être interprétée comme étant simplement un décrochement senestre N60 accompagné des discontinuités élémentaires de second ordre R, R', T et P. En effet, d'une part les fractures P et R ne peuvent coexister dans un même système (à moins de supposer que la zone de décrochement ait fonctionné en compression et en extension à des périodes différentes, § précédent), d'autre part les roses mettent en évidence des directions ne pouvant être reliées à un décrochement senestre N60. C'est le cas des failles N90-100E. On est alors amené à considérer un accident N60 accompagné de fractures élémentaires, mais ayant joué dans ce massif en décrochement dextre et senestre à des époques différentes. Ce décrochement ayant fonctionné dans une zone de compression, est accompagné à chaque fois par des fractures de Riedel R et R' et par des fentes d'extension T.

Les figures 17 et 18 représentent la distribution des fractures associées (R, R' et T) de trois ordres successifs, à partir d'un décrochement de direction N60 dextre (fig. 17a) et senestre (fig. 18a) considéré de premier ordre, et les roses des directions correspondant à ces deux systèmes (fig. 17a et 18b). Ainsi, les directions comprises entre N0 et N60E d'une part, et N150 et 180 E d'autre part, sont caractéristiques d'un décrochement N60 senestre. Les directions N60 à N150 E sont associées à un décrochement N60 dextre. Les secteurs angulaires ainsi définis, correspondant aux deux systèmes sont complémentaires (fig. 19).

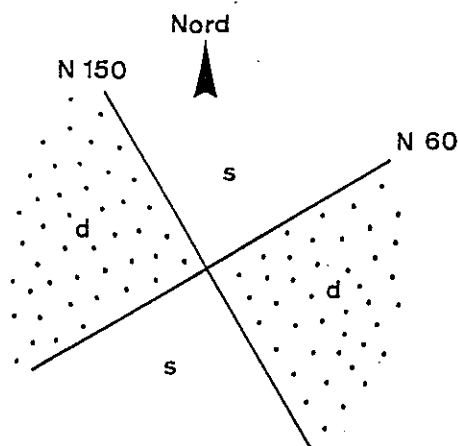


Figure 19 : Directions des fractures associées à un décrochement N60 dextre (d) et senestre (s).

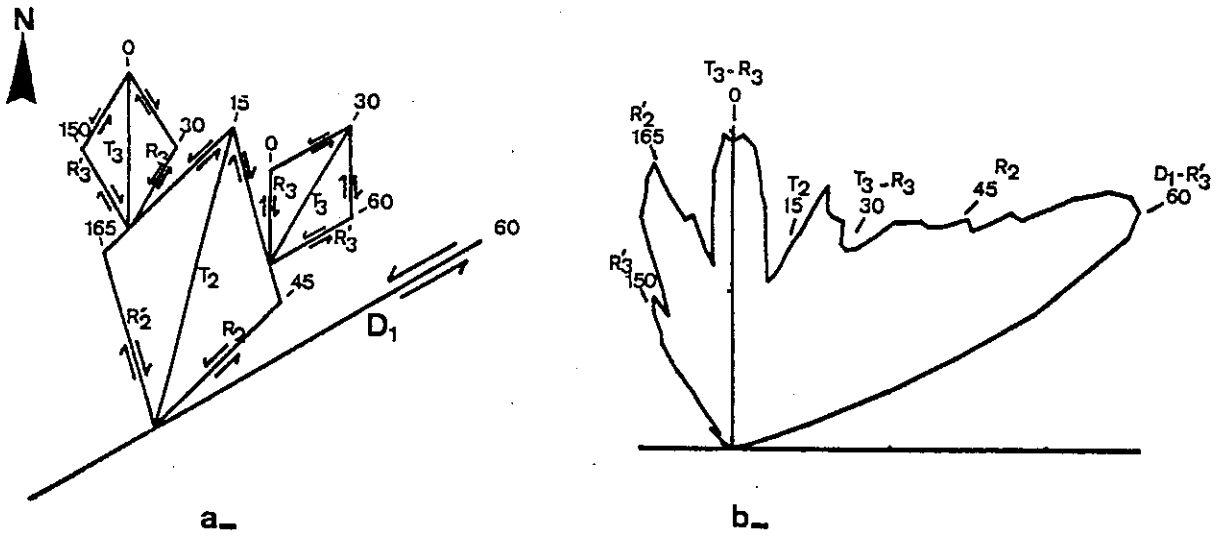


Figure 17 : Distribution des fractures associées (R,R',T) de 3 ordres successifs, à partir d'un décrochement N60 senestre (a) et rose des directions correspondante (b)

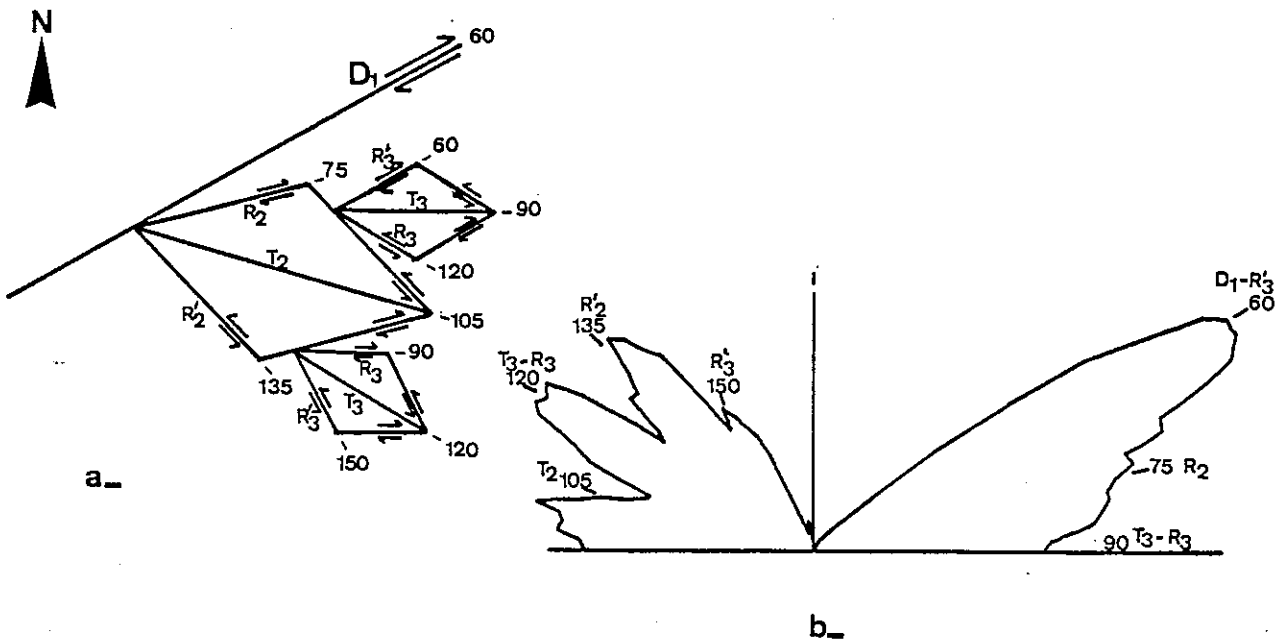


Figure 18 : Distribution des fractures associées (R,R',T) de 3 ordres successifs, à partir d'un décrochement N60 dextre (a) et rose des directions correspondante (b).

L'adjonction d'un système de fractures de quatrième ordre ne ferait qu'agrandir les différents secteurs angulaires et les zones "dextres" et "senestres" délimitées sur la figure 19 se chevaucheraient légèrement. Ces structures du quatrième ordre, si elles existent, ne sont pas importantes par rapport aux fractures du premier et deuxième ordre. Il est donc préférable de les négliger pour simplifier l'interprétation, d'autant plus que dès le troisième ordre, on retrouve les directions des fractures appartenant au premier ordre. Ensuite, il est commode pour trier les différentes familles de fractures, de reporter ces différents secteurs angulaires (s et d) sur les roses des directions de la fracturation du site ainsi que les directions des fractures associées pouvant exister dans ces deux systèmes (fig. 20 et 21).

Il apparaît ainsi clairement que les roses obtenues pour l'ensemble de la fracturation relevée en surface (fig. 20a) ou sur le fond de fouille (fig. 20b) rassemblent les directions des fractures associées à un décrochement N60 dextre et celles liées à un décrochement N60 senestre.

D'autre part, le fond de fouille montre des différences d'un secteur à l'autre (fig. 21) : la rose relative à la fracturation observée en rive gauche (fig. 21a) témoigne de la prédominance du système senestre sur le système dextre. C'est le contraire en rive droite où il n'existe pratiquement pas de fracture associée au décrochement senestre (fig. 21c).

Dans cette hypothèse où le mouvement du décrochement s'inverse, la formation des amygdales observées sur le site de Vinça serait engendrée essentiellement par les systèmes de fractures (D + R) liées au décrochement dextre et senestre (fig. 22).

Par ailleurs, cette hypothèse suppose que la zone de décrochement a toujours fonctionné en compression. Dans ce cas, les fentes d'extension créées par un système sont alors refermées par le système de sens opposé. Par exemple, une fente  $T_2 (s)$  (s = associée à un décrochement N60 senestre) de direction N15 est engendrée par une contrainte principale de compression  $\sigma_1$  de direction N15. Dans le système dextre,  $\sigma_1$  a une direction N105, donc perpendiculaire à  $T_2 (s)$ .

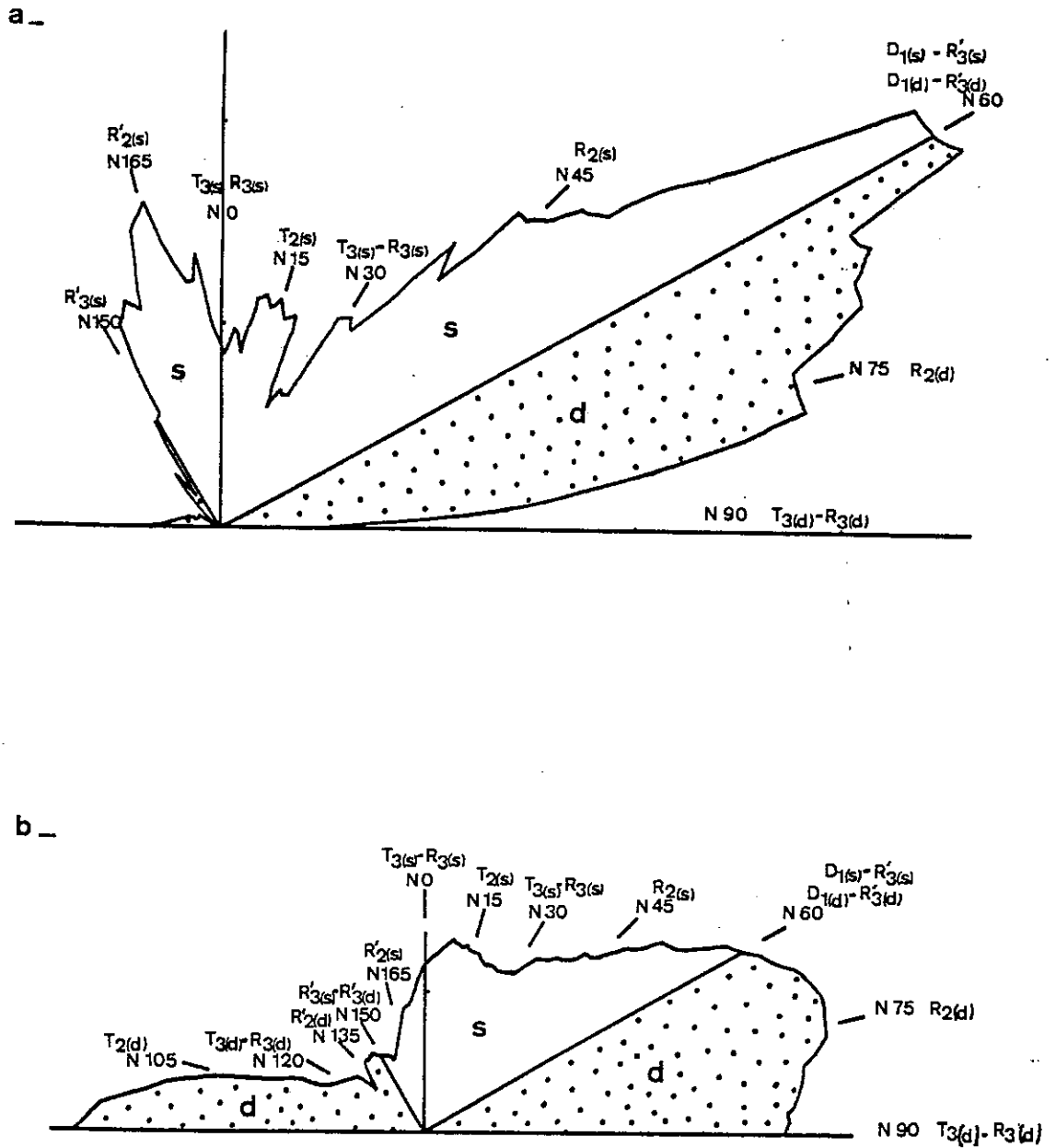


Figure 20 : Roses des directions de la fracturation du site de Vinça :Interprétation  
a - fracturation relevée en surface  
b - fracturation du fond de fouille

(s et d= directions des fractures associées à un décrochement N60  
senestre ou dextre .Cf fig. 19 )

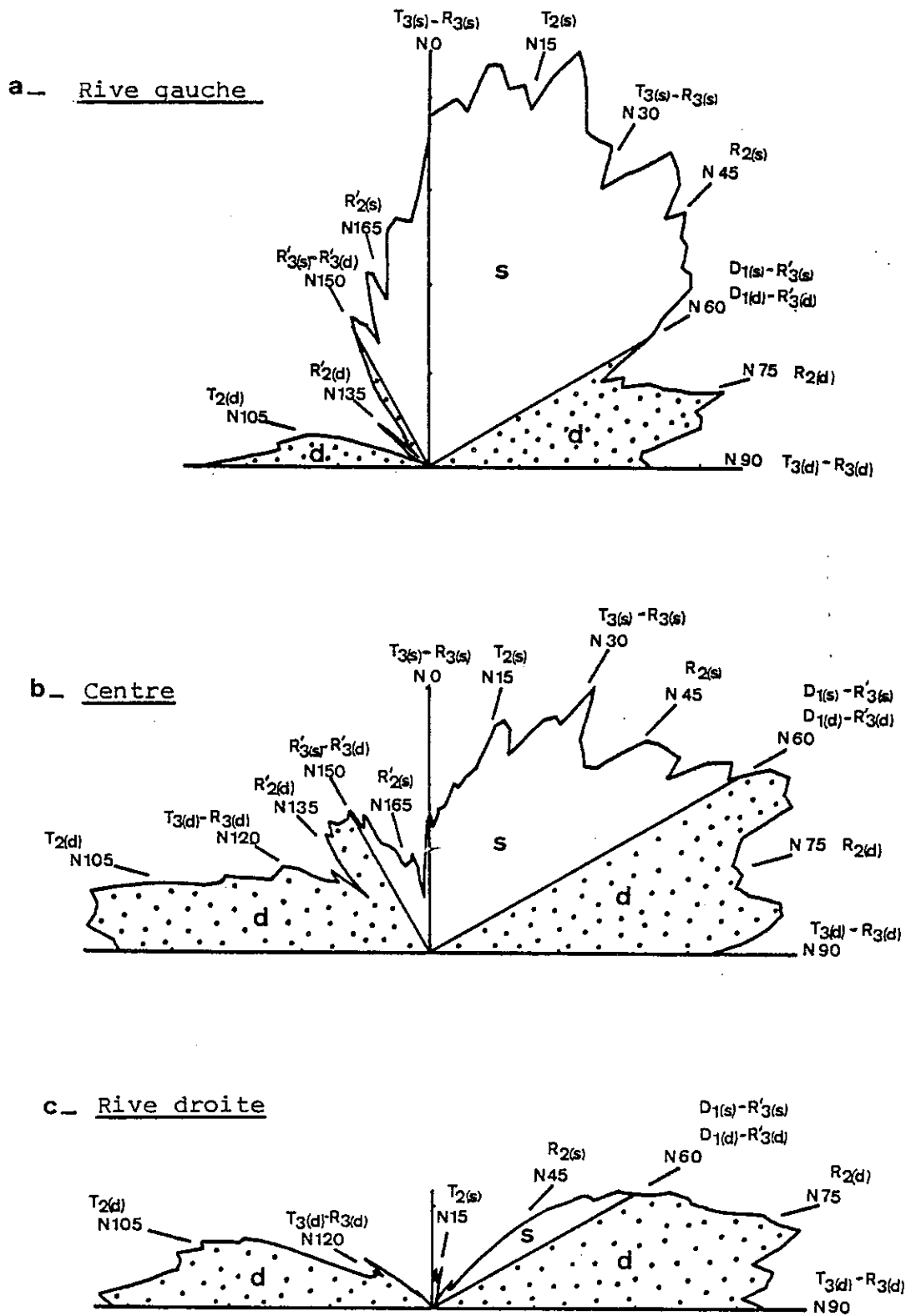


Figure 21 : Roses des directions de la fracturation du fond de fouille :  
Interprétation.

( s et d = directions des fractures associées à un décrochement N60  
senestre ou dextre. Cf fig. 19 )



Il n'est cependant pas possible d'établir une chronologie des événements à partir de la géométrie des fractures associées et d'un simple relevé où de telles indications n'étaient pas recherchées.

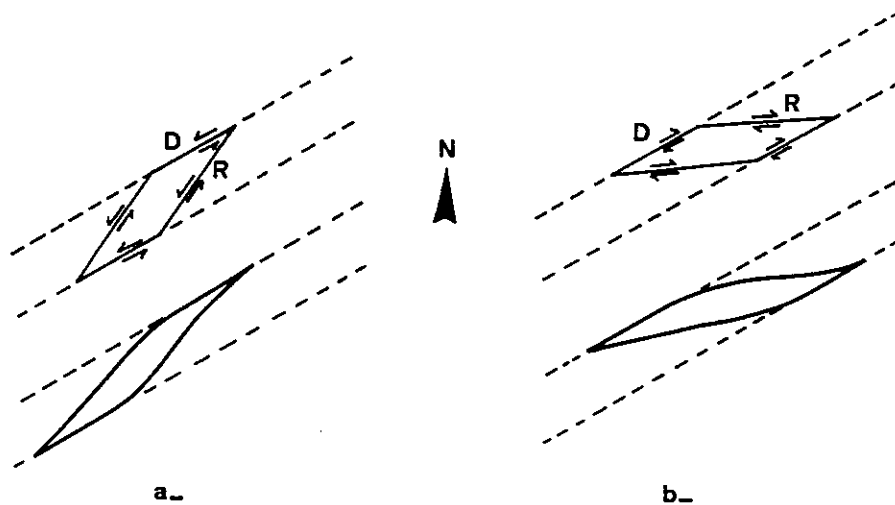


Figure 22 : Formation des amygdales en relation avec le mouvement senestre (a) ou dextre (b) du décrochement N60, à partir des fractures D et R.

### III.2. 3.2. Conséquences géotechniques

La connaissance de la structure du massif d'appui du barrage permet d'expliquer la très faible perméabilité du granite, observée même dans les parties les plus fracturées. Cette faible perméabilité a été constatée lors des essais d'eau réalisés lors de l'exécution des forages primaires du voile d'injection, puis confirmée par les injections de coulis de ciment. Cette quasi-étanchéité, à priori surprenante à cause de la densité élevée de la fracturation peut s'expliquer par le régime de compression affectant cette région. En effet, dans l'interprétation structurale précédente, les blocs rocheux découpés se sont formés sous un régime de compression. Le système est probablement encore sous contraintes (la faille de Catalogne est considérée comme sismique) et c'est sans doute l'état de contrainte auquel est liée la déformation observée qui persiste.

Les structures amygdalaires présentent un grand intérêt sur le plan géotechnique. Elles sont en effet génératrices de perméabilités discontinues mais sans conséquence à grande échelle : la perméabilité peut être très forte au sein d'une amygdale étirée et nulle sur les bords. De ce fait, un massif amygdalaire peut révéler des pertes totales au sein des amygdales, sans risque de circulations lointaines.

Le problème de l'étanchéité est de connaître l'évolution dans le temps des fractures ouvertes de type T dans l'hypothèse de la disparition des contraintes (persistance de l'ouverture ou fermeture ?).

#### III.2.4. Conclusions

Sur le plan de la fracturation du site, l'analyse a donc permis une meilleure compréhension de la genèse des fractures, et l'étude a montré que la connaissance de l'évolution structurale régionale était plus intéressante qu'une simple description, notamment pour la prévision de la perméabilité. Dans l'exemple du barrage de Vinça, l'étude a permis d'expliquer la quasi-étanchéité du massif par la genèse des discontinuités qu'il comporte.

L'analyse d'images de la fracturation a apporté plus de rigueur aux simples observations faites antérieurement. Les différents relevés ne tiennent pas compte des pendages mais cela n'a guère d'importance dans ce cas puisque les failles sont pratiquement verticales en général. Par ailleurs, bien que la carte du fond de fouille n'ait pu être établie qu'une fois les travaux commencés (les options principales du barrage étaient alors déjà prises), les résultats de l'analyse comportent plusieurs points intéressants :

- la carte établie en surface au cours des études préliminaires et celle du fond de fouille montrent les mêmes directions principales avec toutefois des densités très différentes.
- le relevé de la fracturation du fond de fouille prouve l'utilité de ce type d'analyse pour définir précisément les directions des principales familles de fractures et leur importance relative, dans un réseau si complexe et si dense.

- Les deux secteurs opposés du fond de fouille, analysés séparément sont constitués par des familles de fractures différentes.

L'interprétation structurale issue de cette analyse associe la fracturation du massif à un grand accident de direction N60, connu sous le nom de faille de Catalogne. Cette faille est considérée comme étant sismique et elle passe à quelques kilomètres au sud du site. Le mouvement de ce décrochement aurait changé de sens, du moins dans cette région, en admettant qu'il n'y ait pas eu de période d'extension pendant la formation de ces structures.

D'un point de vue plus général, il faut remarquer qu'un terrain avant travaux est beaucoup moins facile à observer qu'un fond de fouille (à l'exception des pays arides) et que de ce fait, la méthode employée ne peut être généralisée au stade des études préliminaires dans tous les cas. Toutefois, on peut résumer les démarches qu'il faut s'efforcer de suivre pour porter une meilleure appréciation sur les caractéristiques globales d'un site :

- relever le plus grand nombre de fractures présentes sur le site
- comprendre le style régional de la déformation et vérifier l'existence de contraintes actuelles (failles sismiques)
- ordonner les fractures selon les familles associées correspondant à des cisaillements bien repérés
- préciser si possible l'existence de fractures correspondant à un autre type de déformation.

