



HAL
open science

Etude paléomagnétique et déformation inverse de l'aimantation de séries naturelles déformées : les schistes rouges des Alpes-Maritimes et du Col du Somport (Pyrénées Occidentales).

Jean-Pascal Cogné

► To cite this version:

Jean-Pascal Cogné. Etude paléomagnétique et déformation inverse de l'aimantation de séries naturelles déformées : les schistes rouges des Alpes-Maritimes et du Col du Somport (Pyrénées Occidentales).. Géophysique [physics.geo-ph]. Université de Rennes 1 [UR1], 1983. Français. NNT : . tel-01759129

HAL Id: tel-01759129

<https://insu.hal.science/tel-01759129>

Submitted on 5 Apr 2018

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.

étude paléomagnétique et déformation inverse
de l'aimantation de séries naturelles déformées.

les schistes rouges des alpes-maritimes et
du col du somport (pyrénées occidentales).

jean-pascal coigné
rennes 1983

14 DEC. 1983



SERIE : C
N° d'ordre : 807
N° de série : 312

INSTITUT de GEOLOGIE de RENNES	
Numero d'inventaire Bibliothèque	3373

THÈSE
présentée

DEVANT L'UNIVERSITE DE RENNES I

U.E.R. STRUCTURE ET PROPRIÉTÉS DE LA MATIÈRE

pour obtenir

le titre de DOCTEUR en TROISIÈME CYCLE.

Spécialité : GÉOLOGIE

MÉTHODE D'ÉTUDE DES SOCLES

OPTION : GÉOPHYSIQUE INTERNE ET GÉOLOGIE STRUCTURALE

par

JEAN-PASCAL COGNÉ

Sujet de la thèse : Etude paléomagnétique et déformation inverse de l'aimantation de séries naturelles déformées : les schistes rouges des Alpes-Maritimes et du Col du Somport (Pyrénées Occidentales).

Soutenue le 28 Octobre 1983 devant la Commission d'Examen.

MM. N. BONHOMMET

Président

P. COBBOLD

D. GAPAIS

C. LAJ

Examineurs

W. LOWRIE

INSTITUT de GÉOLOGIE de RENNES	
Numero d'inventaire Bibliothèque	3373



UNIVERSITE de RENNES I

Année 1982-1983

U.E.R. "Sciences et Philosophie"

Doyens Honoraires

M. MILON Y.
M. LE MOAL H.
M. MARTIN Y.
M. BOCLE J.

Professeurs Honoraires

M. FREYMANN R.
M. ROHMER R.
M. MILON Y.
M. SALMON-LEG AGNEUR F.
M. VALLET p.
M. PHILIPPOT A.
M. VENE J.
Mlle CHARPENTIER M.
M. VACHER M.
M. VILLERET S.
M. VIGNERON L.
M. LE MOAL H.
M. PELTIER D.
Mlle DURAND S.
M. LE BOT J.

Maîtres de Conférences Honoraires

M. GRILLET L.
Mlle HAMON M. R.

/...

MATHEMATIQUES et INFORMATIQUE

Professeurs

Mme ANDRE Françoise
 Mme BERLINE Nicole
 M. BERTHELOT Pierre
 M. BREEN Lawrence
 M. CAMUS Jacques
 M. CONZE Jean-Pierre
 M. COSTE Michel
 M. CROUZEIX Michel
 M. FERRAND Daniel
 M. GIORGIUTTI Italo
 M. GUERINDON Jean
 M. GUIVARCH Yves
 M. HOUEBINE Jean
 M. KOTT Laurent

M. LEGOUPIL Jean
 M. LENFANT Jacques
 M. LERMAN Israël
 M. MARIE Raymond
 M. MARTIN Yves
 M. METIVIER Guy
 M. MIGNOT Alain
 M. SEGUIN Jean (IUT Lannion)
 M. TOUGERON Jean-Claude
 M. TOURNEMINE Georges
 M. TRILLING Laurent
 M. VERJUS Jean-Pierre
 M. WOLF Jacques (IUT Lannion)

Docteurs d'Etat

Mme ALLAIN Marie-France
 M. CIAVALDINI Jean-François
 M. GRAS Régis
 M. HENNION Hubert
 Mme LEROUX Marie-Noëlle
 M. MEMIN Jean
 M. MERRIEN Jean
 M. NOURRIGAT Jean-François
 M. PERRIN Gérard