CHAPITRE IV

ANALYSE DE LA FORME ET DE L'ORIENTATION CRISTALLOGRAPHIQUE  
DES GRAINS D'UNE ROCHE

APPLICATION AU MARBRE DE CARRARE ET AUX QUARTZITES DE DORA MAIRA

- IV.1. DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE QUANTITATIVE DES STRUCTURES CRISTALLINES
- IV.2. ORIENTATION CRISTALLOGRAPHIQUE DU QUARTZ
- IV.3. STRUCTURE D'UN MARBRE DE CARRARE
- IV.4. ETUDE DE QUELQUES QUARTZITES DU MASSIF DE DORA MAIRA

ANALYSE DE LA FORME ET DE L'ORIENTATION CRISTALLOGRAPHIQUE  
DES GRAINS D'UNE ROCHE

APPLICATION AU MARBRE DE CARRARE ET AUX QUARTZITES DE DORA MAIRA

IV.1 - DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE QUANTITATIVE DES STRUCTURES  
CRISTALLINES

IV.1.1. L'analyse géométrique

Les structures granulaires étudiées ici représentent les matériaux constitués par un empilement plus ou moins compact de grains séparés par des joints de grains. L'analyse géométrique en structurologie, a pour but de déterminer le plus précisément possible la forme des éléments d'une structure pour aboutir à l'établissement d'un modèle et à l'analyse dynamique de la déformation. En général, c'est par des graphiques établis à partir de mesures dans l'état déformé (pour des objets naturels) que les ellipsoïdes et le taux de déformation sont calculés. La construction des différents diagrammes concernant les structures granulaires nécessite des mesures d'angles et de longueurs, sur un nombre de grains assez élevé pour être représentatif de l'ensemble de la structure (Ramsay, 1967). L'établissement de ces diagrammes est long car les mesures sont faites grain par grain.

L'analyse géométrique peut être abordée par des grandeurs morphologiques fournies en des temps très courts par des appareils automatiques comme les analyseurs d'images.

## I VI .2. Grandeurs morphologiques

### I VI .2.1. Taille des grains

Les analyseurs d'images fournissent directement la surface occupée par les grains, donnant ainsi accès à la taille moyenne et aux distributions granulométriques. Ces grandeurs ne concernent que le plan de la section étudiée.

Il est possible d'accéder au volume des grains soit en pratiquant plusieurs coupes parallèles séparées par une distance connue, soit en utilisant des modèles de grains, et en utilisant des relations stéréologiques (De Hoff et al., 1972 ; Underwood, 1970). Le volume moyen des grains peut donc être approché par des méthodes approximatives fondées sur l'hypothèse que les agrégats cristallins sont formés de grains réguliers, polyédriques et de taille égale. Dans le cas des quartzites ou du marbre, il est difficile de comparer la forme des grains à une forme géométrique simple ; on utilisera donc dans les exemples étudiés la surface moyenne des grains mesurée sur différentes sections.

### I VI .2.2. Forme des grains

Contrairement à la taille, la forme n'est pas une notion absolue, mais relative à des formes géométriques de référence. De ce fait, les paramètres peuvent être nombreux. Le Quantimet dispose d'un module de reconnaissance de forme basé sur le rapport  $A/P_e^n$ , A étant la surface du grain et  $P_e$  son périmètre (§I.2.6.2.). D'autres paramètres sont établis à partir des diamètres de Feret (§ I.2.6.1.) et des différentes projections, pour caractériser l'allongement, la rugosité... (Murphy et al., 1977). Les éléments structurants (§ V) fournissent des paramètres morphologiques qui combinent taille et forme.

A part ces caractéristiques géométriques, les structures cristallines peuvent être définies par leur anisotropie.

### I V .1.2.3. Anisotropie structurale

L'anisotropie d'une structure granulaire peut être caractérisée par la rose des directions des joints de grains et par le degré d'orientation.

#### IV.1.2.3.1. Rose des directions

(La définition d'une rose des directions et son mode d'acquisition sont précisés dans le chapitre II). Ici elle représente la direction des joints de grains permettant de mettre en évidence un éventuel allongement des grains et de définir la direction d'allongement.

#### IV.1.2.3.2. Degré d'orientation $\Omega$

Ce coefficient s'applique aux systèmes de lignes orientées dans 2 ou 3 dimensions et aux surfaces dans l'espace (Underwood, 1970). Il est calculé à partir des longueurs d'éléments linéaires dirigés au hasard (isométriques) et d'éléments possédant une orientation. L'expression générale du degré d'orientation est :

$$\Omega = \frac{L_{A or}}{L_{A is} + L_{A or}} \times 100$$

avec  $L_{A is}$  = longueur spécifique de la portion isométrique de lignes -  $mm^{-1}$

$L_{A or}$  = longueur spécifique de la portion orientée -  $mm^{-1}$

Exprimé en pourcentage, il représente une échelle d'anisotropie allant de 0 pour un système de lignes isotrope à 100 pour un système totalement orienté.

Nous ne nous intéressons ici qu'au degré d'orientation de structures orientées dans deux dimensions :

Les systèmes de lignes dans un plan peuvent définir 3 types de structures (fig.23) : les systèmes isométriques, partiellement orientés et totalement orientés. Pour calculer le degré d'orientation d'une structure partiellement orientée, on considère celle-ci comme étant la juxtaposition d'un système isotrope et d'un système orienté (fig. 24). Dans ce cas :

$$L_A = L_{A is} + L_{A or}$$

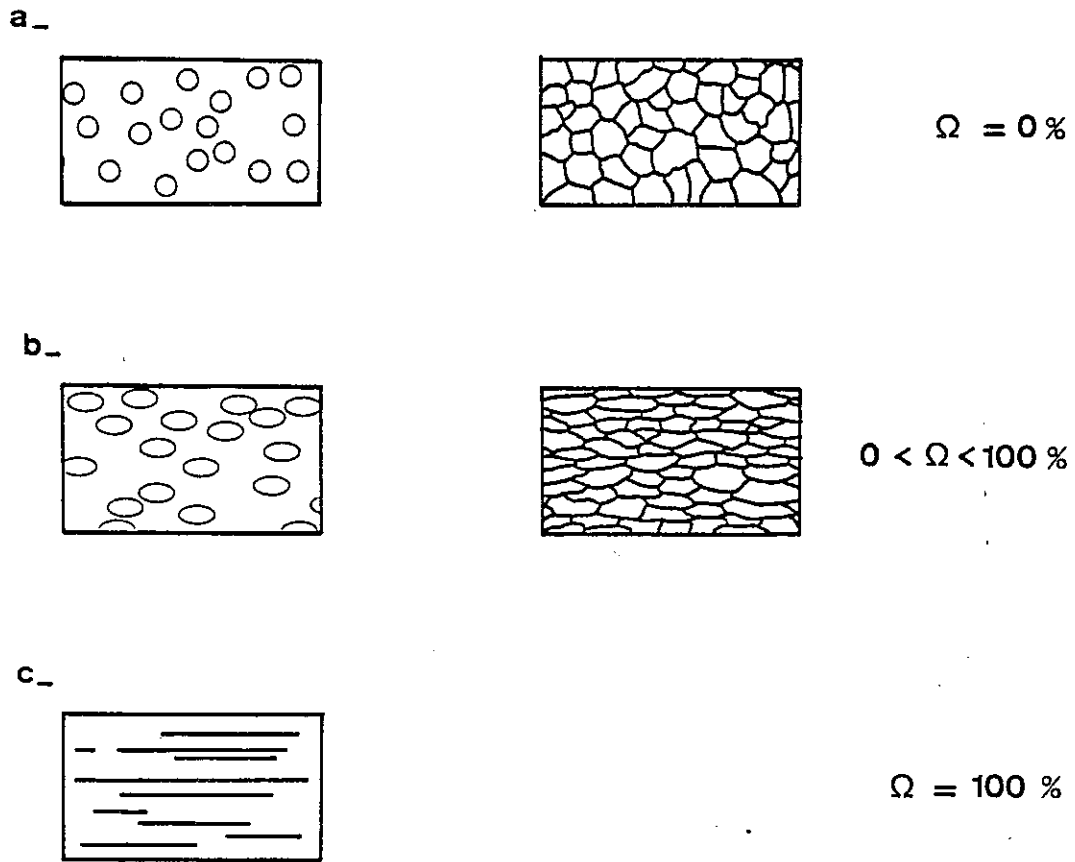


Figure 23 : Systèmes de lignes dans un plan :  
a - système isométrique  
b - système partiellement orienté  
c - système totalement orienté



Pour déterminer les longueurs spécifiques des portions de lignes orientées et isométriques ( $L_{A\text{ or}}$  et  $L_{A\text{ is}}$ ) du système partiellement orienté, qui entrent en jeu dans le calcul de  $\Omega$ , seulement 2 mesures sont nécessaires : on considère une grille formée de lignes expérimentales, superposée à la structure analysée. La grille est positionnée soit parallèlement, soit perpendiculairement à l'axe d'orientation du système et les intersections entre les deux systèmes de lignes sont dénombrées.  $P_{L\perp}$  et  $P_{L\parallel}$  désignent le nombre d'intersections par unité de longueur de ligne expérimentale perpendiculaire ou parallèle à l'axe d'orientation du système étudié.

- Calcul de  $L_{A\text{ is}}$

Si les lignes expérimentales sont parallèles à l'axe d'orientation, elles n'interceptent pas les lignes orientées (fig. 25 a). De ce fait, la valeur de  $P_{L\parallel}$  dépend uniquement des segments de lignes isométriques :

$$L_{A\text{ is}} = \frac{\pi}{2} P_{L\parallel} \text{ mm}^{-1}$$

Cette relation est un cas particulier de  $L_A = \frac{\pi}{2} P_L$ , qui est appelée par Saltikov (1958) la "formule de base de la méthode des sécantes au hasard sur un plan". Cette équation générale peut être établie à partir du problème de l'aiguille de Buffon (De Hoff et al., 1972), qui traite de la probabilité pour une aiguille lancée au hasard de couper une grille plane de lignes parallèles.

- Calcul de  $L_{A\text{ or}}$

Si les lignes expérimentales sont perpendiculaires à l'axe d'orientation de la structure (fig. 25 b), la valeur de  $P_{L\perp}$  dépend à la fois des segments isométriques et des segments orientés. Donc le nombre d'intersections par unité de longueur, dû uniquement aux segments orientés est  $P_{L\perp} - P_{L\parallel} \text{ mm}^{-1}$ .

Remplaçons alors  $L_{A\text{ or}}$  et  $L_{A\text{ is}}$  dans l'expression du degré d'orientation d'un système de lignes dans un plan :

$$\Omega = \frac{L_{A\text{ or}}}{L_{A\text{ is}} + L_{A\text{ or}}} \times 100 = \frac{P_{L\perp} - P_{L\parallel}}{P_{L\perp} + 0,571 P_{L\parallel}} \times 100$$

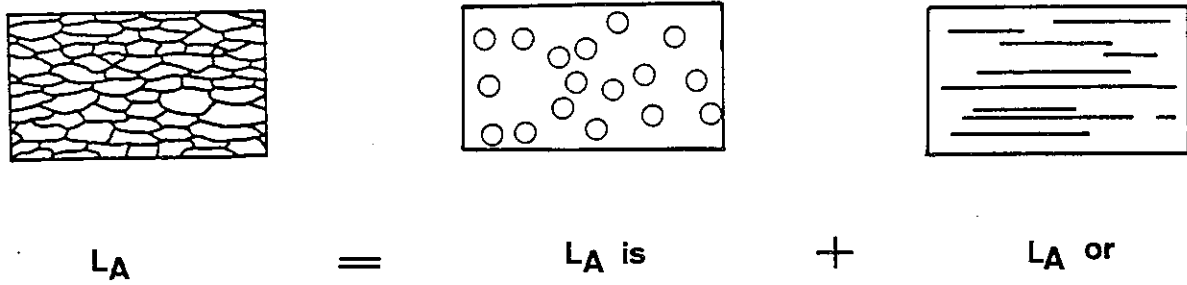


Figure 24 : décomposition d'un système partiellement orienté

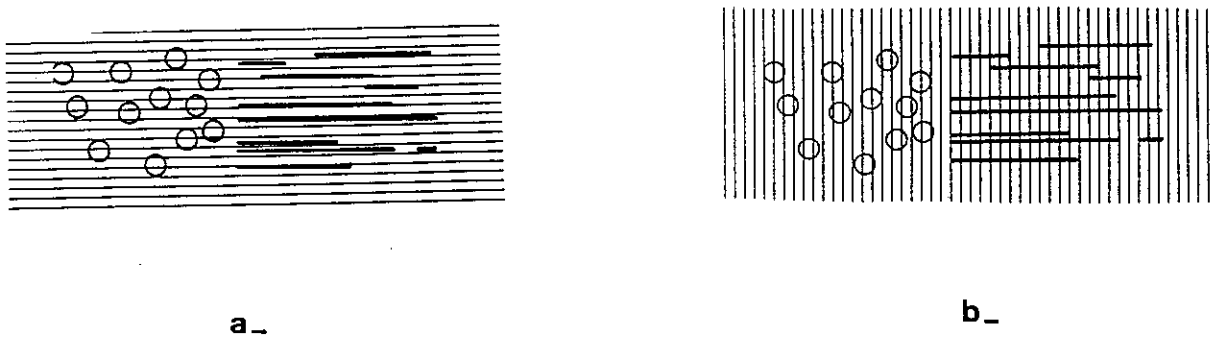


Figure 25 : Superposition d'une grille de lignes expérimentales sur une structure partiellement orientée, parallèlement (a) et perpendiculairement (b) à l'axe d'orientation.

On peut facilement vérifier que  $\Omega$  est nul pour un système isométrique ( $P_{L\perp} = P_{L\parallel}$ ) et  $\Omega$  est égal à 100 pour un système totalement orienté ( $P_{L\parallel} = 0$ ). De plus, il faut noter qu'il est obtenu très rapidement puisqu'il nécessite seulement 2 mesures.

Sur l'écran du Quantimet, les lignes de balayage sont assimilées à des lignes expérimentales jointives et la fonction correspondant à  $P_L$  est la fonction de projection.  $P_{L\perp}$  correspond à la projection horizontale (ou intercept) maximale et  $P_{L\parallel}$  à l'intercept minimal :

$$\begin{aligned}P_{L\perp} &= I_{\max} \\P_{L\parallel} &= I_{\min} \\ \Omega &= \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + 0,571 \cdot I_{\min}} \times 100\end{aligned}$$

## IV. 2. ORIENTATION CRISTALLOGRAPHIQUE DU QUARTZ

### IV.2.1. Introduction

Une roche non déformée ou ayant recristallisé après déformation dans un champ de contraintes non déviateur présente une distribution aléatoire de ses directions cristallographiques. Dans d'autres roches au contraire, certains axes cristallographiques des minéraux ont une orientation privilégiée. On s'intéressera ici uniquement à l'axe c du quartz, aux méthodes de détermination de son orientation et à la signification d'une orientation préférentielle d'axe c dans les quartzites.

### IV.2.2. Cristallographie et propriétés optiques du quartz

Le quartz  $SiO_2$  peut exister sous plusieurs formes suivant le domaine de pression et température dans lequel il se trouve. On ne s'intéresse ici qu'au quartz  $\alpha$  ou quartz de basse température qui est la variété la plus commune dans la croûte terrestre. Il cristallise dans le système rhomboédrique et l'axe c constitue l'axe ternaire, perpendiculaire au plan basal (0001).

Par ailleurs, le quartz est un corps biréfringent, uniaxe positif et l'axe optique est confondu avec l'axe c du cristal. La forme typique est représentée sur la figure 26.

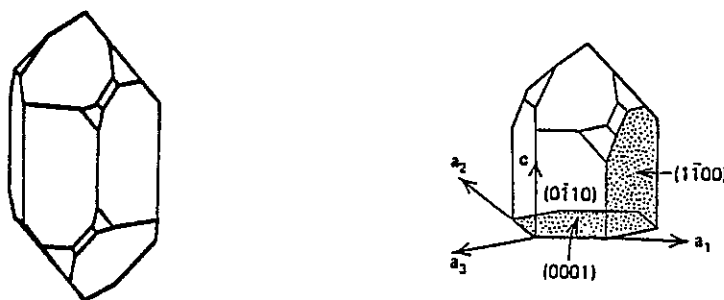


Figure 26 : Cristallographie du quartz  $\alpha$

#### IV. 2. 3. Méthodes courantes de détermination de l'orientation de l'axe c du quartz

##### IV.2. 3. 1. Microscope polarisant usuel

Les lames minces étudiées sont orientées par rapport aux axes structuraux X, Y et Z et le plus souvent ce sont les plans XZ, perpendiculaires à la foliation XY et parallèles à la linéation X de la roche, qui sont analysés. Les axes c sont en général contenus dans ce plan.

La méthode consiste à définir l'orientation de l'axe c (ou de la trace du plan(0001) qui lui est perpendiculaire) de chaque cristal de quartz observé dans la section. Cela revient à mesurer grain par grain l'angle entre  $N_p$  ou  $N'_p$  (trace de 0001) du quartz et la trace du plan de schistosité (trace de XY) en identifiant la direction d'extinction du grain à l'aide d'une lame auxiliaire de gypse (fig. 27) :

La direction de l'indice  $N_g$  de cette lame de gypse est connue et elle est en général à 45 degrés des plans de vibration de l'analyseur et du polariseur. La couleur de chaque grain résultant de l'intercalation de la lame de gypse dans le circuit optique du microscope, dépend directement de l'orientation de l'axe c. Ainsi, lorsque le  $N_g$  du quartz (l'axe c est confondu avec l'indice  $N_g$  et avec l'axe optique) est parallèle au  $N_g$  du gypse, la teinte du grain est bleue (fig.27 b). Le quartz sera au contraire jaune lorsque l'axe c sera perpendiculaire au  $N_g$  du gypse (fig. 27 a).

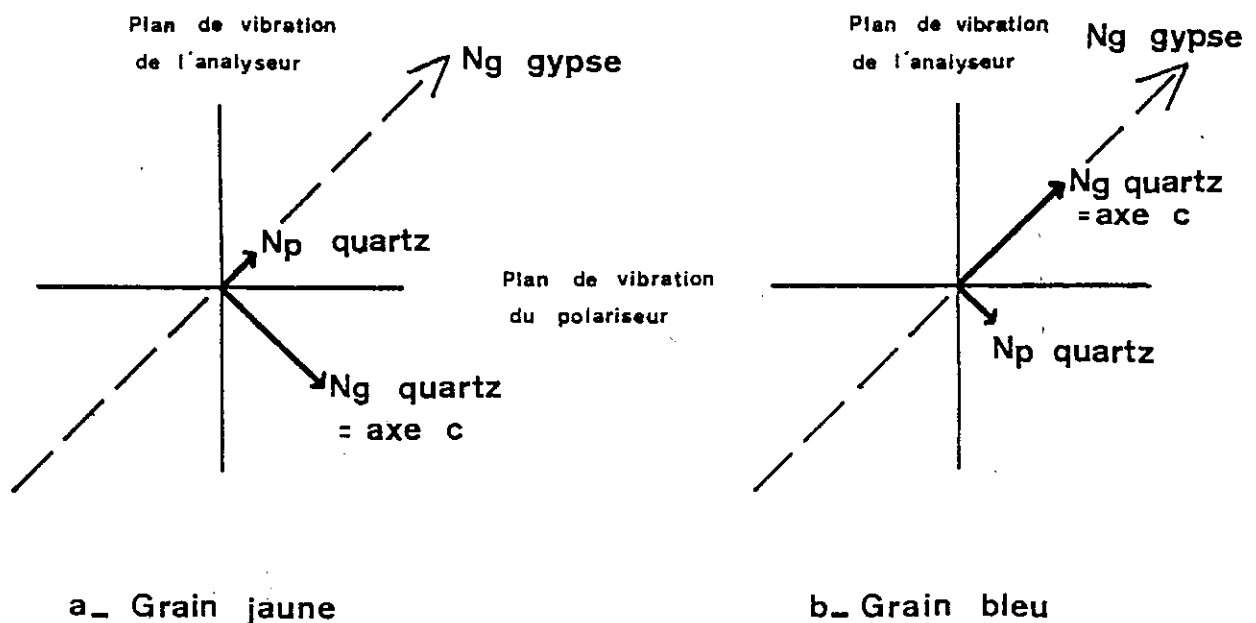


Figure 27 : Détermination optique de l'orientation de l'axe c du quartz

Les orientations sont repérées par rapport aux axes X et Z, et l'on reporte sur un diagramme circulaire soit le nombre d'axes c soit le nombre de plans (0001)(perpendiculaires à l'axe c) ; c'est le cas pour les diagrammes présentés par la suite.

#### IV.2.3 2. Platine universelle

L'emploi de la platine universelle sur microscope optique conduit à la mesure de l'orientation dans l'espace de l'axe optique ou des axes de l'ellipsoïde des indices du quartz. Ces mesures sont ensuite reportées sur

des diagrammes de densité. Cette méthode convient pour des grains de taille supérieure à 30  $\mu$  et elle s'effectue également grain par grain.

#### IV.2.3.3. Goniométrie de texture

Cette technique est fondée sur la mesure de l'orientation des réseaux cristallins des grains de quartz par la diffraction des rayons X. Elle est bien adaptée pour les échantillons à grains fins ( $\approx 10 \mu$ ) et de taille homogène, et pour les roches monominérales. C'est une méthode globale qui permet de définir l'orientation des éléments cristallographiques du quartz, notamment celle de l'axe c.

#### IV.2.3.4. Photométrie

Le principe de cette méthode utilisée par Price (1973, 1980) est basé sur la corrélation directe existant entre l'orientation optique des grains de quartz dans un agrégat et la variation de teinte de polarisation en fonction de l'orientation des plans de polarisation du microscope par rapport aux plans principaux de l'ellipsoïde des indices.

Une source lumineuse monochromatique est utilisée et les variations d'intensité lumineuse sont enregistrées par un photomètre. L'analyse du spectre d'intensité globale est faite sur ordinateur et elle dépend de la décomposition d'un grand nombre de spectres superposés obtenus pour plusieurs plans d'observation d'orientation différente.

#### IV.2.3.5. Cellule photoélectrique

Le principe est identique au précédent mais les orientations ne sont pas définies dans l'espace. Une cellule photoélectrique couplée à un ampèremètre et fixée à la place de l'oculaire du microscope mesure la variation du flux lumineux en lumière polarisée avec ou sans adjonction de lame auxiliaire (Darot, 1973).

#### IV.2.4. Détermination de l'orientation cristallographique du quartz par analyse d'images

##### IV.2.4.1. Principe

Le principe est celui de la détermination optique au microscope

polarisant (§IV.2.3.1.) mais alors que dans la première méthode on compte le nombre d'axes c observés dans toutes les directions par une mesure d'angle effectuée sur chaque grain, ici on enregistre la surface occupée par les grains jaunes dans le champ du microscope pour chaque position de la lame mince par rapport aux plans du polariseur et de l'analyseur. Les grains jaunes correspondent à une orientation bien précise de l'axe c (fig. 27 a). Ici aussi les orientations sont repérées par rapport à X et à Z, et les diagrammes en rosace représentent la répartition angulaire de la trace des plans (0001) par rapport à la trace de la schistosité XY. Ces diagrammes sont ici des distributions en surface mais ils ont la même signification que les distributions en nombre fournies par la méthode usuelle. Une comparaison a été effectuée entre les diagrammes obtenus par ces deux méthodes et pour des échantillons différents (fig. 28)

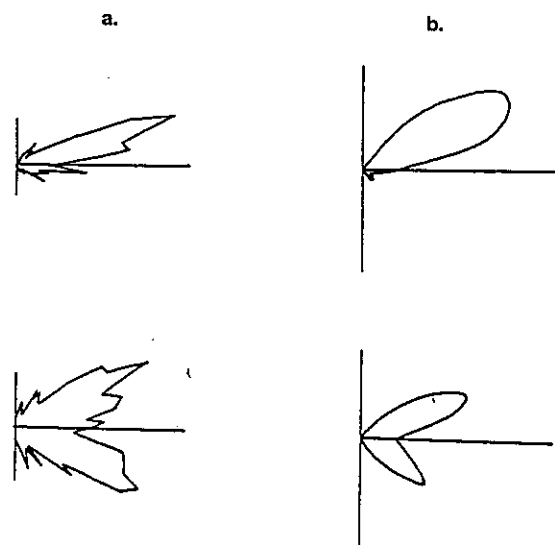


Figure 28 : Diagrammes d'orientation des plans (0001) du quartz de deux échantillons différents obtenus par :  
a - la méthode usuelle (nombre de grains)  
b - analyse d'images (surface des grains).

Bien qu'elle ne s'applique qu'à l'orientation des axes optiques, cette méthode a l'avantage d'être rapide (15 minutes environ pour un champ d'analyse) et donc de pouvoir être employée pour des études systématiques.

Il faut préciser également que cette méthode étant basée sur la mesure de la surface des grains, il est préférable de l'utiliser sur des roches formées de grains de taille voisine.

#### I V.2.4.2. Conditions d'analyse

L'image est donc une lame mince ordinaire de 25  $\mu$  d'épaisseur et une première précaution à prendre concerne l'homogénéité de l'épaisseur de toute la section, une variation de quelques microns seulement pouvant entraîner un changement de teinte.

En général, on choisit un grossissement faible pour le microscope et la caméra pour obtenir une plus grande surface d'analyse. De plus, si le champ d'analyse ne contient pas un nombre suffisant de grains, plusieurs zones de la lame sont étudiées successivement et les surfaces déterminées sont cumulées pour chaque orientation.

Un masque de mesure de forme circulaire est tracé sur l'écran à l'aide du crayon électronique (§ I.2.3.) pour prendre en compte toujours les mêmes grains lors de la rotation de la platine.

Un pas de rotation de la platine de 5 degrés est utilisé, la valeur de la surface des grains jaunes est enregistrée pour chaque position de l'échantillon.

Des filtres sont employés pour sélectionner les grains jaunes. Les meilleurs résultats ont été obtenus en éliminant les grains bleus et rouges en intercalant des filtres verts et rouges.

Le seuil de détection est choisi de telle façon que les grains ne soient détectés que lorsqu'ils présentent un jaune net.

#### I V.2.5. Interprétation de l'orientation préférentielle de l'axe c du quartz

##### I V.2.5.1. Mécanisme du développement de l'orientation préférentielle

Il existe deux mécanismes par lesquels une orientation préférentielle peut se développer dans une roche mais ils apparaissent sous des conditions de température et de pression différentes. Ainsi, quand les phénomènes de recristallisation n'ont pas lieu, l'acquisition d'une direction cristallographique privilégiée résulte d'une déformation intracristalline qui induit une réorientation de chaque grain dans la roche.



#### I V.2.5.1.1. Glissement intracristallin

Le principal mécanisme physique à l'échelle du réseau atomique du cristal, responsable de la déformation plastique des minéraux et des roches ainsi que des métaux est la propagation de dislocations, par glissement de rangées d'atomes à l'intérieur du cristal. Il s'agit d'un glissement de translation qui a lieu sur des plans atomiques de grande densité et qui est propagé par le mouvement de défauts cristallins linéaires appelés dislocations (Nicolas et al., 1976 ; Poirier, 1976 ; Hobbs et al., 1976). Dans le quartz, le plan de glissement le plus actif est bien souvent le plan basal(0001).

#### I V.2.5.1.2. Réorientation du cristal

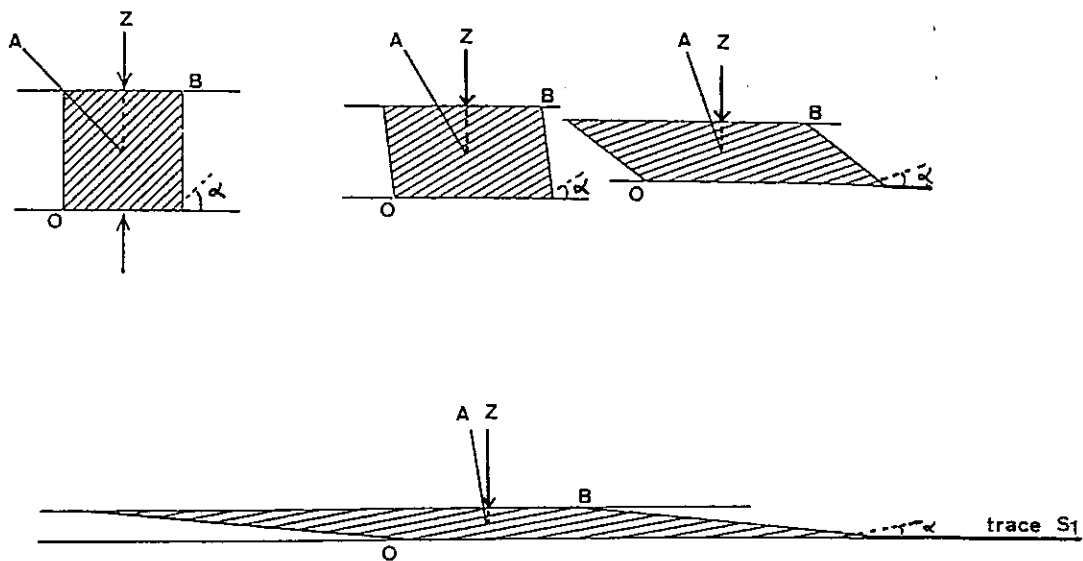
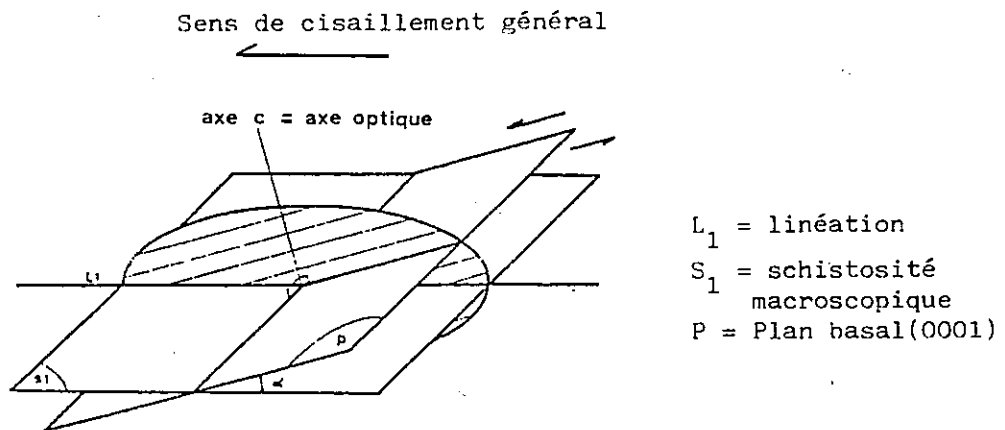


Figure 29 : Développement d'une orientation préférentielle par glissement intracristallin (Hobbs et al., 1976)

Un système de glissement intracristallin se manifeste par un cisaillement progressif du grain et à l'intérieur du cristal se produit une rotation. Les plans de glissement cristallographiques (plans (0001) du quartz), parallèles à OB sur la figure 29 tournent progressivement par

rapport à la direction Z de plus grand aplatissement. L'axe optique du quartz (noté A) tend à s'orienter parallèlement à Z, sans arriver cependant à être confondu avec Z. L'angle  $\alpha$  entre la trace de la schistosité et la trace des plans (0001) diminue également.

Il y a donc une réorientation des plans de glissement de chaque cristal par rapport au système de contrainte. La figure 30 montre la rotation d'un grain de quartz dans le cas d'un cisaillement simple.



L'ellipse schématise la section XZ de l'ellipsoïde de déformation finie du grain de quartz. Cette section sera généralement celle des lames minces étudiées dans les exemples suivants.

Quand la déformation augmente,  $\alpha$  diminue (comme l'angle  $\widehat{AZ}$  de la figure 29).

Figure 30 : Orientation d'un grain de quartz dans le cas d'une déformation par cisaillement simple. (Laurent et al., 1976)

#### I V. 2.5.2. Conditions physiques

Les travaux accomplis en déformation expérimentale sur le quartz (Tullin et al., 1973) et sur des matériaux naturellement déformés ont montré que le système de glissement basal s'effectue à des températures supérieures à 300 °C, au dessous de 700 °C à une vitesse de déformation  $\dot{\epsilon}$  égale à  $10^{-1-1}$  s<sup>-1</sup>, ou pour tout couple (T,  $\dot{\epsilon}$ ) équivalent. A plus haute température ou pour une vitesse plus faible, il est accompagné voire relayé par un autre système de glissement et les phénomènes de diffusion peuvent apparaître.

#### IV. 2.5. 3. Régime de la déformation

La distribution des plans de glissement (plans (0001)) par rapport aux axes structuraux X, Y et Z est le reflet du régime rotationnel (cisaillement simple) ou irrotationnel (cisaillement pur) de la déformation, et dans ce dernier cas son sens peut être défini.

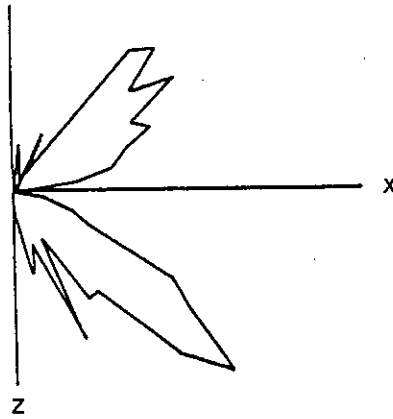
Les figures 31 et 32 illustrent la différence entre les diagrammes d'orientation des plans (0001) du quartz, dans le cas d'un cisaillement pur (fig. 31) et d'un cisaillement simple (fig. 32) :

Dans un cisaillement pur, les plans (0001) se disposent symétriquement par rapport au plan de la schistosité XY alors qu'un cisaillement simple se caractérise par une direction prédominante des plans de glissement, faisant un certain angle avec le plan de schistosité. De plus, c'est cette obliquité qui détermine le sens du cisaillement général (fig. 32 et 30).

Ces critères sont appuyés sur des travaux théoriques (Lister et al., 1979 et 1980) et expérimentaux (Etchecopar, 1974). Ils sont d'autre part confirmés par des études faites dans des régions où le régime de la déformation est connu comme l'Himalaya au niveau du Népal (Bouchez, 1977; Bouchez et al., 1976), le Massif Armoricaïn (Berthé et al., 1979), ou encore à une autre échelle dans une zone de cisaillement présentant des microplis (Carreras, 1977).

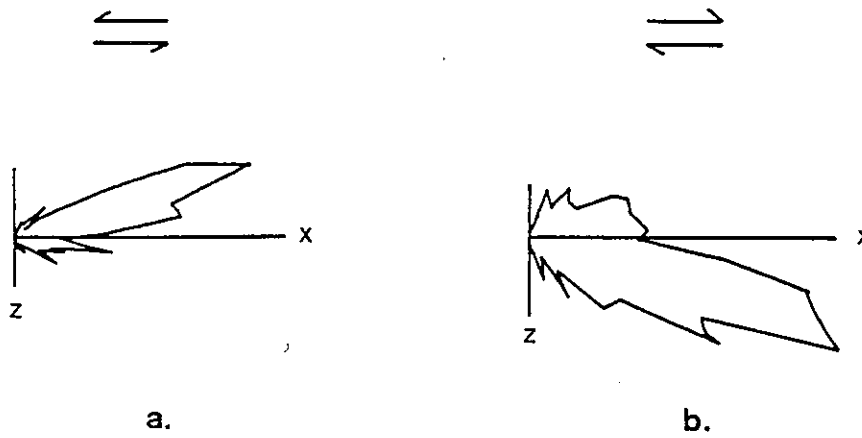
#### IV. 2.5. 4. Quantité de déformation

Les diagrammes d'orientation des plans basaux du quartz reflètent de manière qualitative la quantité de déformation. En effet, plus la déformation est importante, plus l'orientation préférentielle des plans de glissement est prononcée : lors d'un cisaillement simple croissant, il se développe d'abord deux orientations des plans (0001) symétriques par rapport à la direction d'extension de l'ensemble mais par la suite l'une des orientations devient nettement prédominante et elle se rapproche de plus en plus de la direction du cisaillement sans toutefois arriver à lui être parallèle (fig. 29) (Bouchez, 1977).



(Le plan de schistosité XY est perpendiculaire au plan de la feuille et parallèle à X.)

Figure 31 : Distribution de la trace des plans (0001) du quartz, en section XZ d'un quartzite déformé par cisaillement pur.



(Le plan de schistosité XY est perpendiculaire au plan de la feuille et parallèle à X.)

Figure 32 : Distribution de la trace des plans (0001) du quartz en section XZ d'un quartzite déformé par cisaillement simple senestre (a) et dextre (b).

## I V. 3 - STRUCTURE D'UN MARBRE DE CARRARE

### I V. 3.1 . Présentation du problème

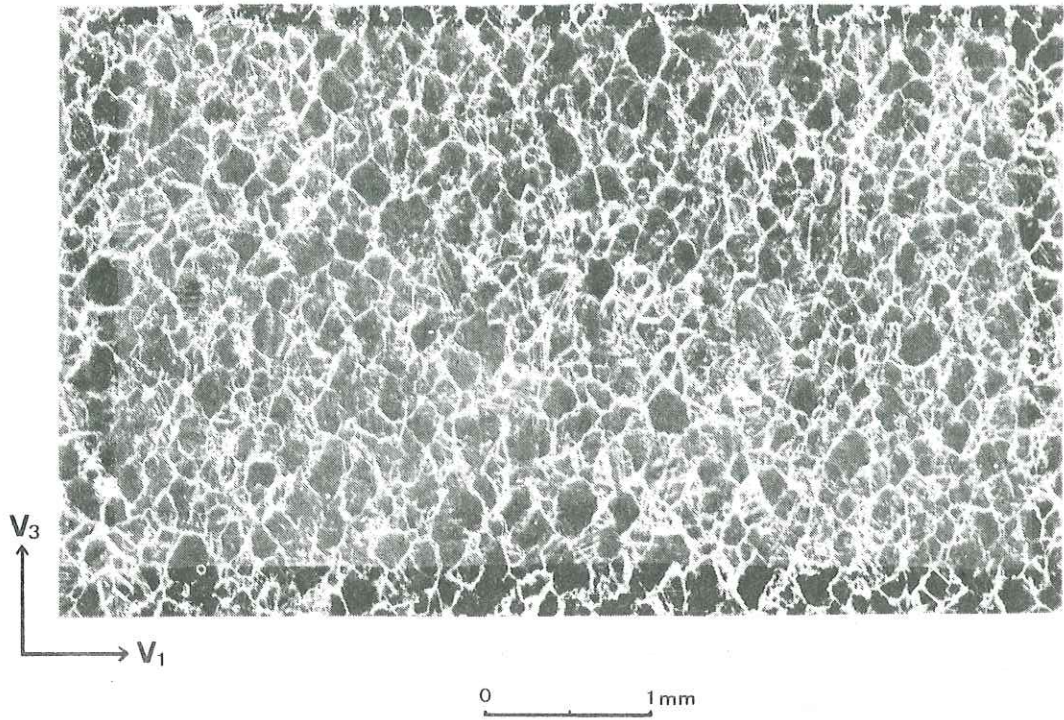
Ce travail a été mené avec Z. Guessous (1981) pour compléter son étude sur le comportement mécanique des roches fissurées et plus précisément pour étudier les phénomènes de dilatation thermique d'un marbre de Carrare. L'expérience consiste à porter un échantillon de ce marbre à une température de 100 à 500 °C. La dilatation est mesurée, et l'on constate que la déformation n'est pas isotrope. (C'est la déformation résiduelle c'est-à-dire subsistant après refroidissement, qui est prise en compte). Le matériau présente une orthotropie ; les axes principaux du tenseur de déformation sont  $V_1$ ,  $V_2$  et  $V_3$ ,  $V_1$  étant la direction principale majeure et  $V_3$  la direction principale mineure.

Pour interpréter cette anisotropie de dilatation, des lames minces ont été taillées dans les trois plans de symétrie de l'orthotropie de déformation thermique ( $V_1 V_2$ ), ( $V_2 V_3$ ) et ( $V_1 V_3$ ) d'un échantillon non chauffé. La question à résoudre est de savoir si le phénomène observé est dû aux propriétés des cristaux de calcite ou à une organisation particulière des grains du marbre.

On sait qu'un cristal de calcite se dilate de manière anisotrope, avec une dilatation maximale suivant l'axe ternaire  $\lambda_3$  du cristal (la calcite cristallise dans le système rhomboédrique). Pour expliquer l'anisotropie de dilatation d'un ensemble de cristaux, on pourrait supposer qu'il existe une orientation privilégiée des axes  $\lambda_3$  dans l'échantillon, parallèle à la direction principale majeure  $V_1$ . Dans ce cas, les deux directions de joints de grains observées sur les lames minces ( $V_1 V_3$ ) (fig. 33 a) délimiteraient-elles les faces losangiques des rhomboèdres ? Si les axes  $\lambda_3$  étaient dirigés suivant une direction privilégiée, la dilatation de tous les cristaux suivant la même direction entraînerait la formation de fissures intergranulaires parallèles à l'axe  $\lambda_3$  et la déformation résiduelle serait plus grande perpendiculairement à  $\lambda_3$ . (On aurait  $V_1 \perp \lambda_3$ ).

Mais le goniomètre de texture ne décèle aucune orientation privilégiée des axes ternaires des cristaux de calcite dans l'échantillon. D'autre part, les premières analyses microscopiques ont montré que la roche ne présentait pas la

a.  
Plan  $V_1V_3$



b.  
Plan  $V_1V_2$

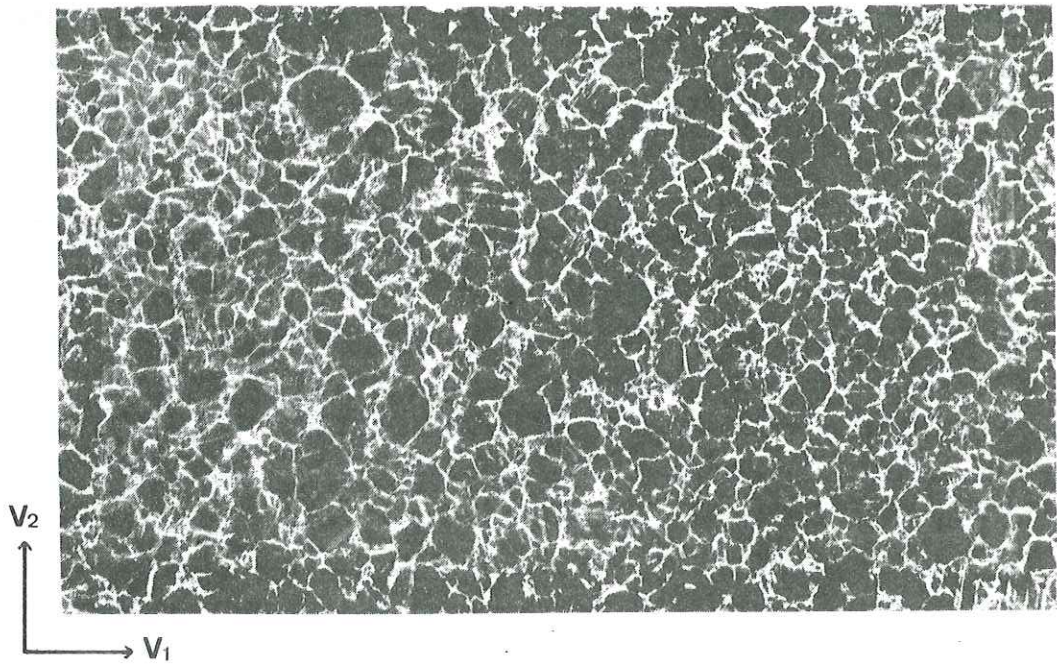


Figure 33 : Marbre de Carrare : exemples de photographies analysées directement au Quantimet  
a- Plan ( $V_1V_3$ )  
b- Plan ( $V_1V_2$ )

même structure suivant tous les plans de coupe. Cette anisotropie de forme n'étant pas très prononcée, des images de la structure du marbre ont été analysées au Quantimet pour déterminer plus précisément les directions des joints de grains. (Ce sont les limites des grains qui définissent la forme).

#### I V. 3.2. Images analysées

Ce sont d'une part des photographies d'autre part des dessins. Ces deux types d'images sont issus de lames minces taillées dans les trois plans orthogonaux ( $V_1 V_2$ ), ( $V_1 V_3$ ) et ( $V_2 V_3$ ), d'un échantillon de marbre non chauffé.

##### I V. 3.2.1. Photographies

Il a été nécessaire d'utiliser une technique particulière pour obtenir un document de bonne qualité : la lame mince prend la place du négatif dans un agrandisseur et la photographie est directement développée sur un papier dur qui augmente les contrastes. Des essais ont été réalisés pour différentes épaisseurs de la lame : une lame mince normale ( $25 \mu$ ) est trop fine et elle montre un contraste très faible entre les grains et les joints ; de plus, les clivages apparaissent trop nettement sur la photographie. Nous avons donc utilisé des lames plus épaisses, de l'ordre de  $50 \mu$  (fig. 33).

##### I V. 3.2.2. Dessins

Des dessins représentant les limites des grains ont été analysés pour vérifier et éventuellement compléter les résultats acquis à partir des photographies. Ces relevés manuels sont possibles en intercalant une chambre à dessin dans le circuit optique du microscope. Pour obtenir une image représentative de la structure de l'échantillon (directions des joints et taille moyenne des grains), 300 grains environ ont été dessinés pour chaque lame mince (fig. 34).

#### I V. 3.3. Résultats de l'analyse des images

##### I V. 3.3.1. Roses des directions des joints de grains

Ici, le pas angulaire de rotation de l'image est de 5 degrés.