PHYSIQUE

Professeurs

M. ARQUES Pierre-Yves
 M. BARON Alexis (IUT Rennes)
 M. BENIERE François
 M. BERTEL Louis (IUT Lannion)
 M. BOULET Christian
 M. BRUN Pierre
 M. COLIN Yves (IUT Rennes)
 M. CORAZZA M. (IUT Lannion)
 M. DECAMPS Edmond-Antoine
 M. DUBOST Gérard
 M. DURAND Alain
 M. FOUCHE F. (IUT Rennes)
 M. GROSVARD (IUT Rennes)
 M. GUIDINI Joseph
 M. HAEUSLER Claude
 M. LE MEN J.F.
 (IUT Lannion)

M. LEROUX Emile
 M. LE TRAON André
 M. LEVASSEUR Michel
 (IUT Rennes)
 M. MALHERBE J.C. (IUT L)
 M. MEINNEL Jean
 M. MEVEL Jean Yves
 M. NUSIMOVICI Michel
 M. RIAUX Eugène
 (IUT Rennes)
 M. ROBIN Stéphane
 Mme ROBIN Simone
 née SALOMOND
 M. STEPHAN Guy
 M. TERRET Claude
 M. VEZZOSI Georges

M. BALCOU Yves
 M. BAUDOUR Jean
 M. BERNARD
 Dominique
 M. BESNIER Gilbert
 M. BOULIOU Alain
 M. CAILLEAU Hervé
 M. CARO B (IUT L)
 M. CHAGNEAU
 (IUT Rennes)
 M. CHARBONNEAU
 M. DAUDE André
 M. DEFRANCE André
 M. ECOLIVET Cl.
 M. GOMET J. Claude
 M. GOULPEAU Louis

Docteurs d'Etat

M. HAGENE Bernard
 Mme HAGENE Monique
 M. LAMBERT B. (IUT Lannion)
 M. LANGOUET Loïc
 M. LARVOR Maurice
 M. LECLEACH (IUT Lannion)
 M. LE DOUCEN Roger
 M. LE FLOCH Albert
 M. LEMONNIER Jean Claude
 M. LENORMAND J-Michel
 M. MESSENGER J-Claude
 M. PILET Jean Claude
 M. POEY Pierre
 M. PRIOL Marcel
 M. RABACHE P. (IUT Lannion)
 M. REBOURS B. (IUT Lannion)
 M. T'KINT de ROODENBEKE
 Amaury (IUT Rennes)
 M. TONNARD F. (IUT R.)

/...

CHIMIE

Professeurs

M. BARIOU B. (IUT Rennes)
 M. BRAULT A. (IUT Rennes)
 M. CARRIE Robert
 M. DABARD René
 M. DIXNEUF Pierre
 M. FOUCAUD André
 M. GRANDJEAN Daniel
 M. GUERILLOT Claude
 M. HAMELIN Jack
 M. LANG Jean

M. KERFANTO M. (ENSCR)
 M. LE CORRE Maurice
 M. LE GUYADER Michel
 (IUT Rennes)
 M. LEVAS Emile
 M. LUCAS Jacques
 M. MARTIN Guy (ENSCR)
 M. MAUNAYE Marcel
 (ENSCR)
 M. TALLEC André

M. AUFFREDIC J.P.
 Mme BARS Odile
 née BEAULIEU
 M. BOTREL Alain
 Mme DANION Renée
 née BOUGOT
 M. BROCHU Robert
 M. CAILLET Paul
 M. CAREL Claude
 Mme POMMERET
 née CHASLE M.F.
 (IUT Rennes)
 M. CORRE François
 M. DANION Daniel
 M. DARCHEN André
 M. DORANGE Gérard
 (ENSCR)
 M. FAYAT Christian
 M. GADREAU Claude
 M. GAUDE Jean
 Mme LOUER M.
 née GAUDIN
 M. GORGUES Alain
 M. GUERIN Roland
 M. GUILLEVIC Joseph
 M. HAZARD Roland
 Mme PAPILLON
 Denise née JEGOU
 (IUT Rennes)
 M. JOUCLA Marc
 M. JUBAULT Michel
 M. LAPLANCHE A.
 (ENSCR)
 M. LAURENT Yves
 M. LEBORGNE Guy
 M. LE COQ André
 M. LE FLOCH Yves
 (ENSCR)
 Mme UTJES Monique
 née LE GALL