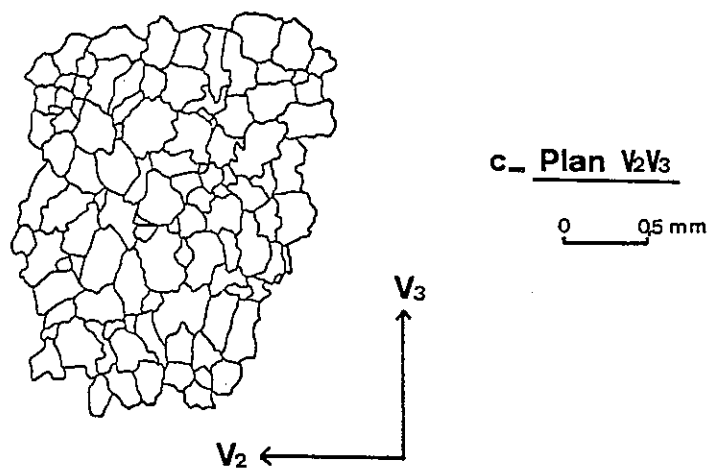
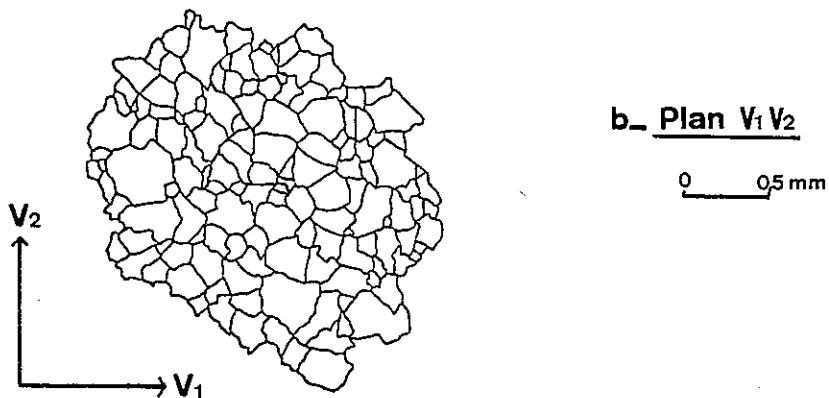
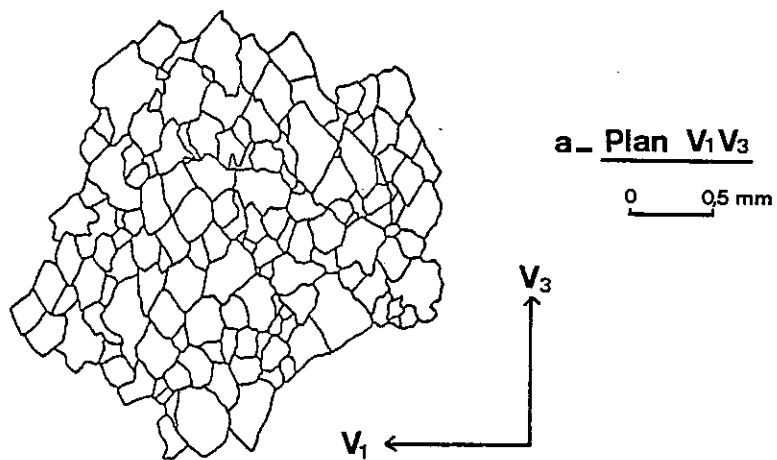


Figure 34 : Marbre de Carrare : exemples de dessins de joints de grains  
a - Plan ( $V_1V_3$ )  
b - Plan ( $V_1V_2$ )  
c - Plan ( $V_2V_3$ )



Sur chaque dessin figurent environ 300 grains alors que sur chaque photographie, 3 ou 4 champs circulaires de 7 cm de diamètre ont été analysés, ce qui représente un total de 900 à 1200 grains, en tenant compte de la taille moyenne calculée plus loin (§ IV. 3. 3. 3.). Notons que le nombre de grains pris en compte n'est pas le même dans chaque plan et que les rosaces ne sont pas représentées à la même échelle ; il faut en tenir compte pour les comparaisons.

Les roses obtenues (fig. 35 et 36) indiquent clairement dans les 3 plans que la forme des grains est plus ou moins anisotrope. Pour mettre en évidence les orientations principales des joints de grains qui reflètent la direction d'allongement des grains, la rose globale est décomposée en 2 roses : la première (le demi-cercle), correspond à une distribution isotrope des orientations des limites de grains, l'autre est obtenue en retranchant la partie isotrope à la rose globale.

Les directions prédominantes sont notées sur les figures 35 et 36. Notons également que la partie isotrope du plan ( $V_1$  -  $V_3$ ) est assez faible, ce qui révèle un allongement plus important des grains dans ce plan. Ceci est confirmé par le calcul du degré d'orientation de la structure.

#### IV 3. 3. 2. Degré d'orientation

Les résultats tirés de l'analyse des dessins montrent que le plan ( $V_1$  -  $V_3$ ) représente une structure beaucoup plus orientée que les deux autres plans :

$$\text{Plan}(V_1 - V_3) : \Omega = 19 \%$$

$$\text{Plan}(V_2 - V_3) : \Omega = 10,5 \%$$

$$\text{Plan}(V_1 - V_2) : \Omega = 6,9 \%$$

#### IV 3. 3. 3. Taille moyenne des grains

Elle est obtenue par le rapport de la surface totale occupée par les grains et le nombre de grains, ceux-ci étant de dimension homogène sur toute la lame mince. La surface est mesurée directement par l'analyseur à partir des dessins.

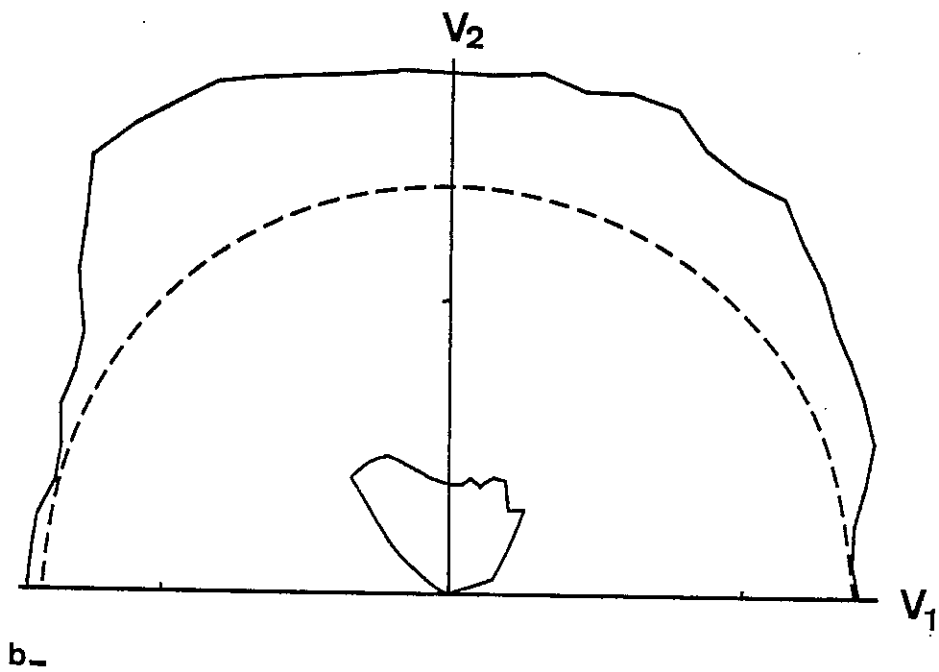
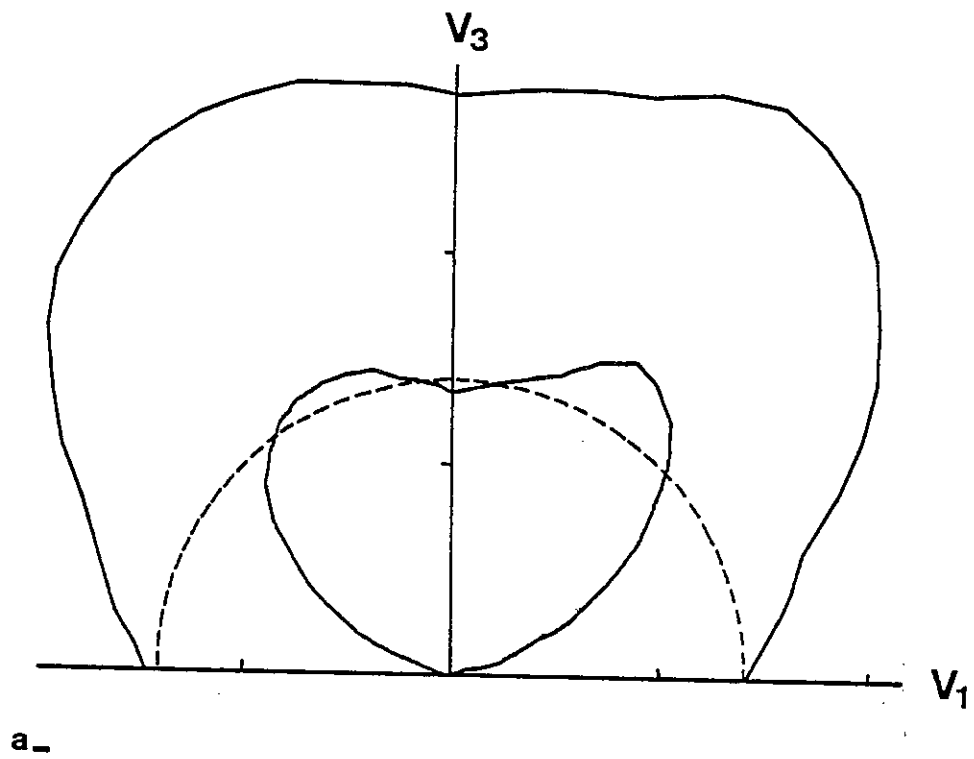


Figure 35 : Roses des directions obtenues à partir des photographies  
a - Plan  $(V_1V_3)$   
b - Plan  $(V_1V_2)$

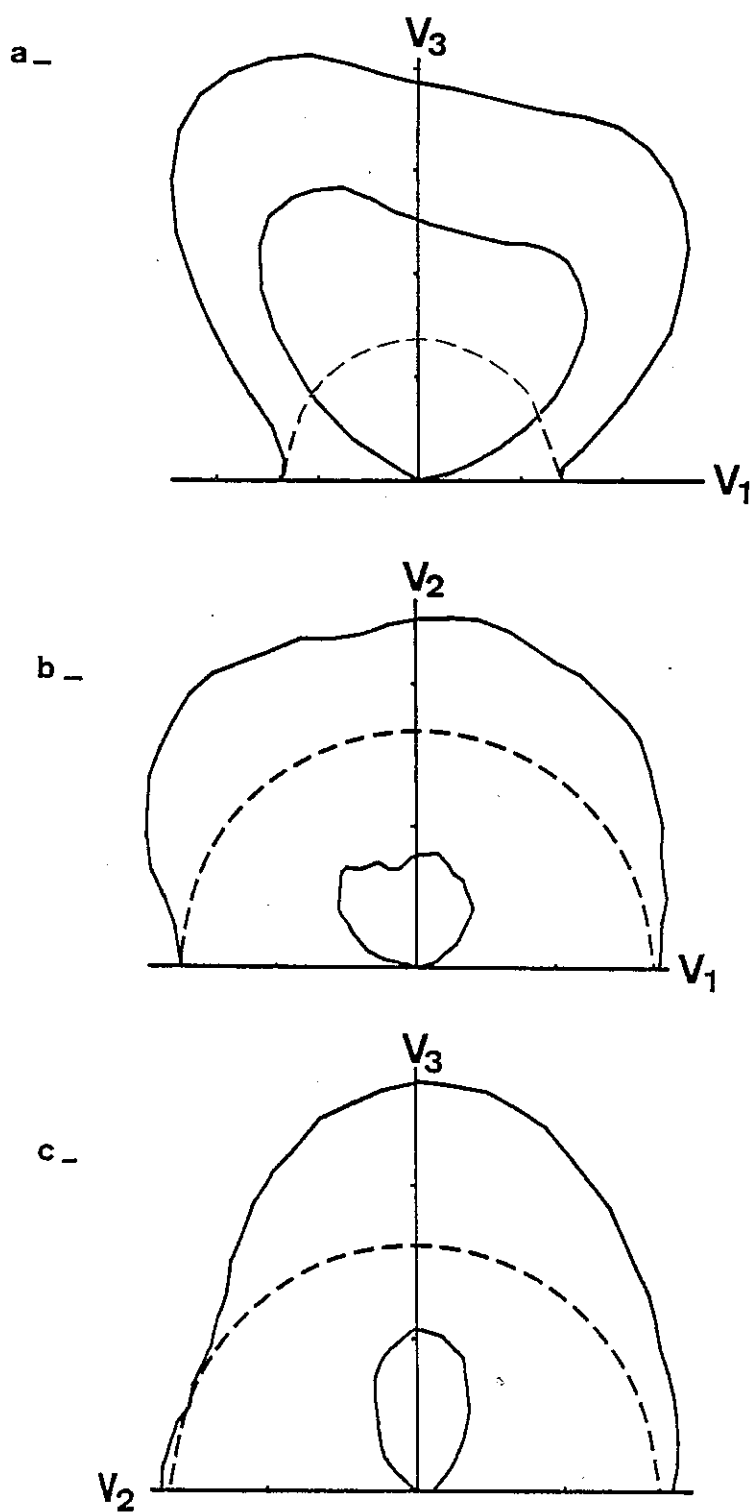


Figure 36 : Roses des directions obtenues à partir des dessins  
a - Plan ( $V_1V_3$ )  
b - Plan ( $V_1V_2$ )  
c - Plan ( $V_2V_3$ )

Taille moyenne ( $T_m$ ), en mm , des grains observés dans les différents plans :

Plan( $V_1$   $V_3$ ):  $T_m = 0,025$  mm

Plan( $V_2$   $V_3$ ):  $T_m = 0,026$  mm

Plan( $V_1$   $V_2$ ) :  $T_m = 0,018$  mm

Les grains sont de taille équivalente dans les plans( $V_1$   $V_3$ )et( $V_2$   $V_3$ ), mais beaucoup plus petits dans le plan( $V_1$   $V_2$ ).

Les résultats concernant les directions principales, le degré d'orientation et la taille moyenne seront utiles par la suite pour représenter la structure dans ses trois dimensions.

#### IV. 3.4. Interprétation

##### IV 3.4.1 . Définition de la structure du marbre

Le marbre présente donc une structure légèrement anisotrope et pour visualiser la géométrie des grains en trois directions, nous avons essayé de faire correspondre les directions de joints observées dans les 3 plans orthogonaux (fig. 37) . Pour simplifier le schéma, les joints de grains sont assimilés à des plans et les intervalles entre les plans d'une même famille sont supposés constants. Ainsi, en tenant compte des directions principales déterminées par les rosaces et de leur intensité relative, nous obtenons 5 familles de plans plus ou moins fréquentes. La taille moyenne des grains délimités par les joints est prise en considération ainsi que leur degré d'orientation.

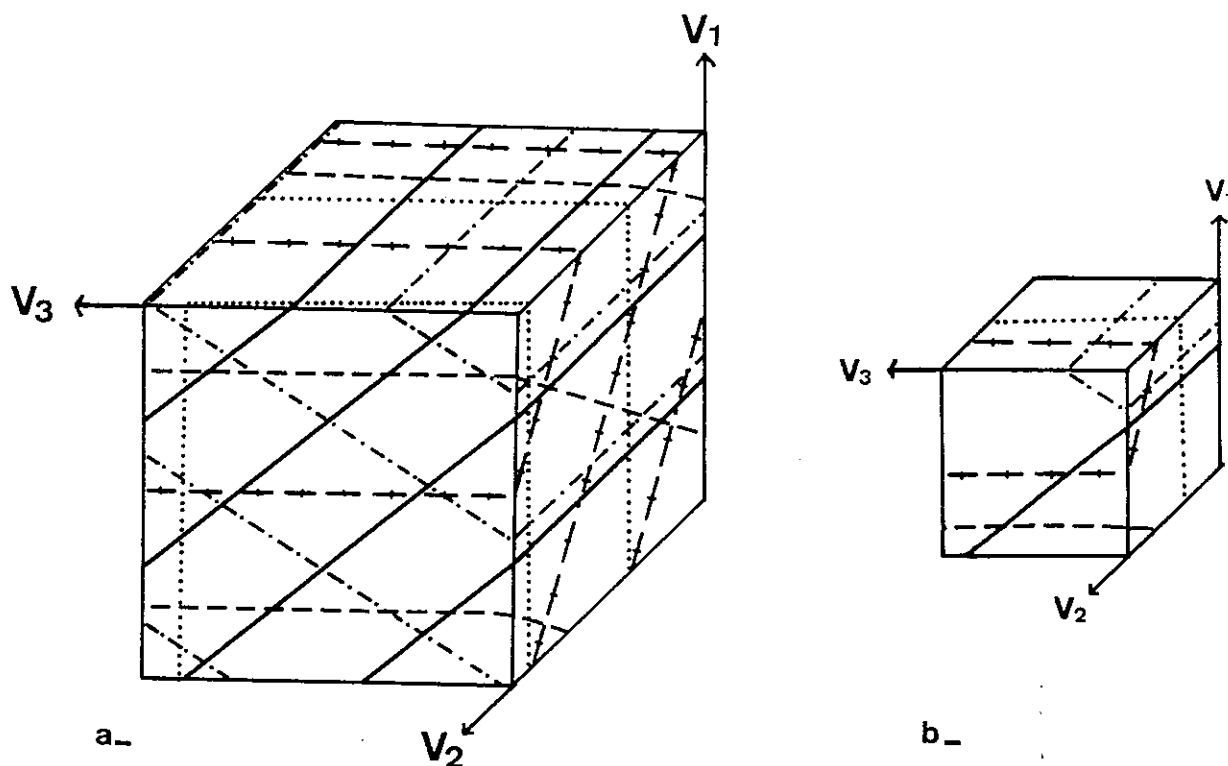


Figure 37 : Structure du marbre représentée par les plans de joints de grains  
a - Schéma d'ensemble  
b - Orientation d'un plan de chaque famille.

Le marbre possède donc des directions privilégiées des plans de joints de grains mais il ne présente pas d'orientation cristallographique préférentielle. Ces deux caractéristiques ne sont pas incompatibles si l'on envisage une transformation de la morphologie des grains après la cristallisation du matériau dans lequel la disposition des cristaux est aléatoire. Le marbre est le résultat de la recristallisation d'un calcaire, provoquée par le changement des conditions de pression et de température. Les contraintes associées au métamorphisme peuvent entraîner une dissolution des parties de la calcite selon la direction de pression maximale (fig. 38). La dissolution (accompagnée ou non de recristallisation) donne aux grains une forme allongée perpendiculairement à la direction de contrainte principale de compression  $\sigma_1$ , quelle que soit l'orientation cristallographique des cristaux.

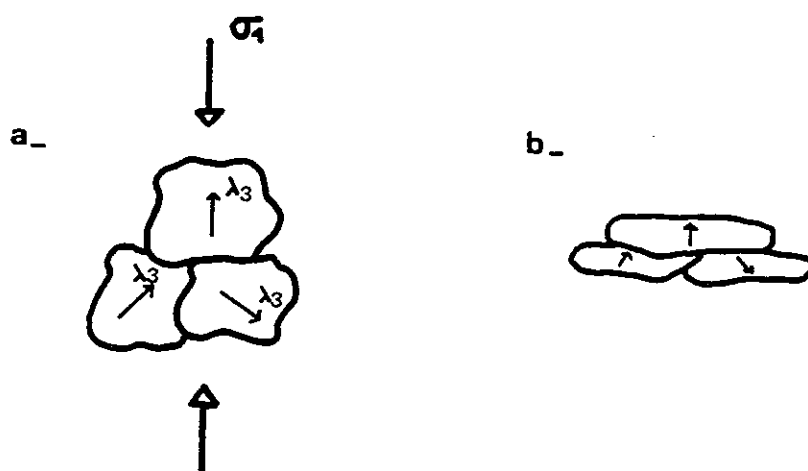


Figure 38 : Forme des cristaux de calcite  
a - avant dissolution  
b - après dissolution

Ainsi, la forme des grains est déduite de leurs limites et ces joints de grains dont la disposition dans l'espace est représentée sur la figure 37 sont des plans de dissolution. Cette dissolution est confirmée par l'aspect engrené des joints de grains, observé sur les lames minces.

Malgré l'absence de direction cristallographique privilégiée, la roche présente des orientations préférentielles des plans de discontinuités (joints de grains) qui correspondent à une orientation préférentielle de forme des grains.

#### I V. 3.4.2. Cause de l'anisotropie de dilatation

L'hypothèse de l'existence d'une direction cristallographique privilégiée dans le marbre étant écartée après les résultats du goniomètre de texture, l'interprétation de l'anisotropie de dilatation est basée sur l'existence d'une anisotropie de forme des grains dans la matière rocheuse (Z. Guessous, 1981) :

Imaginons d'abord le cas d'une roche constituée de grains de calcite ne présentant ni allongement, ni orientation cristallographique préférentielle (fig. 39). L'augmentation de la température produit une dilatation de chaque

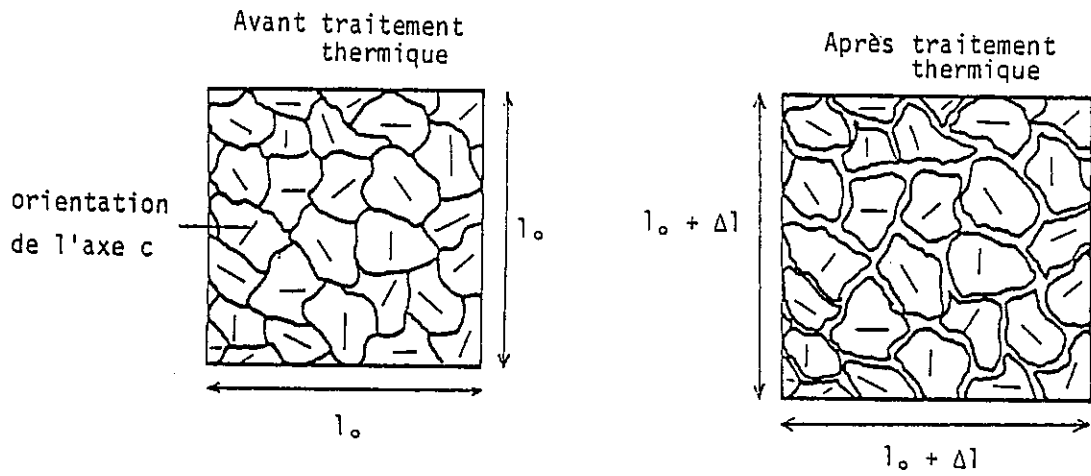


Figure 39 : Effets du traitement thermique sur la structure d'un marbre présentant un allongement aléatoire des grains et une orientation cristallographique aléatoire (Guessous, 1981).