Docteurs d'Etat

Mme RIVET Paulette
 née LE GUELLEC
 Mlle LEPLOUZENNEC M.
 M. LISSILOUR Roland
 M. MARTELLI Jacques
 M. MEYER André
 M. MOINET Claude
 M. MORVAN Jean (ENSCR)
 M. NICOLLON des
 ABBAYES Hervé
 M. PATIN Henri
 M. PERSON Hervé
 Mme BERNARD de
 COURVILLE Annick
 née PICHEVIN
 M. PICOUAYS Bernard
 M. PLUSQUELLEC
 Daniel (ENSCR)
 M. POCHAT Francis
 M. POULAIN Marcel
 M. PRIGENT Yves
 (IUT Rennes)
 M. RAOULT Eugène
 M. RAPHALEN Désiré
 (ENSCR)
 M. RAULET Claude
 M. ROBERT Albert
 Mme CARLIER J.
 née ROLLAND (IUT R)
 M. SAILLARD J. Yves
 M. SARRAZIN Jean
 M. SOYER Noël
 (IUT Rennes)
 M. VENIEN Frédéric
 (ENSCR)
 M. VERDIER Patrick

CHIMIE BIOLOGIQUE

Professeurs

M. DAVID Jean Claude
 M. DUVAL Jacques

Docteurs d'Etat

M. KERCRET Henri
 M. MERCIER Louis
 M. VALOTAIRE Yves

/...

GEOLOGIE

Professeurs

M. BONHOMMET Norbert
M. CHAUVEL Jean Jacques
M. CHOUKROUNE Pierre
M. COGNE Jean

M. HAMEURT Jean Marie
M. JAHN Bor Ming
M. LARDEUX Hubert
M. WILLAIME Christian

M. AUVRAY Bernard
M. BRUN Jean Pierre
Mme ESTEOULE
Janine née CHOUX
M. HENRY Jean Louis
Mme MORZADEC M.T.
née KERFOURN

Docteurs d'Etat

M. LE CORRE Claude
M. LEFORT Jean Pierre
M. LOUAIL Jacques
M. MORZADEC Pierre
Mme OLLIVIER M.F.
née PIERRE

ZOOLOGIE

Professeurs

M. ALLEGRET Paul
M. FOLLIOU Roger
M. GAUTIER Jean Yves
M. GOURANTON Jean
M. JOLY Jean Marie
M. MAILLET Pierre

M. MANIEY Jacques
M. NENON Jean Pierre
M. PICHERAL Bertrand
M. RAZET Pierre
M. TREHEN Paul

M. BARBIER Roger
M. BERNARD Jean
M. BOISSEAU Claude
M. CHAUVIN Georges
M. COILLOT J.Pierre
M. DAGUZAN Jacques
M. DENIS Christian
M. GOURRET J.Pierre
Mme HUBERT Monique
née GUERGADY

Docteurs d'Etat

M. GUILLET Jean Claude
M. GUYOMARC'H J.Charles
M. HAMON Claude
M. JEGO Patrick
Mme URVOY Jeanne
née LE MASSON
M. MICHEL Raoul
M. WROBLEWSKI Henri

BOTANIQUE

Professeurs

M. CITHAREL Jean
M. CLAUSTRES Georges
Mlle GOAS Gabrielle
Mlle GOAS Marie

M. HUON André
M. LEFEBVRE Gérard
Mme LEMOINE Cécile
M. TOUFFET Jean

M. BERNARD Th.
M. BERTRU Georges
M. BRIENS Marcel

M. LE COHU René
M. LE RUDULIER Daniel
M. SAVOURE Bernard

PHILOSOPHIE

Professeurs

M. DELEULE Didier
M. JACQUES Francis

M. ORTIGUES Edmond
M. VETO Miklos

Docteurs d'Etat

M. CLAIR André

PERSONNEL C.N.R.S.Directeurs de RechercheMaîtres de RechercheChargés de Recherche

MATHÉMATIQUES

M. CREPEL Pierre
M. HARDY Jean

INFORMATIQUE

M. DARONDEAU Philippe

CHIMIE

M. BIGORGNE Mickaël

M. CHEVREL Roger
M. GREE René
M. SERGENT Marcel
M. SIMONET JacquesM. BATAIL Patrick
M. DENES Georges
M. FONTENEAU G.
M. GUYADER Jean
M. L'HARIDON P.
M. LOUER Daniel
M. MARCHAND R.
M. MARTIGNY P.
M. MATECKI M.M. MOREL Georges
M. NOEL Henri
M. PADIOU Jean
M. PANNETIER Jean
M. PENA
M. PERRIN André
M. POTEL Michel
M. SIMONNEAUX Gérard
M. VAULTIER Michel

PHYSIQUE

M. DANG TRAN Quan
M. SANQUER Marc

GEOLOGIE

M. CAPDEVILLA Raymond
M. COBBOLD Peter
M. VIDAL PhilippeM. AUDREN Claude
M. BERNARD-
GRIFFITHS Jean
M. PARIS Florentin
M. ROBARDET Michel

ETHOLOGIE

Mme CLOAREC Anne
M. VANCASSEL Michel
M. VIDAL Jean Marie

ZOOLOGIE

Mme GAUTIER Annie

M. GAUTIER Jean-Pierre

ANTHROPOLOGIE

M. GIOT Pierre-Roland

M. BRIARD Jacques

M. MONNIER Jean Laurent

S O M M A I R E

Symboles, abréviations, conventions	1
INTRODUCTION	2
PREMIÈRE PARTIE : GÉNÉRALITÉS	
CHAP. I : GENERALITES, PROBLEMES POSES PAR LA DEFORMATION EN PALEOMAGNETISME	3
I. Le test du pli et ses développements	3
II. Déformation interne et magnétisme	5
III. Modélisation	5
1. Présentation des modèles	
2. Conclusion	
IV. Exemples naturels traités	6
1. Critères de choix	
2. Présentation sommaire des terrains étudiés	
CHAP. II : QUANTIFICATION DE LA DEFORMATION	8
I. Déformation - rappels et définitions	8
1. Déformation interne	
2. Déformation homogène et hétérogène	
3. Ellipsoïde et tenseur de déformation finie	
4. Comportement d'une ligne passive	
5. Comportement d'un plan passif	
II. Quantification de la déformation	12
1. Déformation interne	
2. Rotation rigide	
III. Déformation inverse du vecteur aimantation	16
CHAP. III : AIMANTATION DES SERIES ROUGES	18
I. Nature et origine de l'hématite dans les séries rouges	18
II. Rémanence des séries rouges	18
III. Méthodologie d'étude de l'aimantation des séries rouges	19
1. Prélèvements	
2. Mesures	
3. ARN - Test de viscosité	
4. Désaimantation thermique	
5. Désaimantation chimique	
6. Désaimantation par champ alternatif	
7. Minéralogie magnétique	
DEUXIÈME PARTIE : LES SCHISTES ROUGES DES ALPES MARITIMES ET DES PYRÉNÉES	
CHAP. I. : LES SERIES ROUGES DES ALPES MARITIMES	24
I. Situation - contexte géologique et paléomagnétique	24
II. Sites d'échantillonnage	25
III. Analyse quantitative de la déformation	26
1. Mesures - résultats	
2. Synthèse	
3. Estimation de la rotation rigide	
IV. Etude paléomagnétique	36
1. ARN	
2. Désaimantations : comportement magnétique	
a - Désaimantations thermiques	
b - Désaimantations chimiques	
c - Synthèse	
V. Déformation inverse	52
1. Interprétation de la dispersion intrasite	
2. Effet de la déformation inverse sur la dispersion intrasite	
3. Rotation rigide inverse : évolution de la distribution intersite	
VI. Conclusion.	

CHAP. II :	LE PLI	60
	I. Présentation - Sites	60
	II. Analyse quantitative de la déformation	61
	1. Mesures résultats	
	2. Synthèse	
	3. Estimation de la rotation rigide	
	III. Etude paléomagnétique	65
	1. ARN	
	2. Désaimantation chimiques	
	3. Résultats et interprétation	
	IV. Déformation inverse des vecteurs aimantations	72
	1. Effet sur la dispersion intrasite	
	2. Rotation rigide inverse	
	3. Comparaison avec quelques directions permienes	
	V. Influence d'une composante de perte de volume sur l'évolution de la dispersion intrasite	77
	VI Conclusion	80
CHAP. III :	LES SERIES ROUGES PERMO TRIASIQUES AU COL DU SOMPORT (PYRENEES OCCIDENTALES)	82
	I. Contexte géologique et paléomagnétique	82
	II. Sites d'échantillonnage	82
	III. Analyse quantitative de la déformation finie	83
	1. Caractères généraux	
	2. Mesures - Résultats	
	IV. Etude paléomagnétique	88
	1. ARN	
	2. Le site B	
	a - Désaimantations - comportement magnétique	
	b - résultats	
	c - discussion	
	3. Les autres sites	
	a - Désaimantations - comportement magnétique	
	b - Résultats - Interprétation	
	V. Conclusion	99
CHAP. IV :	LES ORIENTATIONS PREFERENTIELLES DE RESEAU DE L'HEMATITE	101
	1. Rappels	101
	2. Résultats - Interprétation	103
	3. Conclusion	106
	CONCLUSIONS	107
	BIBLIOGRAPHIE	
	ANNEXE : Tableaux de mesures.	