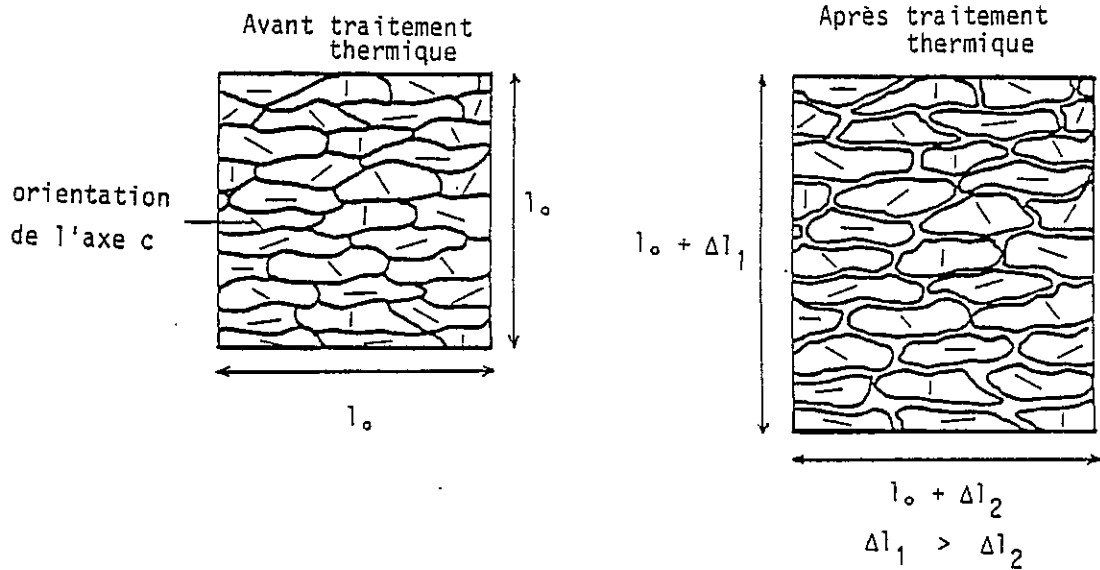


Figure 40 : Effets du traitement thermique sur la structure d'un marbre présentant un allongement des grains dans une direction et une orientation cristallographique aléatoire (Guessous, 1981).

grain, entraînant une fissuration intergranulaire et, bien que la dilatation thermique des cristaux de calcite soit anisotrope, les dilatations globales de la roche et les dilatations résiduelles dues à la formation de fissures sont les mêmes dans toutes les directions.

Envisageons maintenant le cas d'une roche dans laquelle l'orientation cristallographique est aléatoire, mais dont les grains sont allongés suivant une même direction (= orientation privilégiée des joints de grains) fig. 40 : la variation de température produit une fissuration intergranulaire qui sera évidemment plus fréquente suivant la direction perpendiculaire à l'allongement des grains. Il s'ensuit une dilatation anisotrope de la roche : la déformation est maximale suivant une direction perpendiculaire à l'allongement des grains. Plus on rencontre, dans une direction donnée, de joints de grains par unité de longueur, plus la dilatation thermique est importante dans cette direction. Ce raisonnement est confirmé par l'analyse de la structure (§ I V. 3.4.1. fig. 37) : C'est précisément selon la direction de  $V_1$  (en section  $(V_1 V_3)$  et  $(V_1 V_2)$ ), qui correspond à la dilatation maximale, que l'on rencontre le plus de familles de joints de grains (Sur une section  $(V_1 V_3)$ , le nombre d'intercepts obtenus parallèlement à  $V_1$  est supérieur au nombre d'intercepts obtenus dans la direction de  $V_3$ ). D'autre part, la rose des directions relative au plan  $(V_2 V_3)$  (fig. 36 c) montre un allongement des grains suivant  $V_3$  et c'est bien selon cette direction que se situe la dilatation minimale (moins de joints suivant  $V_3$ ).

#### I V. 3.5. Conclusions

L'anisotropie de dilatation thermique du marbre étudié est due à une légère anisotropie de forme des grains. Les cristaux de calcite ont une géométrie particulière, engendrée par des phénomènes de dissolution liés au métamorphisme subi par la roche.

Le rôle de l'analyseur d'images a été de mettre en évidence la faible anisotropie dans la forme des grains dans un matériau considéré en général comme ayant une structure isotrope. Les directions principales des joints de grains et leur importance relative ont été déterminées d'une manière objective. Ainsi, sur le plan  $(V_1 V_3)$  (fig. 33a, 34a), l'oeil est attiré par deux directions obliques par rapport à  $V_1$  et ne voit pas celle qui est parallèle à  $V_3$ .



La connaissance de la taille moyenne des grains et du degré d'orientation a également été utile pour la détermination de l'anisotropie de forme.

#### IV. 4 - ETUDE DE QUELQUES QUARTZITES DU MASSIF DE DORA MAIRA

Des échantillons de quartzites ont été prélevés en plusieurs points du massif de Dora Maira dans le but d'appliquer les caractéristiques de forme et d'orientation cristallographique définies précédemment, à des roches plus ou moins déformées, pour en préciser le régime de la déformation.

##### IV.4.1. Situation géographique et géologique du massif

Le massif de Dora Maira appartient aux contreforts orientaux de l'unité géographique franco-italienne des Alpes Cottiennes piémontaises. De forme allongée, il s'étend de la vallée de la Maira au Sud, à celle de la Riparia au Nord (fig.41).

Dans le domaine alpin, Dora Maira fait partie des massifs cristallins internes. Il est constitué d'une association de roches essentiellement gneissiques et plusieurs ensembles pétrographiques sont définis d'après l'homogénéité lithologique ou certaines associations de roches (Malon, 1966). Cinq grands ensembles sont ainsi distingués. Ce sont du plus jeune au plus ancien :

- l'ensemble des calcschistes où le faciès des quartzites blancs peu micacés est surtout fréquent dans le sud du massif. Les quartzites de cet ensemble apparaissent souvent sous forme de minces pincées au sein des gneiss divers comme les pincées de Sanfronte et de Calcinère.
- l'ensemble de Sampeyre composé surtout de quartzites phylliteux.
- l'ensemble de Dronero formé de schistes cristallins (gneiss plus ou moins oeuillés) dérivant de formations détritiques et volcaniques.
- l'ensemble graphitique de Pinerolo caractérisé par la présence de graphite dans ses roches. Les conglomérats étirés de la vallée de la Germanasca appartiennent à cette unité.
- l'ensemble des gneiss glanduleux, à composition lithologique très variée de micaschistes, amphibolites et gneiss divers.

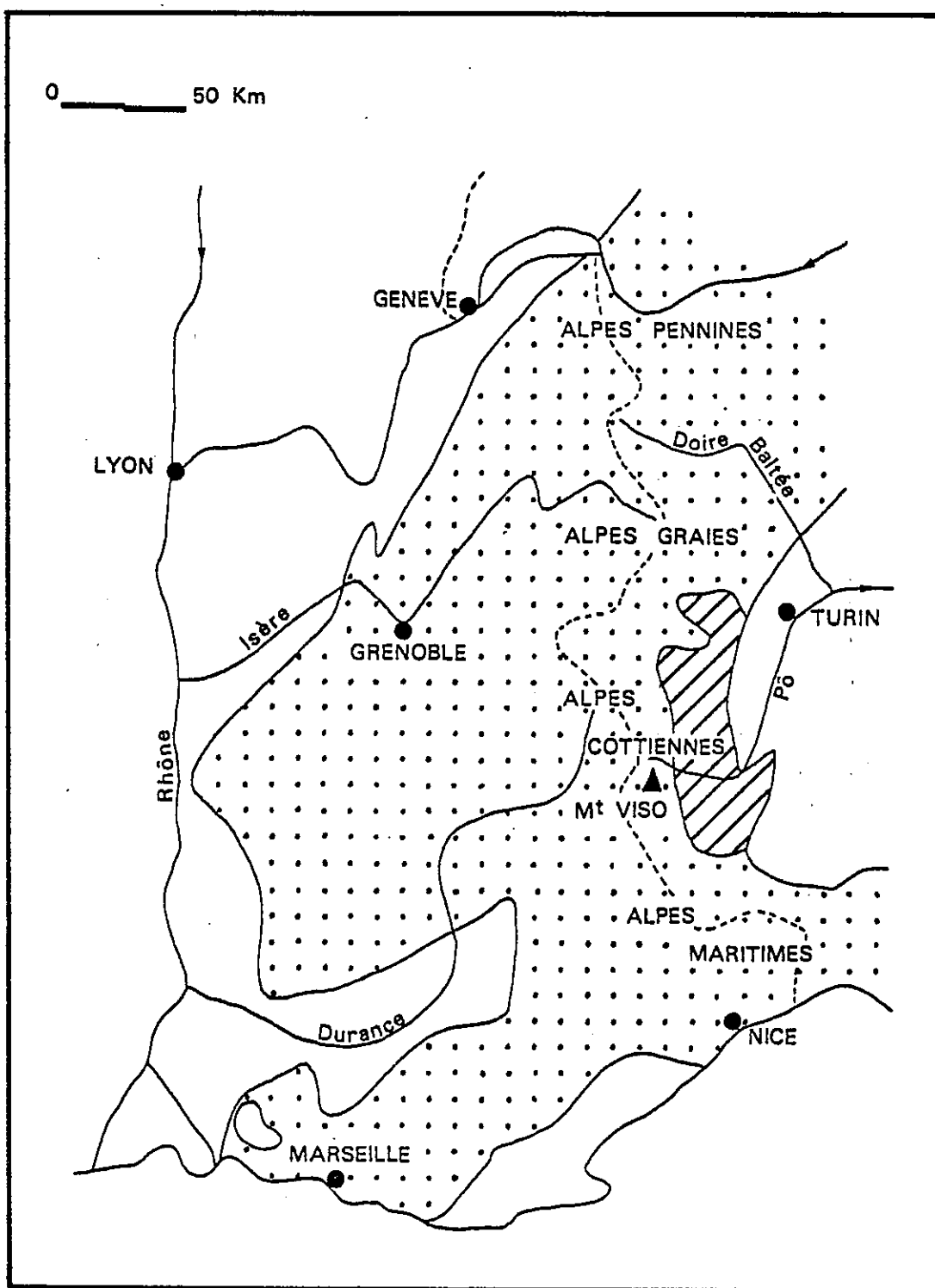


Figure 41 : Le Massif de Dora Maira (hachuré) dans les Alpes occidentales.

L'analyse structurale du massif a montré l'existence de deux grands groupes de structures, l'un transverse, l'autre longitudinal par rapport à la chaîne, soulignés par des linéations Est-Ouest et grossièrement Nord-Sud (fig. 42), et dûs à deux épisodes de déformation.

Les linéations Est-Ouest relatives à la phase initiale majeure de déformations synmétamorphiques (Vialon, 1966 ; Caby, 1973), ont été interprétées de plusieurs façons :

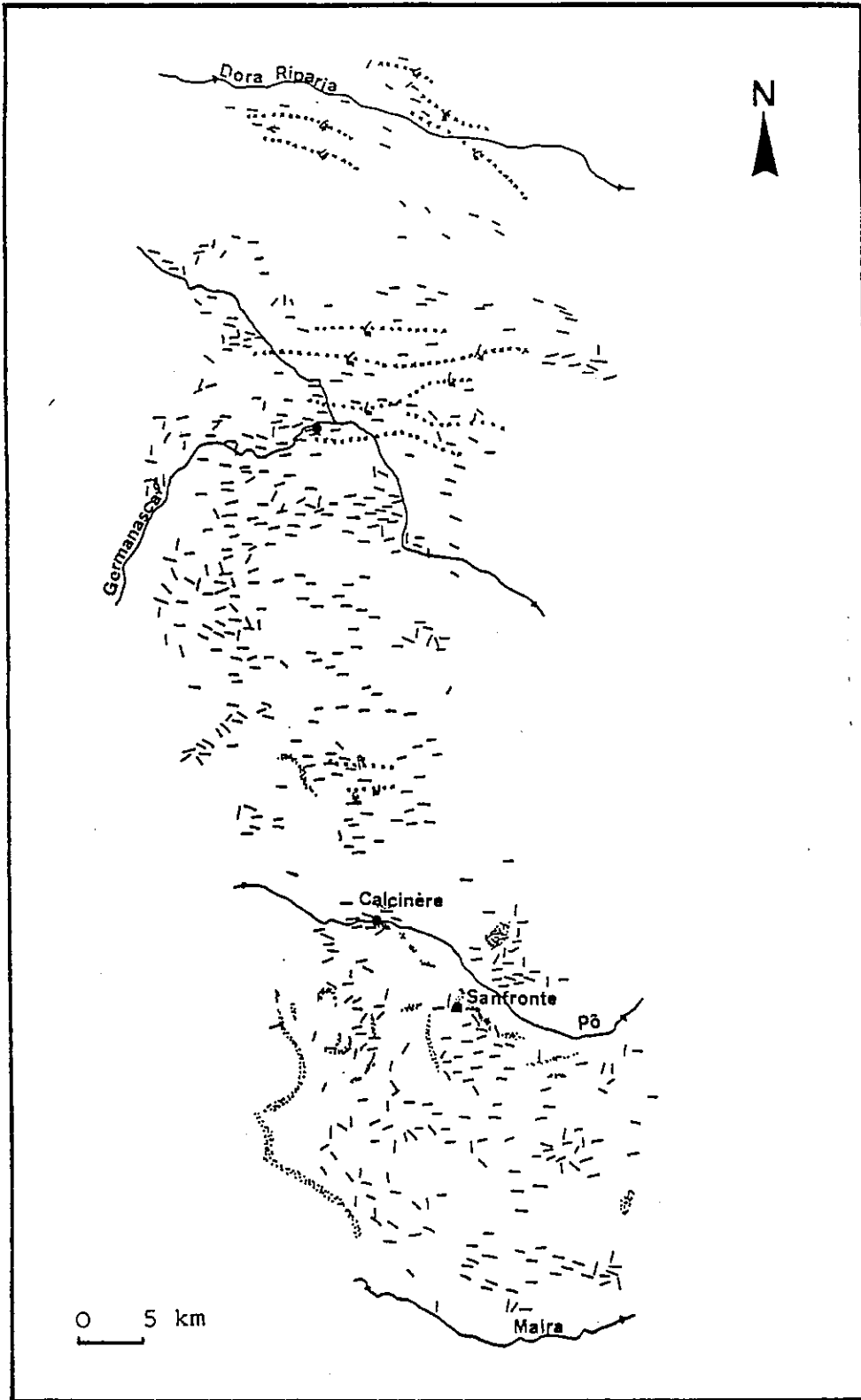
En général, et jusque dans les années 70, on supposait qu'il s'agissait d'une linéation "B", parallèle à des plis contemporains d'un raccourcissement de direction Nord-Sud. Cette interprétation d'abord acceptée par P. Vialon (1966) semble maintenant abandonnée : les plis et les linéations Est-Ouest pourraient être, soit dûes à une réorientation de structures antérieures de direction tout à fait différente sous l'influence d'un fort cisaillement Est-Ouest (Ayrton et al., 1974), soit des structures directement apparues suivant cette direction Est-Ouest. Il s'agirait donc comme toutes les linéations transverses des zones alpines internes, de linéations "a" liées à un mécanisme de cisaillement simple de direction Est-Ouest (Laurent et al., 1976).

Par ailleurs, il est intéressant de noter que les structures sont les mêmes à différentes échelles d'observation, depuis l'échantillon jusqu'à l'affleurement et la région. Ceci peut être utile pour étendre l'interprétation de quelques points à l'ensemble du massif de Dora Maira puisque celui-ci est caractérisé par des linéations Est-Ouest analogues à travers tout le massif (fig. 42).

## IV.2. Les conglomérats de la vallée de la Germanasca

### IV.4.2.1. Description des conglomérats

L'ensemble graphitique de Pinérollo attribué au Carbonifère comprend de nombreuses passées conglomératiques. Les gneiss fins qui forment le faciès pétrographique prédominant de cet ensemble, englobent des galets qui sont souvent très étirés, ce qui confère aux conglomérats une texture linéaire à planolinéaire dont la linéation d'allongement est environ E-W. Les galets sont pour la plupart quartzeux mais ils peuvent être également constitués de micaschistes. Les galets de micaschistes sont très étirés : le rapport des



- Linéation
- ××××× Axe anticlinal important et sens de déversement
- Quartzites de l'ensemble des calcshistes
- Affleurements étudiés

Figure 42 : Carte des linéations du Massif de Dora Maira et localisation des quartzites de l'ensemble des calcshistes (Vialon, 1966).

Longueurs de leurs axes principaux dans le plan de déformation XZ peut atteindre 100. Quant aux galets quartzeux qui font l'objet de cette étude, ils présentent dans le plan XZ, un rapport des axes principaux compris entre 6 et 20.

#### IV 4.2.2. Echantillons analysés

La vallée de la Germanasca présente de nombreux affleurements de conglomérats, notamment à quelques kilomètres en aval du village de Chiotti où ils sont très accessibles. Des échantillons ont donc été prélevés à cet endroit et leur orientation relevée soigneusement. Des lames minces ont été taillées dans les galets de quartz en se référant aux axes X, Y et Z (axes principaux de l'ellipsoïde de déformation). X est la direction d'allongement du galet, le plan XY est défini par le plan d'aplatissement des gneiss (et des galets); (fig. 43).

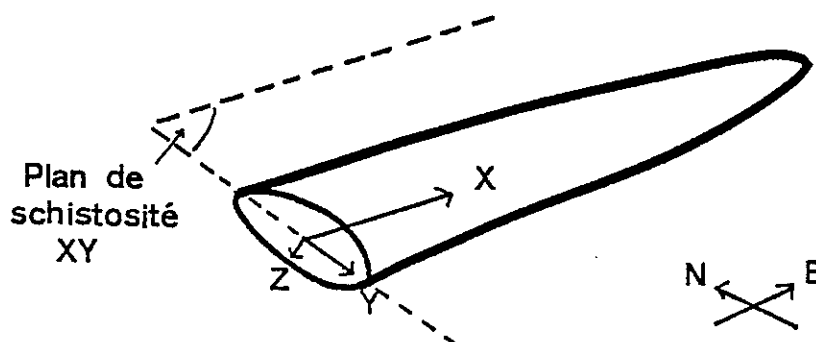


Figure 43 : Axes de référence liés aux galets étirés.

Les études ont porté sur les sections XZ sur lesquelles l'allongement des grains de quartz et l'orientation cristallographique ont été examinés.

Il faut insister ici sur l'importance de l'orientation des échantillons. En effet, à tous les stades de l'étude (échantillonnage, préparation des lames minces et des dessins, analyses et reports des mesures sur les différents diagrammes), une simple erreur d'orientation entraîne une interpré-

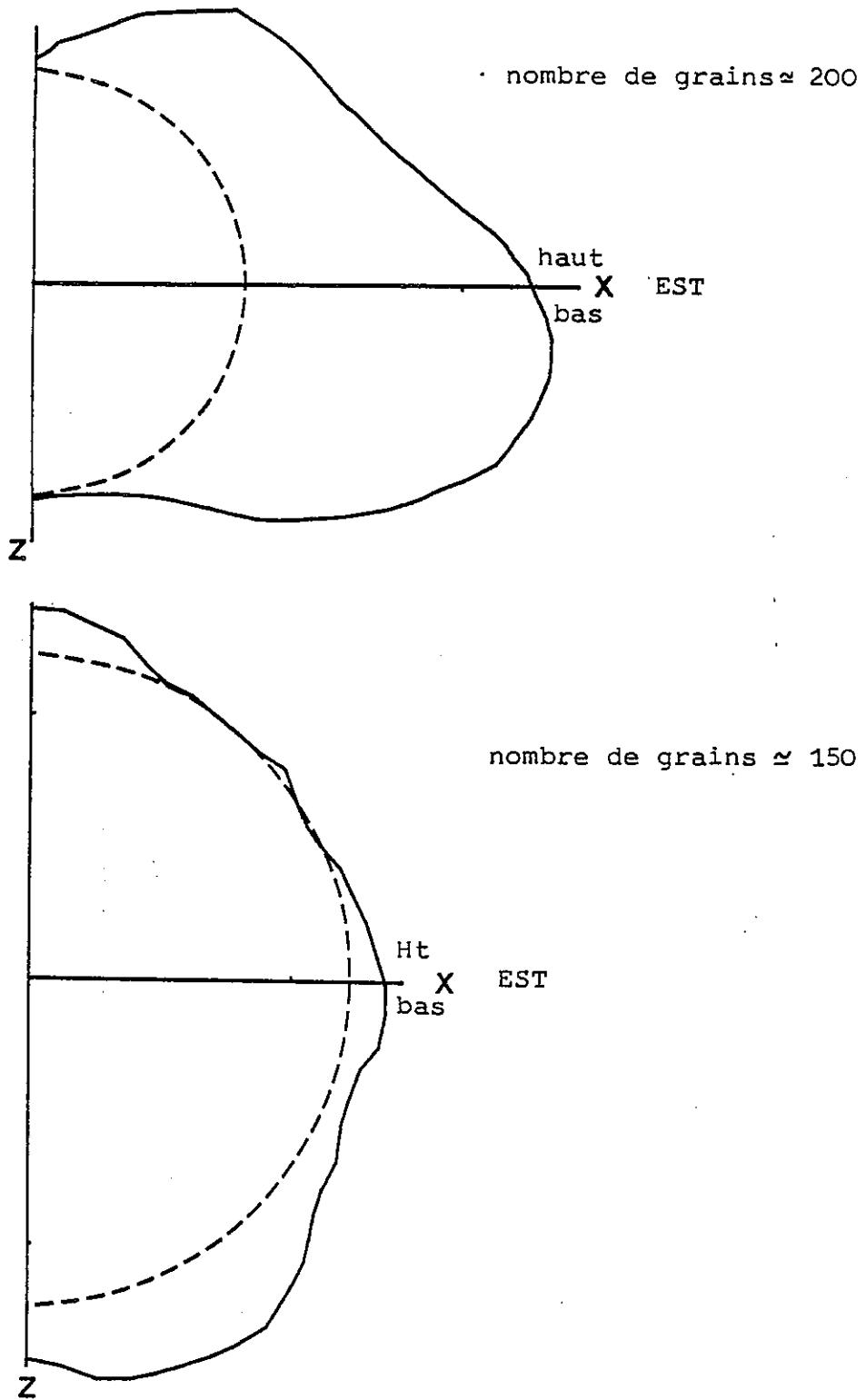


Figure 44 : Galets de la Germanasca en section XZ : roses des directions des joints de grains, relatives à 2 galets différents.

tation fausse des analyses. Il est donc nécessaire de reporter les orientations avec ordre afin d'éviter par exemple une inversion de l'Est par rapport à l'Ouest ou du haut par rapport au bas (à moins de faire deux fois de suite la même erreur !!) . Cette remarque s'applique également aux exemples traités par la suite (Calcinère et Sanfronte).