SYMBOLES - ABREVIATIONS

- Paléomagnétisme

- ARC, ARD, ARI, ARN, ARV, ATR : aimantation rémanente chimique, détritique, isotherme, naturelle visqueuse, thermorémanente.
- D, I : déclinaison, inclinaison du vecteur aimantation
- IS : direction d'aimantation In Situ (avant toute correction structurale)
- CP : après correction de pendage
- DDCP : après déformation inverse et correction de pendage
- J : intensité de l'aimantation rémanente
- H : intensité de champ magnétique
- k, α_{95} , R : paramètres statistiques (distribution fishérienne)
- V : coefficient de viscosité
- T : température
- hrs : heures (dans le cas des désaimantations chimiques)
- N_G, N_M : Nord géographique, magnétique

- Déformation

- $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$: valeurs propres du tenseur de déformation interne
- X Y Z : vecteurs propres associés à $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$
- $K = \ln(\lambda_1/\lambda_2)/\ln(\lambda_2/\lambda_3)$: paramètre de forme de l'ellipsoïde de déformation finie
- $r = (\lambda_1/\lambda_2) + (\lambda_2/\lambda_3) - 1$: paramètre d'intensité
- S_0, S_1 : plan de stratification, de schistosité
- L_0 ou L_{S_0/S_1} : linéation d'intersection S_0/S_1
- L_1 : linéation d'étirement

CONVENTIONS

- Toutes les directions sont données par rapport au Nord géographique.
- Mesures de plans : Direction (D) et Pendage (P) ;
- D : direction de l'horizontale du plan, donnée de manière à ce que la ligne de plus grande pente se situe à $D + 90$
- P : pendage de la ligne de plus grande pente compté à partir de l'horizontale
- Mesures de droites ou de vecteurs : Déclinaison (D) Inclinaison (I)
- Représentations graphiques des directions paléomagnétiques en projection stéréographique : symboles pleins : inclinaison positive (vers le bas) ; Symboles creux : inclinaison négative (vers le haut). Déclinaisons par rapport au Nord géographique.
- Projections orthogonales de Zijderveld : sauf spécifications, dans le repère In Situ par rapport au Nord magnétique. Symboles pleins : projection dans le plan horizontal
Symboles creux : projection dans le plan vertical.

INTRODUCTION

Depuis la démonstration par Runcorn (1956) de l'ouverture de l'Atlantique à l'aide des données paléomagnétiques d'Amérique du Nord et de l'Europe, l'outil paléomagnétique a été largement utilisé à l'intérieur des continents stables où les résultats ont été considérés comme applicables à l'ensemble du craton concerné. Après cette première étape, qui a grandement contribué à la compréhension du mouvement relatif des grandes plaques, le paléomagnétisme est apparu comme un outil précieux pour l'étude, à plus petite échelle, des bordures continentales, fournissant de nouvelles contraintes pour l'interprétation de l'évolution tectonique des chaînes de montagne (Van der Voo et Channel, 1980 ; Perroud, 1982). Cependant, des problèmes spécifiques à ce genre d'étude apparaissent, qui nécessitent une grande finesse d'analyse et d'interprétation des résultats.

Tout d'abord un problème d'analyse de l'origine de la rémanence et de ses composantes dans le cas d'aimantations multivectorielles. Ceci nous mène aux questions de datation, de réaimantations chimiques, thermiques, totales ou partielles, de minéralogie magnétique, etc... Ensuite, l'important problème de l'effet de la déformation sur l'aimantation, en particulier dans le cas de roches ayant une forte déformation interne. Bien qu'évoqué à de multiples reprises, ce problème de la déformation interne n'a jamais été étudié dans des séries naturelles, la présence de telles déformations constituant plutôt un critère de rejet de ces séries pour un travail paléomagnétique (Van der Voo et Channel, 1980).