#### IV. 4.2.3. Allongement et orientation cristallographique des grains de quartz

La rose des directions qui caractérise l'allongement des grains a été établie à partir de dessins représentant entre 150 et 200 grains pour chaque galet. (Ces dessins sont obtenus en retraçant de manière aussi fidèle que possible les frontières de grains, par l'intermédiaire d'une chambre à dessin).

Certains échantillons montrent un allongement très net ( $\Omega = 16,7 \%$ ). La rose des directions des grains de ce type de galet est représentée sur la figure 44 a.

D'autres galets au contraire (fig. 44 b) ont des grains de forme presque isotrope ( $\Omega = 5 \%$ ).

La détermination de l'orientation des plans (0001) du quartz, par l'intermédiaire de l'orientation du  $N_p$  du quartz (§IV.2.4.), a montré que les galets présentaient dans la plupart des cas une orientation cristallographique privilégiée, significative du régime de la déformation et de son sens (fig. 45).

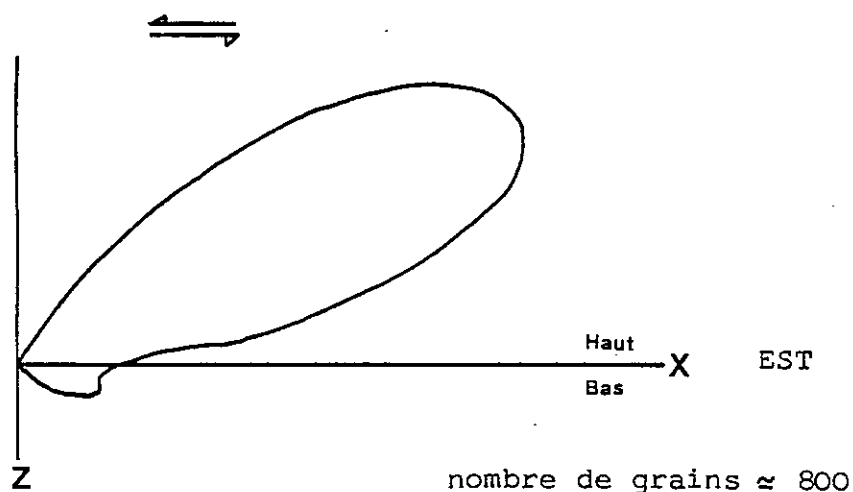


Figure 45 : Galets de la Germanesca en section XZ : orientation des plans (0001) du quartz.

#### I V 4.2.5. Interprétation

-----

L'orientation des plans de glissement (0001) nous renseigne sur les conditions physiques, le régime et la quantité de déformation (§ I V 2.5.). D'autre part, l'orientation des joints de grains dans le plan XZ de l'ellipsoïde de forme des galets, définit la direction moyenne des axes  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  de l'ellipsoïde de déformation finie du grain déformé.

Les diagrammes d'orientation des plans (0001) obtenus pour la majeure partie des galets sont caractéristiques d'une déformation par cisaillement simple (rotationnelle) (fig. 45 et 32).

Le sens de la rotation est déterminé sur les diagrammes par la position relative de la direction prédominante et de la trace de la schistosité : nous sommes en présence ici d'un cisaillement simple avec transport des zones hautes vers l'Ouest. La déformation intracristalline plastique caractérisée par du glissement sur les plans basaux s'effectue dans un domaine pression-température déterminé expérimentalement (Tullis et al., 1973) et compatible avec le climat épizonal (haute pression - basse température) déduit de l'étude pétrologique régionale (Walton, 1966).

La quantité de déformation est appréciée par la prédominance d'une seule direction sur le diagramme, par l'angle faible entre cette direction principale et le plan de schistosité mais aussi par le rapport des axes X/Z de l'ellipsoïde de forme des galets.

La direction d'allongement des grains de quartz constitue un argument supplémentaire dans la détermination du sens du cisaillement : la direction d'allongement des grains en section XZ de la roche, mise en évidence par la rose des directions des joints de grains, correspond à la direction du grand axe  $\lambda_1$  de l'ellipsoïde de déformation finie des grains de quartz déformés (ou ellipsoïde de forme des grains). La dissymétrie de la déformée ou la direction du grand axe, ne permettent pas à elles seules de déterminer le régime de la déformation. Mais dans le cas d'une déformation rotationnelle, si le plan de cisaillement peut être repéré et utilisé comme marqueur de position, alors le sens de l'obliquité de l'aplatissement par rapport à ce plan donne le sens de la rotation (Pécher, 1978). La figure 46



représente la section XZ (ou  $\lambda_1$   $\lambda_2$ ) de l'ellipsoïde de déformation finie en relation avec un cisaillement simple.

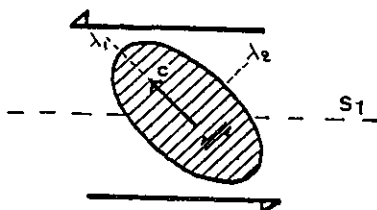


Figure 46 : Section XZ de l'ellipsoïde de déformation en relation avec un cisaillement simple, et orientation des plans (0001) du quartz.

Dans le cas des galets étirés de la vallée de la Germanasca, le plan de cisaillement étant défini par le plan d'aplatissement observé sur les conglomérats, et la nature de la déformation déterminée par l'étude de l'orientation cristallographique des grains de quartz, la direction d'allongement repérée par rapport à X et Z confirme l'hypothèse du cisaillement simple vers l'Ouest.

#### I V 4.3. Quartzites plissés de Calcinère

##### I V 4.31. Descriptions

Les quartzites qui affleurent sous forme de pincées au sein des gneiss près du village de Calcinère (fig. 42) appartiennent à l'ensemble des calschistes défini précédemment. Il s'agit là de quartzites blancs, à minces délits micacés verts présentant des passées conglomératiques à galets de quartz blanc.

Ces quartzites montrent en rive droite du Pô de nombreux replis métriques. Les axes de ces plis sont orientés Est-Ouest environ (N90 à N100) et plongent doucement vers l'Ouest. Les micas se disposent à plat, non pas suivant le litage de la roche, mais selon le plan axial du pli c'est-à-dire suivant une direction à peu près Nord-Ouest (N305) et avec un pendage de 30° vers Sud-Ouest indiquant le déversement apparent de la structure vers le Nord-Est.

La linéation représentant l'axe du pli est due à la première phase de déformation du massif mais ces plis transversaux sont-ils liés à un mécanisme de cisaillement simple de direction Est-Ouest comme les conglomérats de la Germanasca ou bien sont-ils formés par un raccourcissement de direction Nord-Sud ?

#### IV 4.3.2. Echantillons analysés

Les échantillons proviennent de la rive droite du Pô, près de Calcinère où des carrières de quartzites étaient autrefois exploitées. Les lames minces, orientées par rapport aux axes géométriques A, B et C liés au pli, ont été taillées en se référant au plan axial AB du pli matérialisé par les micas, et à la direction de la charnière B (fig. 47).

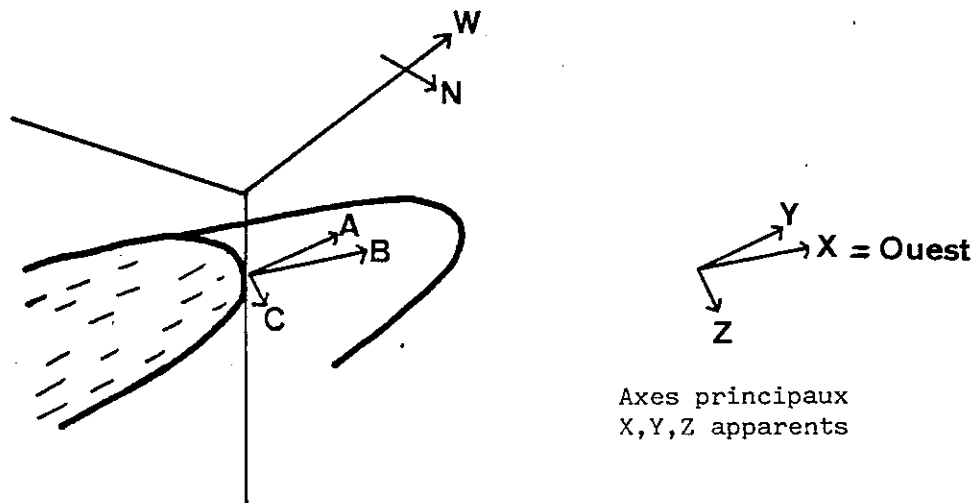


Figure 47 : Repères géométriques liés aux plis de Calcinère

Les études ont porté essentiellement sur les sections BC (perpendiculaires au plan axial et parallèles à la charnière) et qui paraissent correspondre à des sections XZ de l'ellipsoïde de déformation finie, perpendiculaires à la foliation et contenant la linéation (comme pour les échantillons de la Germanasca).

Ces lames minces devraient permettre de démontrer si le régime de déformation rotationnelle déterminé à la Germanasca est compatible avec la création d'un pli de direction "a" c'est-à-dire parallèle à la direction de cisaillement.

Des sections AC perpendiculaires à B et correspondant à YZ apparent, ont également été examinées.

#### I V 4. 3 3. Allongement et orientation cristallographique du quartz

Dans ce cas, certains échantillons sont difficiles à interpréter, d'autres au contraire indiquent une direction d'allongement nette et une orientation cristallographique particulière. Mais quoiqu'il en soit, les résultats concernant ces derniers échantillons sont homogènes ; la figure 48 représente la rose des directions générale des joints de grains ainsi que l'orientation des plans (0001) du quartz, existant dans les quartzites de Calcinère observés en section BC (= XZ).

Les galets de quartz qui peuvent exister dans ces quartzites sont souvent intéressants, notamment lorsque l'orientation cristallographique du quartzite qui les englobe n'est pas très prononcée car elle est en général plus marquée dans les galets. De plus, le dessin des grains de quartz est plus aisé dans les galets car les micas y sont inexistantes. Une comparaison de l'orientation des plans basaux du quartz a été établie entre les galets et leur matrice (fig 49).

Souvent, les échantillons observés toujours en section BC (ou XZ) présentent une structure particulière : les grains de quartz se disposent en bandes de 0,5 mm d'épaisseur environ et parallèles à B. A l'intérieur d'une même bande, les grains ont grossièrement la même orientation cristallographique, mais cette orientation diffère d'une bande à l'autre. Au microscope, en lumière polarisée et avec une lame de gypse, cela se manifeste par des bandes parallèles de couleur jaune, bleue ou rose. Les diagrammes d'orientation des plans (0001) varient d'une bande à l'autre et le diagramme global de toute la lame mince indique 2 directions privilégiées d'importance égale (les grains roses ont leur plan (0001) parallèle au plan de la lame mince ; ils ne sont pas représentés sur les diagrammes établis sur ces sections). La figure 50 illustre la variation de l'orientation cristallographique d'un point à l'autre de la section. La direction d'allongement des grains varie également d'une bande à l'autre, à l'intérieur d'une même lame mince (fig. 51).

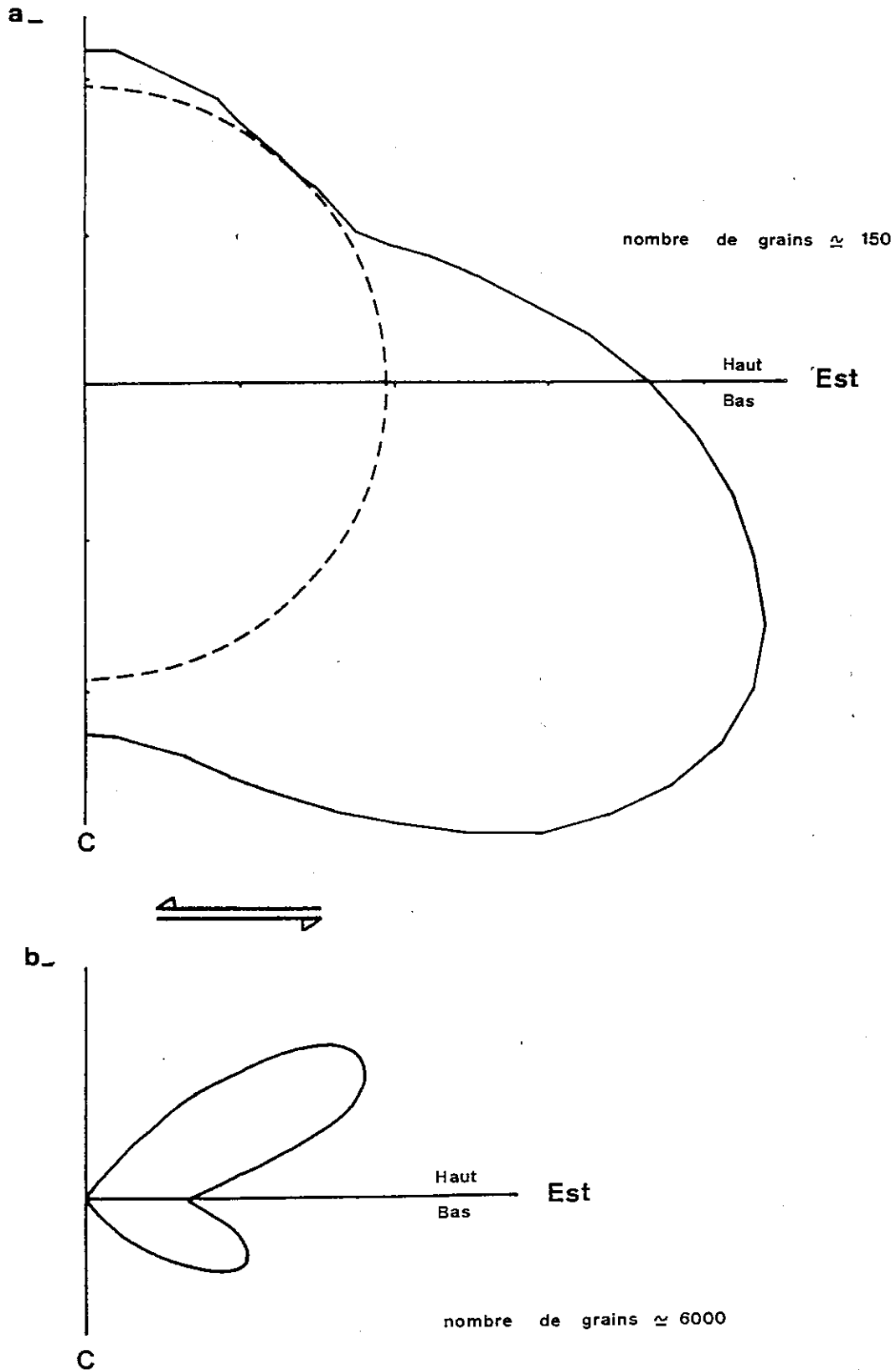


Figure 48 : Quartzites de Calcinère en section BC (=XZ) : cas général  
a - Rose des directions des joints de grains  
b - Orientation des plans (0001) du quartz

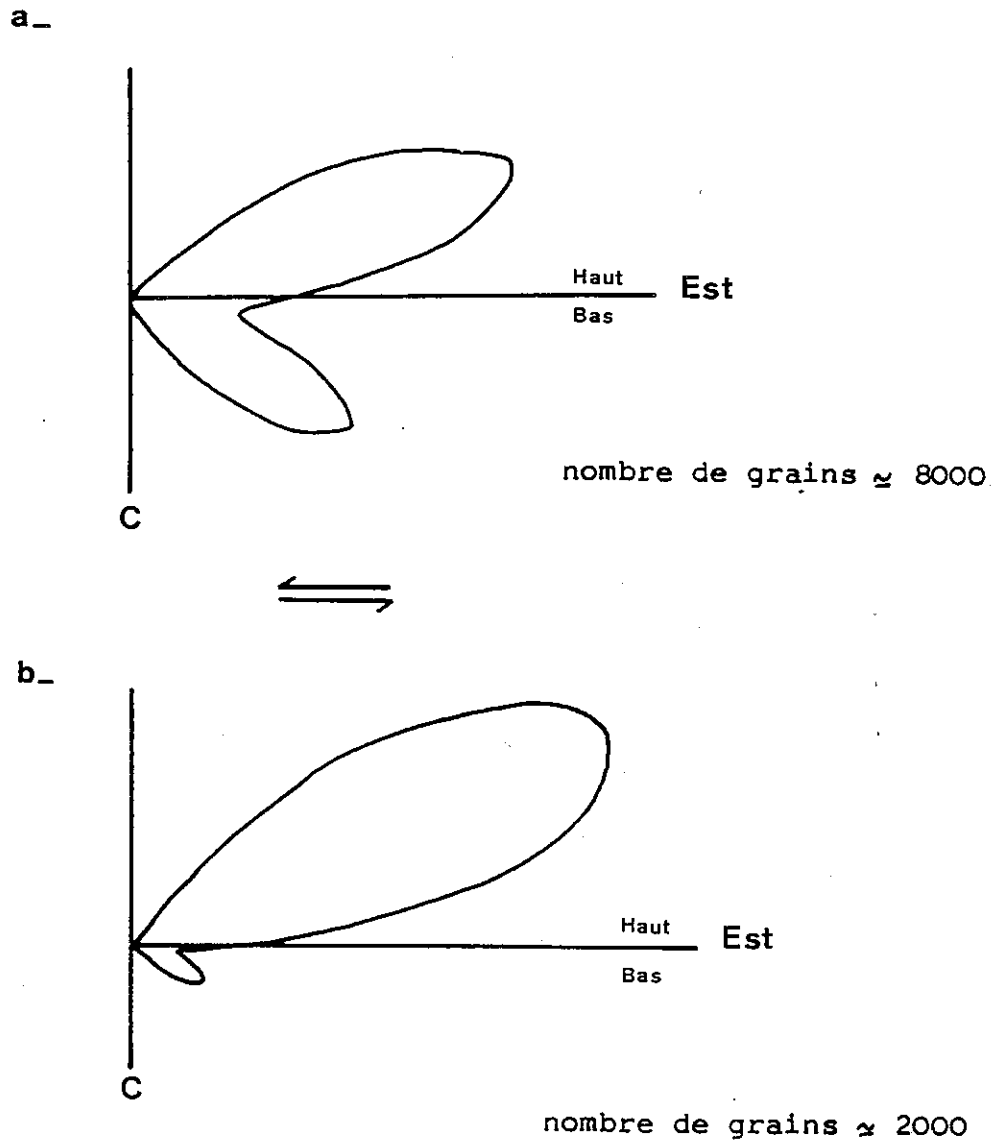


Figure 49 : orientation des plans (0001) du quartz dans un galet (a) et dans la matrice (b) d'un même échantillon de quartzite en section BC (ou XZ)

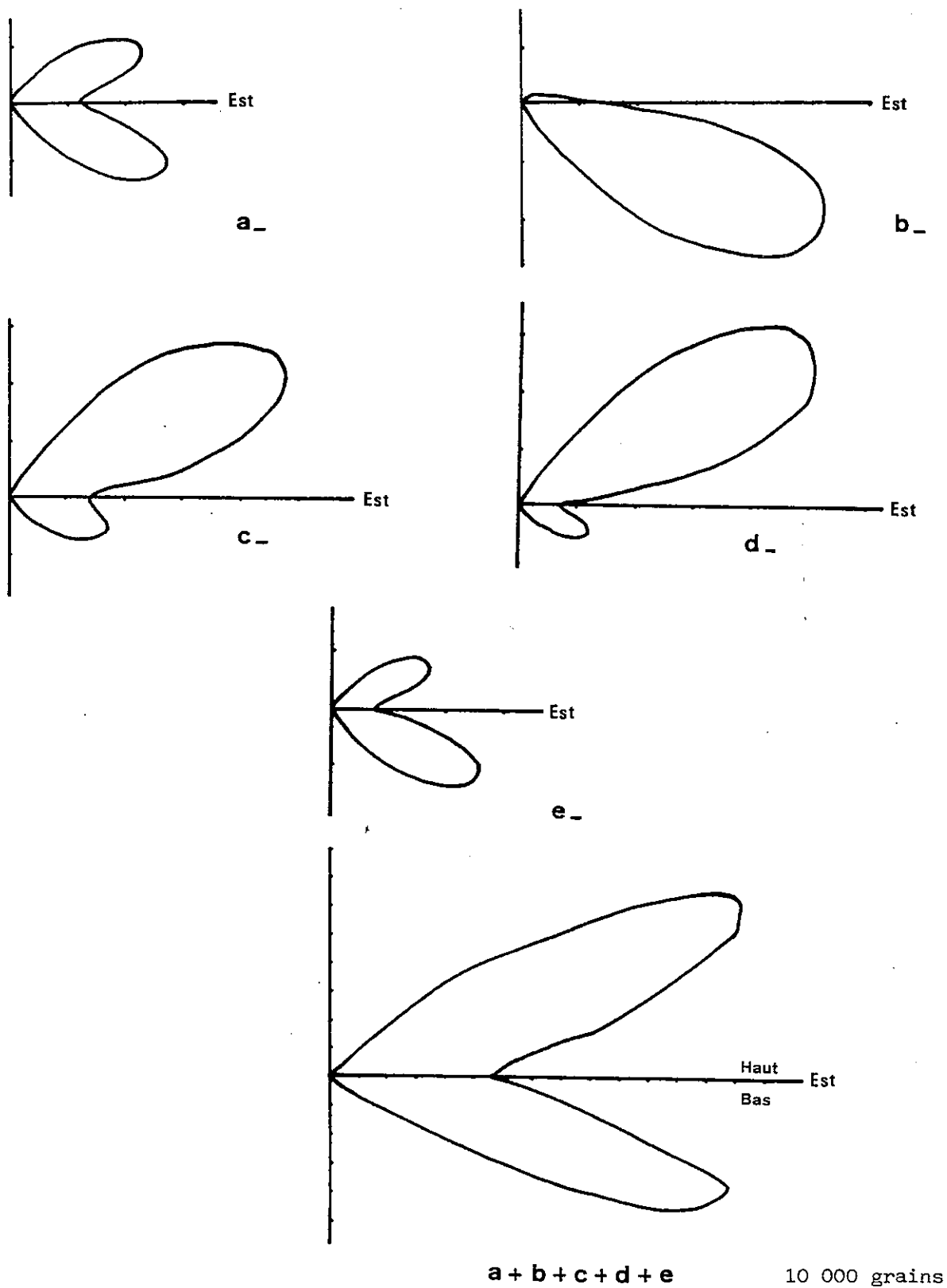


Figure 50 : Quartzites de Calcinère en section BC (=XZ) : orientation des plans (0001) du quartz dans 5 "bandes" différentes, dans une même lame mince.

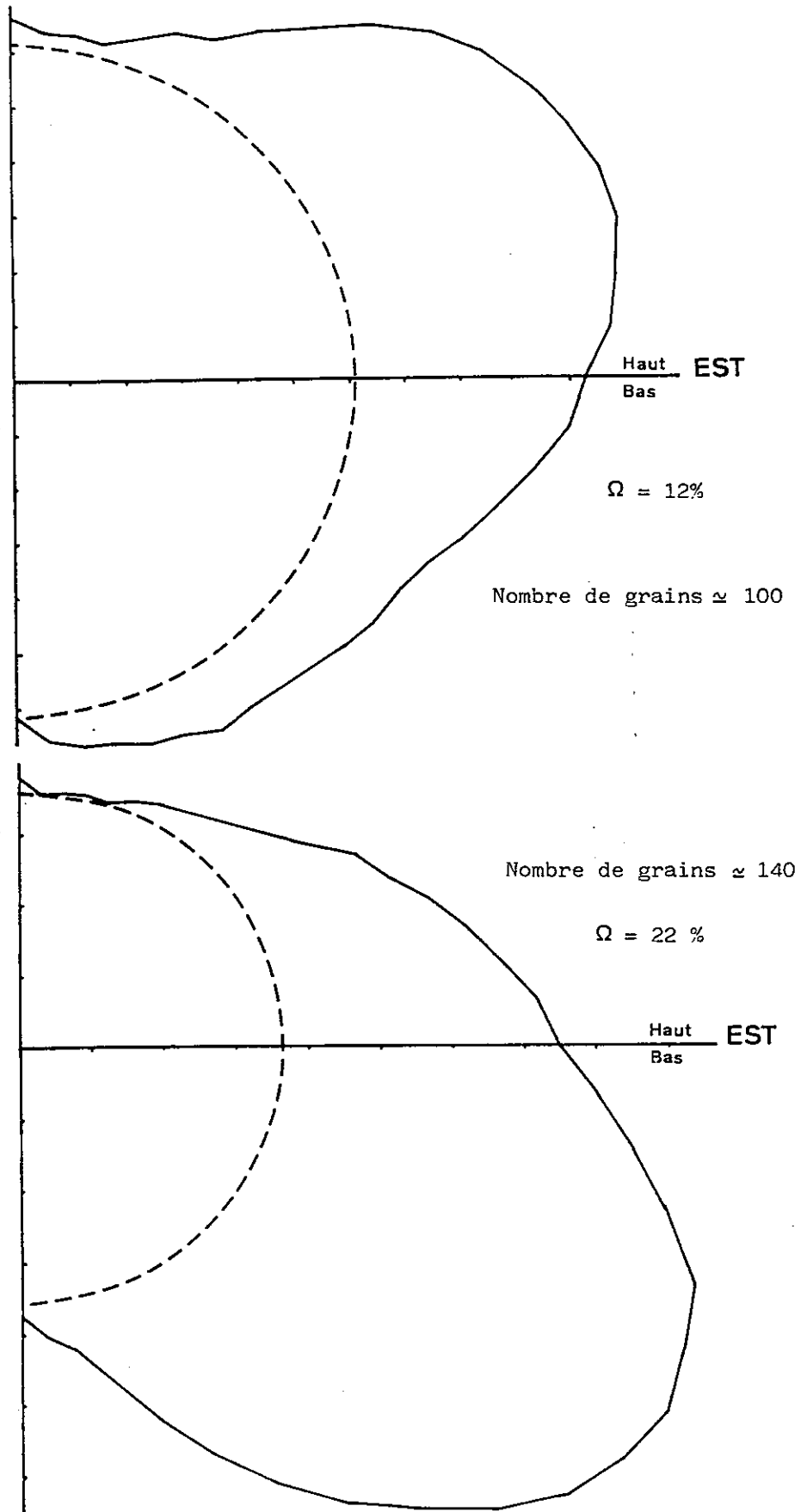


Figure 51 : Quartzites de Calcinère en section BC (=XZ) : rose des directions des joints de grains dans 2 "bandes" différentes, dans une même lame mince.

Il en est de même pour le degré d'orientation ( $\Omega = 22$  ou  $12 \%$ ).

Les sections AC (=YZ), perpendiculaires aux précédentes ne montrent pas de direction cristallographique privilégiée du quartz. La figure 52 présente le diagramme d'orientation des plans (0001) dans une telle section.

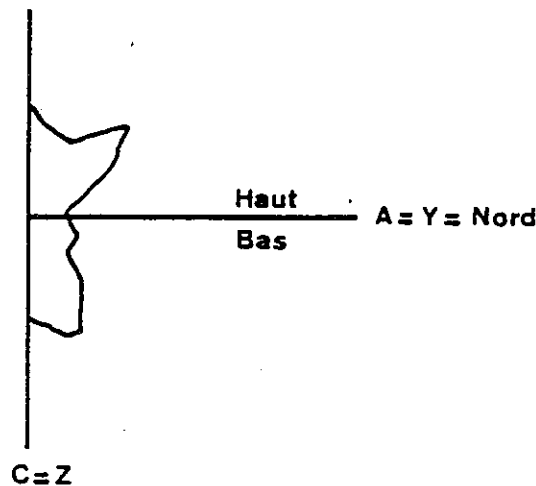


Figure 52 : diagramme d'orientation des plans (0001) du quartz, en section AC (=YZ) des quartzites de Calcinère

#### IV.3.4. Interprétation

Les informations que l'on peut déduire de l'étude des quartzites de Calcinère sont analogues à celles qui concernent les galets de la Germanasca (§. IV. 4.2.5.). Les diagrammes d'orientation des plans (0001) des grains de quartz établis sur les sections BC des quartzites sont caractéristiques d'une déformation rotationnelle (cisaillement simple) (fig. 48 b, 49, 50). Sur ces diagrammes, la position relative de la direction prédominante et de la trace de la schistosité nous précise le sens de rotation du cisaillement : il y a transport des zones hautes vers l'Ouest. Ce résultat est confirmé par la direction d'allongement des grains (fig. 48 a) et par l'observation des sections AC (=YZ) qui ne montrent pas d'orientation privilégiée des plans (0001) du quartz.



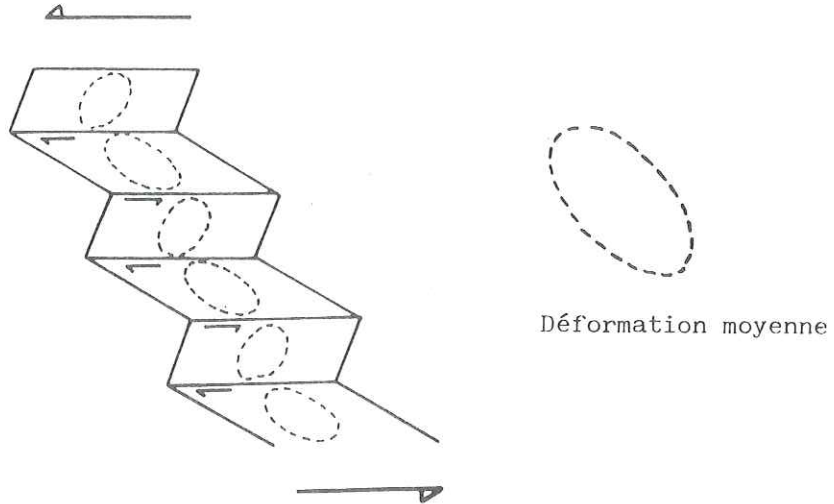


Figure 53 : Bandes de cisaillement alternées (Turner et al., 1963).  
(L'ellipse représente la section XZ de l'ellipsoïde de déformation)

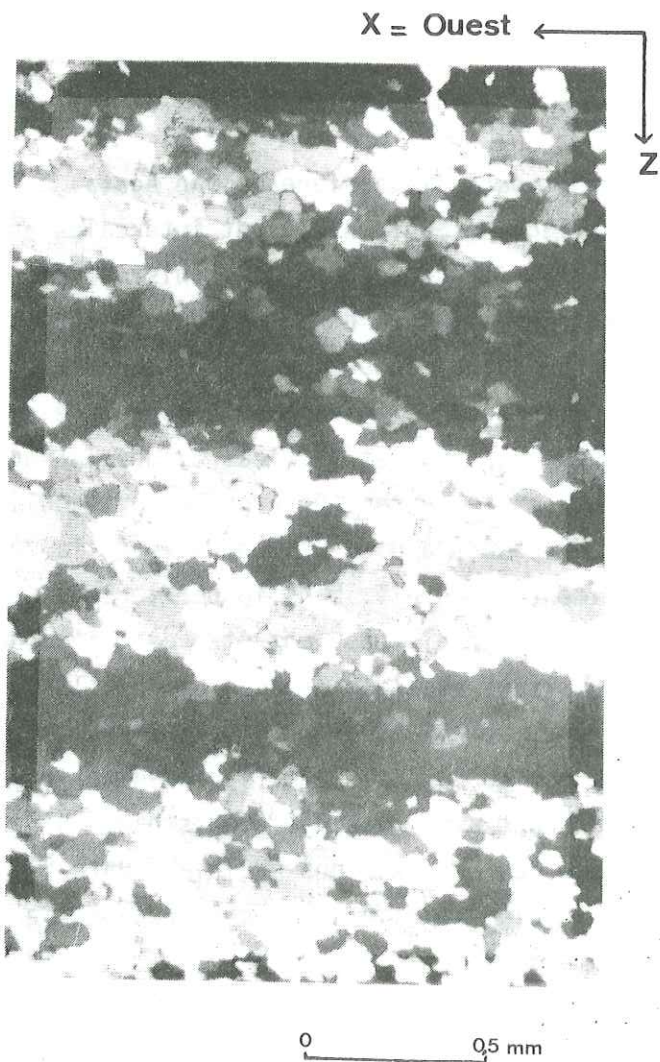
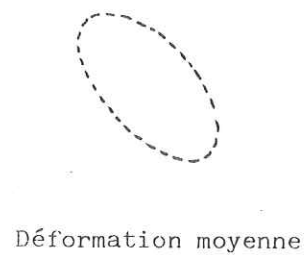


Figure 54 : Bandes de cisaillement alternées dans les quartzites de Calcinère.



Les échantillons décrits dans le chapitre précédent et qui présentent dans les sections BC une alternance de lits de quartzites d'orientation cristallographique différente, reflètent également le régime de déformation de la roche : ce sont des bandes de cisaillement alternées dans un même échantillon où la déformation globale est un cisaillement senestre (fig. 53). La déformation n'est donc pas homogène à l'échelle des grains, ce qui explique la présence dans certains échantillons, de bandes dont la déformation locale est différente de la déformation moyenne (fig. 54).

En résumé, la déformation observée dans les plis Est-Ouest de Calcinère est un cisaillement simple de direction Ouest. Une explication de la genèse de ces plis parallèles à la direction de déplacement est proposée au paragraphe IV. 4.5.

#### IV 4.4. Quartzites plissés de Sanfronte

##### IV. 4.4.1. Description

Les quartzites qui affleurent dans la carrière de San Agata, à environ 2 kilomètres à l'ouest du village de Sanfronte, sont intercalés au sein des micaschistes et appartiennent à l'ensemble des calcschistes défini précédemment (IV.4.1.). Leur faciès, connu sous la dénomination de "Bargioline", est lamellaire et se clivant en dalles minces. Le quartz constitue 80 à 90 % de la roche, le reste étant composé de feldspaths d'aspect détritique et irrégulièrement répartis dans la roche, et de micas blancs (phengites). Lorsque la bargioline est plissée, ces micas peuvent être groupés et souligner les plis : les paillettes sont disposées à plat et concrétisent la foliation de plan axial, quelle que soit la dimension du pli. Dans la carrière de San Agata, les quartzites présentent de nombreux plis pouvant être de taille décimétrique, mais l'épaisseur de la couverture végétale empêche de voir la continuité des plis en dehors de la carrière. Le pli étudié est orienté N60. Il est couché et son axe plonge de 20° vers le Sud Est. L'affleurement offre une coupe perpendiculaire au pli, montrant ainsi les différents bancs plissés et permettant une localisation précise des échantillons prélevés. Par ailleurs, les micas se disposent à plat selon le plan axial et la roche présente de nombreux microplis observables en lame mince.

#### IV.4.4.2. Echantillons analysés

Les échantillons proviennent de différents points : charnière, flancs supérieur et inférieur d'un même banc ou non. Ils sont localisés sur la figure 55.

Les lames minces, orientées par rapport aux axes géométriques A, B et C liés au pli ont été taillées en référant au plan axial matérialisé par les micas et à la direction de la charnière. Comme la schistosité est de plan axial et perpendiculaire à Z, ces axes sont équivalents respectivement aux axes Y, X et Z de l'ellipsoïde de déformation finie.

Les études ont essentiellement porté sur les sections BC (= XZ) et AC (= YZ).

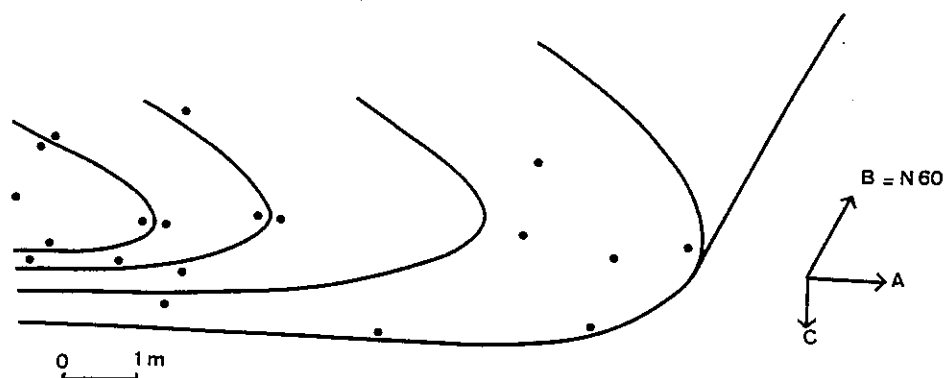


Figure 55 : Pli de Sanfronte : axes géométriques liés au pli et localisation des échantillons prélevés.

Tout comme pour les exemples de Calcinère et de la Germanasca, il faut insister sur les précautions prises lors de l'échantillonnage, de la coupe des lames minces et des analyses pour éviter les erreurs d'orientation qui fausseraient toute interprétation.

#### IV. 4.4. 3. Interprétations tirées de l'étude des quartzites

Ce sont surtout les orientations cristallographiques qui ont été examinées dans ce cas.

L'interprétation des diagrammes d'orientation des plans basaux du quartz est analogue à celle des quartzites de Calcinère et de la Germanasca : les sections BC (=XZ) des échantillons prélevés à la charnière ou sur les flancs du plis sont typiques d'une déformation par cisaillement simple et le sens de déplacement des zones hautes serait ici vers l'azimut N240 (Sud Ouest), selon l'axe du pli. La figure 56 montre le diagramme obtenu sur une telle section.

La majeure partie des échantillons a donné des diagrammes de ce type. Cependant pour quelques échantillons, il a fallu prendre un grand nombre de champs d'analyse pour déterminer le sens de la déformation. (Un champ d'analyse compte approximativement 120 grains).

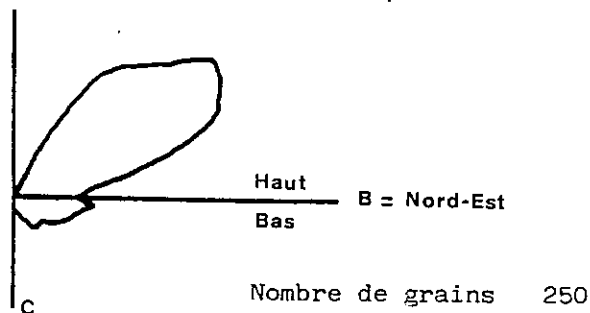


Figure 56 : Quartzites de Sanfronte en section BC (=XZ) :  
diagramme d'orientation des plans (0001) du quartz.

Les sections AC (=YZ) de tous les échantillons, ainsi que les quelques lames minces orientées Est-Ouest ont donné des diagrammes ne présentant pas d'orientation préférentielle des plans (0001) (fig. 57). La direction du cisaillement est donc bien contenue dans le plan BC, perpendiculaire au plan axial du pli et parallèle à la charnière.

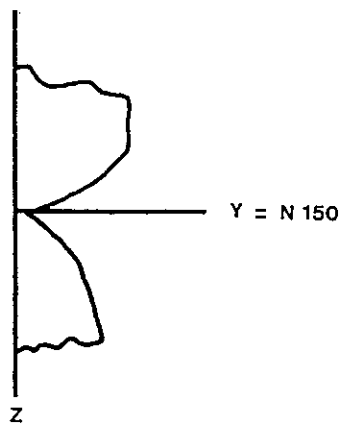


Figure 57 : Quartzites de Sanfronte en section AC (=YZ) :  
diagramme d'orientation des plans (0001) du quartz.

L'observation des lames minces peut apporter des indices complémentaires comme la direction d'allongement des grains par rapport aux axes B et C. La rotation peut également être matérialisée par les feldspaths à l'abri desquels ont cristallisé de nouveaux cristaux de quartz (fig. 58). Les caractéristiques géométriques des zones abritées sont en effet liées à une déformation non coaxiale et la dissymétrie de ces zones peut être utilisée pour déterminer le sens de rotation.

En résumé, la déformation subie par les quartzites est une déformation par cisaillement simple avec transport des parties hautes vers le Sud-Ouest. Le pli est également parallèle à la direction de déplacement.

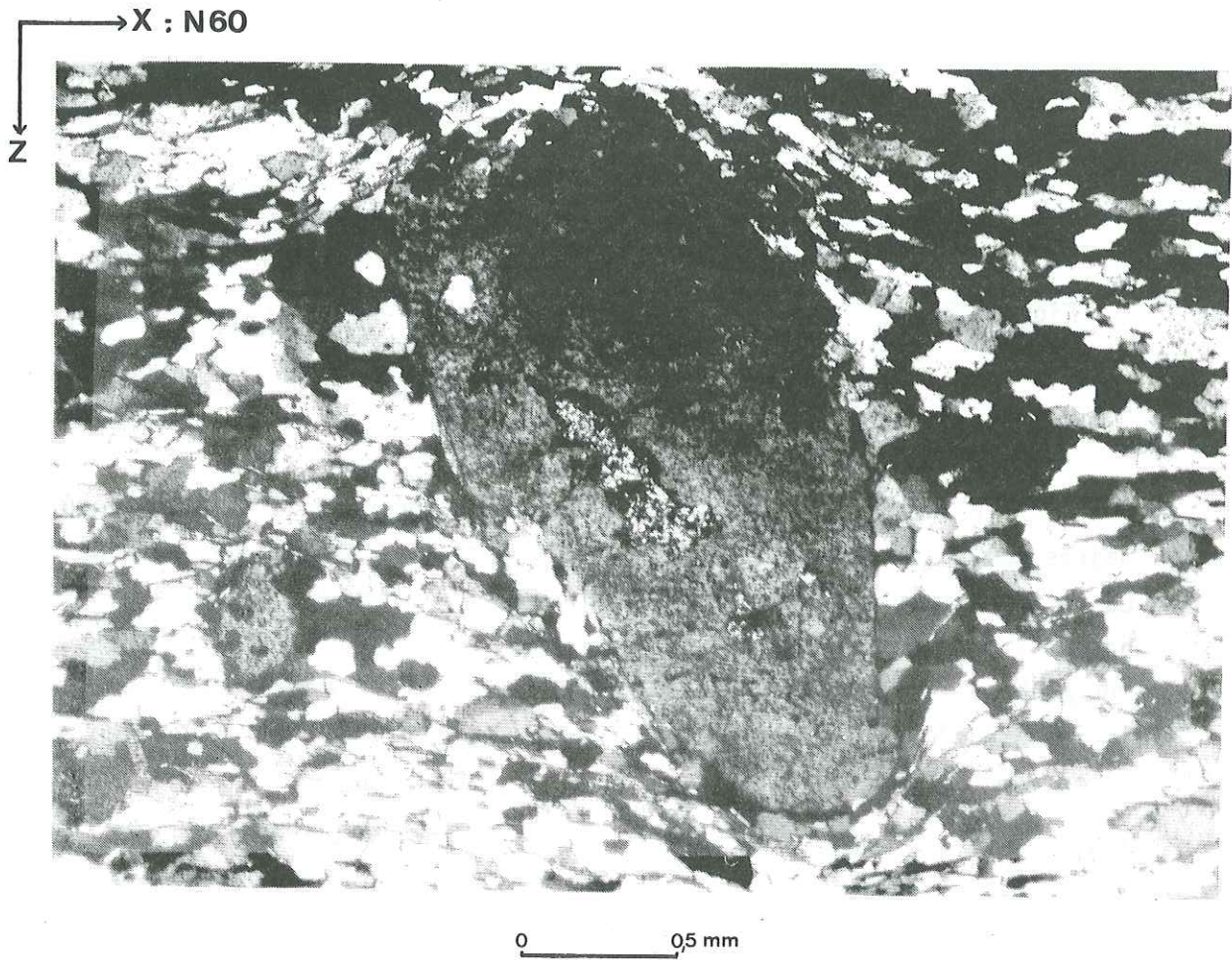


Figure 58 : Feldspath à zones abritées dans les quartzites de Sanfronte.

#### IV 4.5. Conclusions générales sur le massif de Dora Maira

L'étude de l'orientation des plans (0001) du quartz et de l'allongement des grains de divers quartzites du massif de Dora Maira a permis d'aboutir à la conclusion suivante : le régime de la déformation enregistrée par les quartzites de la Germanasca, de Calcinère et de Sanfronte est un cisaillement simple avec déplacement des zones hautes vers l'Ouest (Germanasca et Calcinère) ou vers le Sud-Ouest (Sanfronte).

Les plis de Calcinère et de Sanfronte ont la particularité d'être parallèles à la direction "a" de transport. Ce type de pli, dont la charnière est perpendiculaire à la direction générale des chaînes, et sub-parallèle aux linéations d'allongement se rencontre souvent dans le cas du cisaillement simple ductile. Ce sont peut être des plis directement apparus dans la direction "a" ou des plis d'orientation ancienne quelconque réorientés selon "a" ("a" est la direction de cisaillement ou de transport vers l'Ouest ou le Sud-Ouest). Dans les deux cas, les plis ont en déformation finie, leur axe charnière parallèle à "a". Ce sont peut-être également des plis en fourreau dont la géométrie globale est un peu plus complexe mais où la majeure partie du pli a une direction de charnière également parallèle à "a". Ces plis dits "en fourreau" (fig. 59) ont été récemment décrits dans des zones de cisaillement comme les Pyrénées (Carreras et al., 1977), le Massif Armoricain (Berthé et al., 1980 ; Quinquis et al. 1978); les massifs cristallins externes des Alpes occidentales (Pijolat et al., 1981), la Corse (Malavieille, 1982), les Alpes italiennes (Minnigh, 1979) et également le Massif d'Ambin (Malavieille, 1982) qui fait partie des massifs cristallins internes comme le massif de Dora Maira.

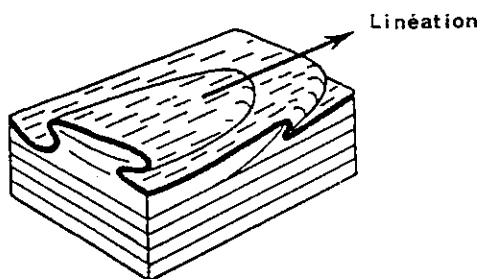


Figure 59 : Pli en fourreau (Mattauer et al., 1980)



Le mécanisme de formation de ces plis a été abordé expérimentalement par Cobbold et Quinquis (1980) : les plis en fourreau résulteraient d'une réorientation par courbure progressive des axes des plis (fig. 60). Cette réorientation est possible quand il existe un gradient de vitesse dans le déplacement.

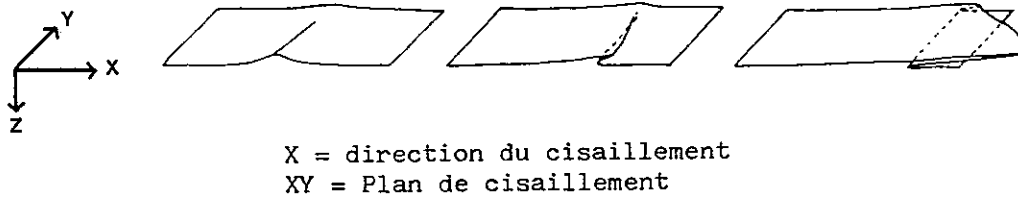


Figure 60 : Formation expérimentale d'un pli en fourreau par cisaillement simple (Cobbold et al., 1980)

Dans ce contexte de plis en fourreau, les plis observés à Calcinère et à Sanfronte seraient formés directement par un cisaillement Est-Ouest.

Les linéations et les axes de plis Est-Ouest du Massif de Dora Maira (fig. 42) peuvent donc être des plis "a" parallèles à la direction de cisaillement. Cette hypothèse rejoint celle de Laurent et Etchecopar (1976) et ne contredit pas fondamentalement l'hypothèse de Ayrton (1974), où des plis d'orientation ancienne inconnue, éventuellement Nord-Sud, sont réorientés sous le même régime de cisaillement Est-Ouest avec transport des zones hautes vers l'Ouest.



## CHAPITRE V

### CONCLUSIONS

V.I. UTILISATION DU QUANTIMET 720 POUR LES DIFFERENTS PROBLEMES TRAITES

V.II. DEVELOPPEMENTS RECENTS DES ANALYSEURS ET PERSPECTIVES DANS LE  
TRAITEMENT DES IMAGES EN GEOLOGIE.

## CONCLUSIONS

### V.1 - UTILISATION DU QUANTIMET 720 POUR LES DIFFERENTS PROBLEMES TRAITES

Le Quantimet a été utilisé ici pour des problèmes bien différents: fracturation, forme de grains et orientation cristallographique. Dans ces trois exemples, l'analyseur a permis de définir les structures existantes et ainsi d'expliquer la formation de cette structure (zone de décrochement à Vinça, cisaillement ouest dans les quartzites de Dora Maira) et également de déterminer son influence sur la déformation du matériau soumis à des contraintes nouvelles (barrage, traitement thermique).

L'intérêt d'un tel appareil est évident pour le traitement des cartes de fracturation de grande densité car il permet de visualiser par une rosace les principales directions de fracture et leur fréquence relative.

L'étude de la forme des grains est abordée par leur contour mais il faut en général trouver une méthode de préparation de l'échantillon qui permette de visualiser directement les joints de grains. Un procédé photographique a pu être utilisé pour le marbre mais les grains de quartz ont dû être redessinés. Le Quantimet donne un aperçu des possibilités des analyseurs d'images dans l'élaboration des paramètres de forme et si les nouveaux appareils conçus actuellement (§ V.2.) peuvent nous éviter cette étape du dessin (dans certains cas où une interprétation n'est pas nécessaire), l'étude des formes serait alors plus intéressante.

Quant à la méthode de détermination de l'orientation cristallographique du quartz par l'analyseur d'images, elle présente l'intérêt d'être très rapide. Elle peut donc être appliquée à des études systématiques.

Cependant, si le Quantimet est capable de traiter rapidement une image, le problème majeur reste actuellement la préparation de l'échantillon pour l'obtention d'une image de bonne qualité et d'une détection parfaite des objets à analyser. Ces préparations risquent de fausser le résultat car elles ne sont pas objectives (une part d'interprétation entre dans le dessin des grains par exemple). Par ailleurs, elles sont souvent très longues (c'est le cas des dessins) et peuvent paraître disproportionnées (surtout si elles nécessitent déjà une part d'interprétation) par rapport à l'emploi proprement dit de l'analyseur d'images. Il serait donc souhaitable que l'image brute, non altérée ou non déjà interprétée soit le plus souvent possible directement traitée par l'analyseur.

## V. 2 - DEVELOPPEMENTS RECENTS DES ANALYSEURS ET PERSPECTIVES DANS LE TRAITEMENT DES IMAGES EN GEOLOGIE

L'analyse d'images par système vidéo a connu ces dernières années une expansion considérable. Les principaux progrès portent sur l'amélioration de l'image et sur l'analyse proprement dite.

Les premiers instruments, comme le Quantimet 720, donnent accès uniquement à la mesure de grandeurs brutes s'appliquant à des entités existantes dans l'image d'origine. C'est le cas des dénombrements, des déterminations de fraction volumique à partir d'une mesure sur une surface, des tracés d'histogrammes de distribution en taille ou en nombre. Ces déterminations font appel à la géométrie intégrale et s'appliquent à des particules ou objets isolés auxquels on associe des paramètres (surfaces, périmètres, projections, etc...) directement mesurables, à condition d'avoir une image d'origine de qualité suffisante (contraste, netteté). Mais souvent, les images sont bruitées (structure réelle masquée par la superposition d'un bruit aléatoire) ou bien les limites entre les objets sont floues... De ce fait, la première partie de l'analyse qui est la détection et la séparation des objets devient difficile par le simple procédé qui utilise l'intensité du signal en un point ou en son voisinage immédiat.

L'amélioration de la qualité des images peut se faire actuellement grâce au stockage en niveaux de gris et aux possibilités de modification de l'image. On procède ainsi à une analyse de gradient (Beucher 1981, Nawrath et al., 1979).

Les transformations d'images, permettant l'accès à des grandeurs nouvelles, font appel à des opérations linéaires (transformées de Fourier par exemple, pour ajouter des fonctions ajoutables ou faire des filtrages), ou à des opérations non linéaires, qui mettent en oeuvre les outils de la Morphologie Mathématique basés sur les probabilités géométriques. L'objet n'est plus alors considéré comme déterminé, mais comme une structure aléatoire. A chaque point de celle-ci, on associe un autre objet plus simple : l'élément structurant, dont on détermine s'il appartient ou non à l'objet lui-même, ou bien au fond. On obtient ainsi une nouvelle image dans laquelle l'information a été simplifiée, mais où la répétition de l'analyse précédente permet la mesure de paramètres inaccessibles dans l'image d'origine : distribution des distances entre proches voisins, extension de la notion de granulométrie à un milieu interconnecté, détermination de zones d'influence, etc... La simplification de l'image d'origine en ses éléments structuraux essentiels permet de comparer et de classer des individus de forme complexe.

En science de la terre, les nouvelles grandeurs accessibles à l'aide des éléments structurants sont déjà utilisées pour les caractérisations géométriques de la porosité dans les roches (Gateau, 1973) ou dans les géotextiles (Massouave et al., 1980) et également pour la fracturation. Les fractures sont alors triées selon leur direction et leur longueur, et la morphologie de l'espace interfractural peut être définie.

L'analyse en niveaux de gris ouvre des perspectives intéressantes dans la détection des minéraux dans les roches et éventuellement dans le traitement direct de clichés comme les photographies aériennes.

Ultérieurement, les systèmes d'analyse pourront traiter des images en vraies couleurs, élargissant encore les domaines d'application. Cette extension sera d'une très grande utilité pour le géologue qui se réfère souvent aux couleurs des différents minéraux.

## BIBLIOGRAPHIE

---

- ANTOINE P., FABRE D. (1979) - Réflexions sur le rôle et l'orientation des études de fracturation pour la fondation d'un barrage en béton (exemple du site de Vinça, en terrain granitique, dans le Sud de la France). Bull. Ass. inter. Géol. Ing., 20, 40-44.
- AYRTON S.N., RAMSAY J.G. (1974). - Tectonic and Metamorphic Events in the Alps. Schweiz.Min. Pet. Mitteilungen., 54, 2-3, 609-639.
- BARBERY G., PREVOSTEAU J.M. (1976). - La Minéralogie quantitative. Ann. des Mines., 51-60.
- BERTHE D., CHOUKROUNE P., GAPAIS D. (1979). - Orientations préférentielles du quartz et orthogneissification progressive en régime cisailant : l'exemple du cisaillement sud-armoricain - Bull. Mineral., 102, 265-272.
- BERTHE D., BRUN J.P., (1980) - Evolution of folds during progressive shear in the south Armorican Shear Zone, France Jnl. Structural. Geol. Vol. 2,1-2, pp. 127, - 133.
- BEUCHER S. (1981). - Transformations morphologiques séquentielles et propriétés topologiques des fonctions de gris - Réunion de section française de la Société de Stéréologie - Paris.
- BOUCHE P., POULET M. (1971). - Méthode et exemple d'étude sur photographies aériennes de la fracturation naturelle des carbonates - Rev. I.F.P., XXVI, 1, 3-21.
- BOUCHEZ J.L. (1977). - Le quartz et la cinématique des zones ductiles - Thèse Etat, Nantes.
- BOUCHEZ J.L., PECHER A. (1976). - Plasticité du quartz et sens de cisaillement dans des quartzites de Grand Chevauchement Central himalayen. Bull. Soc. Géol. France, 7, XVIII, 6, 1377-1385.
- CABY R., (1973). - Les plis transversaux dans les Alpes occidentales : implications pour la genèse de la chaîne alpine. Bull. Soc. Geol. France, (7), XV, 5-6, 624-634.
- CARRERAS J., ESTRADA A., WHITE S., (1977). - The effects of folding on the C-axis fabrics of a quartz mylonite. Tectonophysique, 39, 1-3, 3-24.
- CAYE R., PIERROT R., RAGOT J.P., PREVOSTEAU J.M., (1970). - Méthodes de visualisation des milieux poreux en vue de leur analyse quantitative au microscope - Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristallogr., 93, 571-578.

- CHEROTZKY G. (1976). - L'analyse chimique des roches et le compteur des points. Mines et Géologie, 40, 61-64.
- CHONE J. (1978). - Echantillonnage de billettes de coulée continue en vue de la description de la structure interne et de la propriété inclusionnaire. Inter. Symp. on Quantitative Metallography. Florence
- COBBOLD P.R., QUINQUIS H., (1980). - Development of sheath folds in shear regime. Jnl Struct. Geol., 2, 1-2, 119-126.
- DAROT M., (1973). - Méthodes d'analyse structurale et cinématique. Application à l'étude du massif ultrabasique de la Sierra Bermeja (Serrania de Ronda-Andalousie. Espagne). Thèse 3ème cycle, Nantes.
- DAYRE M., FABRE D., LETOURNEUR J., ANTOINE P., ORENGO Y., (1978). - Proc. III Intern. Congress I.A.E.G. Sept. 1978, II,2, 131-139.
- DE HOFF R.T., RHINES F.N., (1972). - Microscopie quantitative. Masson Ed.
- DELESSE A., (1848). - Procédé mécanique pour déterminer la composition des roches. Ann. Mines, (IV), 13, 379.
- DROGUE C., MAS G., GRILLOT J.C., LLORIA C., GUERIN R., (1975). - Utilisation du filtrage optique pour l'étude de la fracturation des roches carbonatées en hydrogéologie. Rév. Géog. Phys. Géol. dyn., 2, XVII, 1,39-44.
- ETCHECOPAR A. (1974). - Simulation par ordinateur de la déformation progressive d'un agrégat polycristallin. Etude du développement de structures orientées par écrasement et cisaillement. Thèse 3ème cycle, Nantes.
- FISHER C. (1971). - The new Quantimet 720. The microscope, 19, 1, 1-20.
- FONTANEL A., GRAU G., LAURENT J., MONTADERT L., (1967). - Méthode d'étude et dépouillement des photographies aériennes par diffraction de la lumière cohérente issue d'un laser. Soc. Franc. photogram. 25, 13-22.
- GATEAU C. (1978). - L'analyse quantitative d'images et ses applications à la minéralogie - Bull. Minéral., 101, 305-314.
- GATEAU C., PINAULT J.L. PREVOSTEAU J.M. (1973). - Exploitation d'un analyseur d'images à l'étude de la structure d'un matériau. Pure structure and properties of materials. Coll. Inter. Rilem/IUPAC, Prague.
- GATEAU C., HALFON J., LOUIS C., PREVOSTEAU J.M. (1975). - Paramètres de quantification de la fracturation par analyse d'images. Journées nationales géotechniques - Orléans La Source.

- GATEAU C. PREVOSTEAU J.M. (1975). - Size distribution analysis in situ on individual or interconnected phases by image analysis. 4ème congrès de la Stéréologie, Washington.
- GATEAU C. PREVOSTEAU J.M. (1977). - Examples of the application of new possibilities for automatic image analysis. Symposium "Analyse quantitative des microstructures en Sciences des Matériaux, Biologie et Médecine" - Caen.
- GAVIGLIO P., (1980). - La fracturation dans le gisement de lignite du bassin de l'Arc. R.I.M. 93-99.
- GRILLOT J.C., (1977). - A propos de méthodologies d'analyses quantitatives, à l'échelle régionale, de champs de fractures : premiers résultats d'une application. Rev. Geog. Phys. Géol. dyn., 2, XIX, 3, 219-234.
- GRUNEISEN P., HIRLEMANN G., JANOT P., RUHLAND M. (1973). - Analyse de la fracturation naturelle d'une structure plissée : l'Anticlinal de la Lance (Drôme). Sci. Géol. Bull., 26, 2-3, 161-186.
- GUESSOUS Z., (1981). - Comportement mécanique des roches fissurées : étude en traction directe d'un marbre de Carrare préfissuré thermiquement. Thèse 3ème cycle Grenoble.
- HANCOCK P.L. (1972). - The analysis of "en échelon" veins. Geol. Mag., 109, 3, 175-182.
- HARVEY R.D., STEINMETZ J.C., (1971). - Petrography of carbonate rocks by image analysis. Proc. 7 th forum of phosphate dolomite limestone and clay deposits. 161-170.
- HENRY M., (1980). - Le traitement optique des images. Pour la Science - 29, 14-28.
- HERSANT T., JEULIN D., (1975). - L'échantillonnage dans les analyses quantitatives d'images. Rapport IRSID, p. 241.
- HOBBS B.E., MEANS W.D., WILLIAMS P.F. (1976). - An outline of structural geology. Wiley. Ed. Intern.
- JACQUIN C., (1964). - Corrélations entre la perméabilité et les caractéristiques géométriques du grès de Fontainebleau. Rev. I.F.P., 7-8, 921-937.
- JAMIER D., SIMEONI G.P., (1979). - Etude statistique de la distribution spatiale des éléments structuraux dans deux massifs des Alpes helvétiques. Conséquences pour l'hydrogéologie karstique. Bull. B.R.G.M. 2ème série., III, 1, 67-76.

- JEULIN D., (1978). - Etude des voisinages entre phases d'un solide multi-phasé à l'aide des surfaces spécifiques de contact. Application aux agglomérés de minerais de fer. Inter. Symp. on Quantitative Metallography. Florence.
- KARCZ I., DICKMAN S.E., (1979). - Determination of fracture intensity. Tectonophysics, 56, T1-T7.
- LAURENT P., ETCHECOPAR A., (1976). - Mise en évidence à l'aide de la fabrication du quartz d'un cisaillement simple à déversement ouest dans le massif de Dora Maira (Alpes occidentales). Bull. Soc. Geol. France. 7, XVIII, 6, 1387-1393.
- LE DOUSSAL H, BISSON G. (1978). - Applications de l'analyseur d'images "Quantimet 720" à l'étude de la porosité des produits céramiques. Bull. Soc. Franc. Cérami., 118, 3-15.
- LISTER G.S., HOBBS B.E., (1980). - The simulation of fabric development during plastic deformation and its application to quartzite : the influence of deformation history. Jnl. Struct. Geol. 2, 3, 355-370.
- LISTER G.S., WILLIAMS P.F., (1979). - Fabric development in shear zones : theoretical controls and observed phenomena. Jnl. Struct. Geol. 1, 4, 283-297.
- LOCQUIN M., LANGERON M. (1978). - Manuel de microscopie . Masson ed.
- MAIRE Ph. GILLES P., (1977). - Caractérisation des réseaux linéaires par la rose des directions. Symp "An. Quantitative des Microstructures en Sciences des Mat., Biol, Medecine". Caen.
- MALAVIEILLE J., (1982). - Etude tectonique et microtectonique de la déformation ductile dans de grands chevauchements crustaux : exemple des Alpes franco-italiennes et de la Corse - Thèse 3ème cycle Montpellier.
- MASSOUNAVE J., ROLLIN A.L., DENIS R., (1980). - Prediction of permeability of non woven geotextiles from morphometry analysis. Journal of Microscopy, 121, 1, 99-110.
- MATHY H., (1975). - Coupling an image analyser with a Scanning Electron Microscope. Symposium "Fortschritte der Quantitativen Bildanalyse" Frankfurt.
- MATHY H., GREDAY T., (1978). - Relations entre la microstructure et la résistance à la rupture d'aciers de construction métallique. Inter. Symp. on Quantitative Metallography. Florence.
- MATTAUER M., MERCIER J.L., (1980). - Microtectonique et grande tectonique. Mém. h. sér. Soc. Géol. de France, 10, 141-161.
- MINNIGH L.D., (1979). - Structural analysis of sheath-folds in a meta-chert from the Western Italian Alps. Journal of Structural Geology, 1, 4, 275-282.



- MOLINA J.P., (1981). - Caractérisation de la fissuration des roches par amortissement d'ondes ultrasonores. Thèse 3ème cycle Grenoble.
- MURPHY C.P., BULLOCK P., TURNER R.H. (1977). - The measurement and characterisation of voids in soil thin sections by image analysis. Jnl of Soil Science, 28, 498,-520.
- NAZARE S., ONDRACEK G., (1974). - Automatic Image Analysis in Materials Science. The microscope, 22, 39-58.
- NAZARE S. ONDRACEK G., (1969). - Polarized light and Dark field illumination in quantitative structure analysis. Practical Metallography. 6, 12, 742-746.
- NAWRATH R., SERRA J., (1979). - Quantitative image analysis : Theory and instrumentation. Microscopica Acta, 82, 2, 101-111.
- NICOLAS A., POIRIER J.P. (1976). -Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks. Ed. Wiley-Interscience, Londres, 444 p.
- PECHER A., (1978). - Déformations et métamorphisme associés à une zone de cisaillement. Exemple du grand chevauchement central himalayen (M.C.T.), Transversale des Annapurnas et du Manaslu, Népal - Thèse Grenoble.
- PIJOLAT B., GAY M.,GRATIER J.P.,VIALON P., (1981). - Les variations des valeurs de la déformation dans un système de plis par cisaillement. Rev. Géol. dyn. et géog. phys., 23, 3, 195-201.
- POIRIER J.P. (1976). - Les mécanismes physiques microscopiques de la déformation plastique des minéraux et des roches. Bull. Soc. géol. France, 7, XVIII, 6, 1371-1376.
- PREVOSTEAU J.M., (1971). - Analyse quantitative physique et géométrique de l'espace poreux des matériaux. Application aux roches gréseuses. Thèse Orléans.
- PREVOSTEAU J.M.,(1976). - L'analyse quantitative d'images. Spectra 2000, 25, 33-37.
- PRICE G.P., (1973). - The photometric method in microstructural analysis. Am. Jnl. Sci. 273, 523-537.
- PRICE G.P., (1980). - The analysis of quartz c-axis fabrics by the photometric method - Jnl of geology, 88, 181-195.
- QUIBLIER J., (1980). - Une méthode rapide d'estimation de la fracturation des roches à l'affleurement. Rev. I.F.P. XXXV, 1, 141-150.

- QUINQUIS H., AUDREN Cl. BRUN J.P., COBBOLD P.R., (1978). - Intense progressive shear in Ile de Groix blueschists and compatibility with subduction or obduction. *Nature*, 273, 43-45.
- RABU D., CASTAING C., (1978). - Fracturation et microfissuration des roches granitiques. Influence sur le degré d'exploitabilité. 6ème réunion Annuelle des Sciences de la Terre.
- RAMSAY J.G., (1967). - Folding and fracturing of rocks. Mc Graw Hill, Ed., New York, 568 p.
- ROBERT J.P., (1976). - Les décrochements, fracturations et mouvements de blocs associés. Exemples des massifs subalpins dauphinois. Thèse 3ème cycle Grenoble.
- ROBERT J.P., VIALON P., (1976). - Déformation interne et déformation aux limites dans un assemblage de blocs découpés par un cisaillement. Le clivage schisteux des niveaux structuraux supérieurs. *Bull. Soc. Geol. France*, 7 XVIII, 6, 1599-1604.
- ROCHE R., (1968). - Metallographie microscopique quantitative. Etude critique du microscope quantitatif Quantimet. Exemples d'application. *Métaux. Corrosion Industrie*, 510, 49-79.
- RUHLAND M., (1973). - Méthode d'étude de la fracturation naturelle des roches associée à divers modèles structuraux. *Sci. Géol., Bull.*, 26, 2-3, 91-113.
- SALTIKOV S.A., (1958). - Stereometric Metallography. 2nd ed. Metallurgizdat, Moscow.
- SOUQUET P., PEYBERNES B., BILLOTTE M., DEBROAS E.J. (1977). - La chaîne alpine des Pyrénées. *Géologie Alpine*, 53, 2, 193-216.
- TCHALENKO J.S., AMBRASEYS N.N., (1970). - Structural analysis of the Dasht.e Bayag (Iran) earthquake fractures. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81, pp. 41.60.
- TOURENQ Cl., (1969). - La microfissuration des roches. *Bull. Liaison Ponts et Chaussées*, 36, p. 26-29.
- TULLIS J., CHRISTIE J.M., GRIGGS D.T., (1973). - Microstructures and preferred orientations of experimentally deformed quartzites. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, P. 297-314.
- TURNER F.J., WEISS L.E., (1963). - Structural analysis of metamorphic tectonites. Mac Graw-Hill Ed.
- UNDERWOOD E., (1970). - Quantitative stereology. Addison-Wesley.
- VIALON P., (1966). - Etude géologique du massif cristallin Dora Maira, Alpes cottiennes internes, Italie- Thèse Grenoble.

VIALON P., (1979). - Les déformations continues-discontinues des roches anisotropes. *Eclogae geol. Helv.*, 72/2, p. 531-549.

VIALON P., RUHLAND M., GROLIER J., (1976). - *Eléments de tectonique analytique.* Masson ed.

Dernière page d'une thèse

---

VU

Grenoble, le 22 juin 1982

Le Président de la thèse



Vu, et permis d'imprimer,

Grenoble, le 23.6.82

Le Président de l'Université Scientifique et Médicale

Le Président :  
M. TANCHE