Sans négliger le premier aspect d'analyse qui constitue la base même de l'acquisition de données paléomagnétiques, je m'attacherai donc dans ce mémoire à approfondir l'étude des effets induits par la déformation interne sur l'orientation de la rémanence naturelle de quelques exemples de roches déformées ; en particulier, je me propose de tester un modèle de comportement passif de l'aimantation durant la déformation.

1^o partie :

généralités

CHAPITRE I - GENERALITES, PROBLEMES POSES PAR LA DÉFORMATION EN PALEOMAGNETISME.

I - LE TEST DU PLI ET SES DEVELOPPEMENTS.

Dès 1949 Graham propose un test consistant à comparer les données paléomagnétiques dans les séries sédimentaires plissées avant et après déplissement de la couche par rotation d'un angle égal au pendage de celle-ci autour de l'horizontale du plan. La qualité du groupement des données avant ou après correction de pendage constitue un critère d'origine anté ou post-tectonique de l'aimantation (Mc Elhinny, 1964 ; Mc Fadden et Jones, 1981). Divers cas de figures théoriques ont été discutés par Perroud (1980) (Fig. 1) pour le comportement d'une aimantation syntectonique pendant le déplissement.

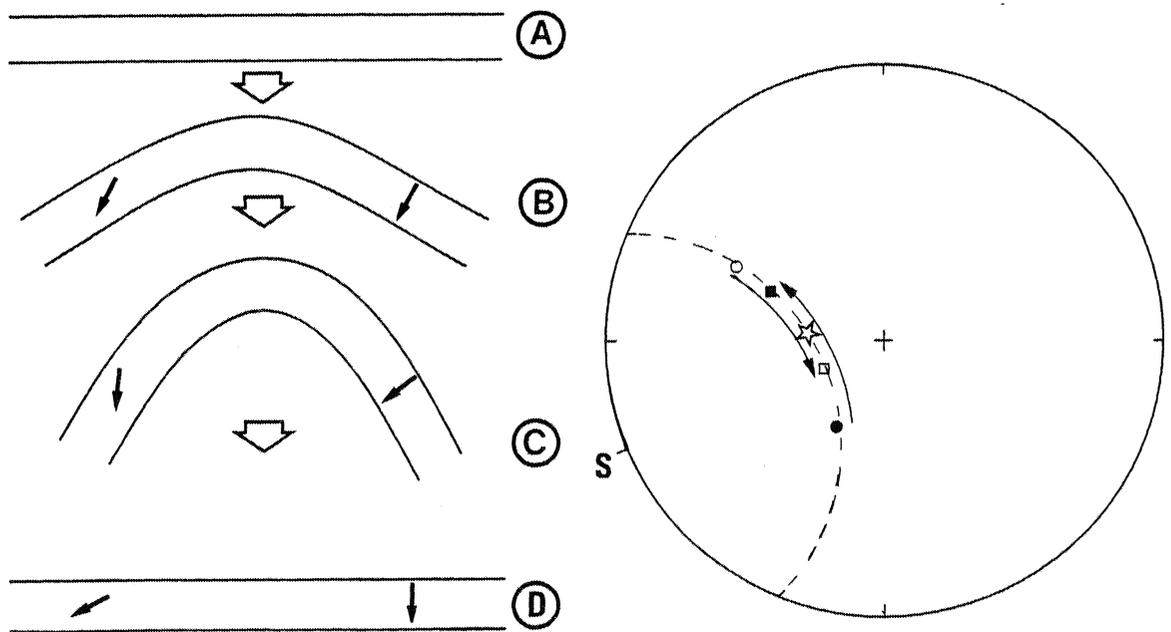


Fig. 1 - Aimantation syntectonique : A : avant acquisition de l'aimantation ; B : acquisition de l'aimantation en cours de plissement ; C : fin du plissement ; D : après retour à l'horizontale par correction de pendage. Stéréogramme : ronds (carrés) : avant (après) correction de pendage ; étoile direction du champ magnétique ; S : axe du pli.

Devant la complexité de certaines structures cette correction de pendage classique, nécessitant des plis à axe horizontal, a trouvé de récents développements pour tenir compte de plissements à axes inclinés ou de plis superposés. Ainsi, Bonhommet et al. (1981) montrent qu'il est possible d'obtenir de très bons résultats sur des séries ayant subi deux épisodes de plissements successifs, si l'on arrive à déterminer la chronologie de ceux-ci et à effectuer des déplissements successifs dans l'ordre inverse (Fig. 2).

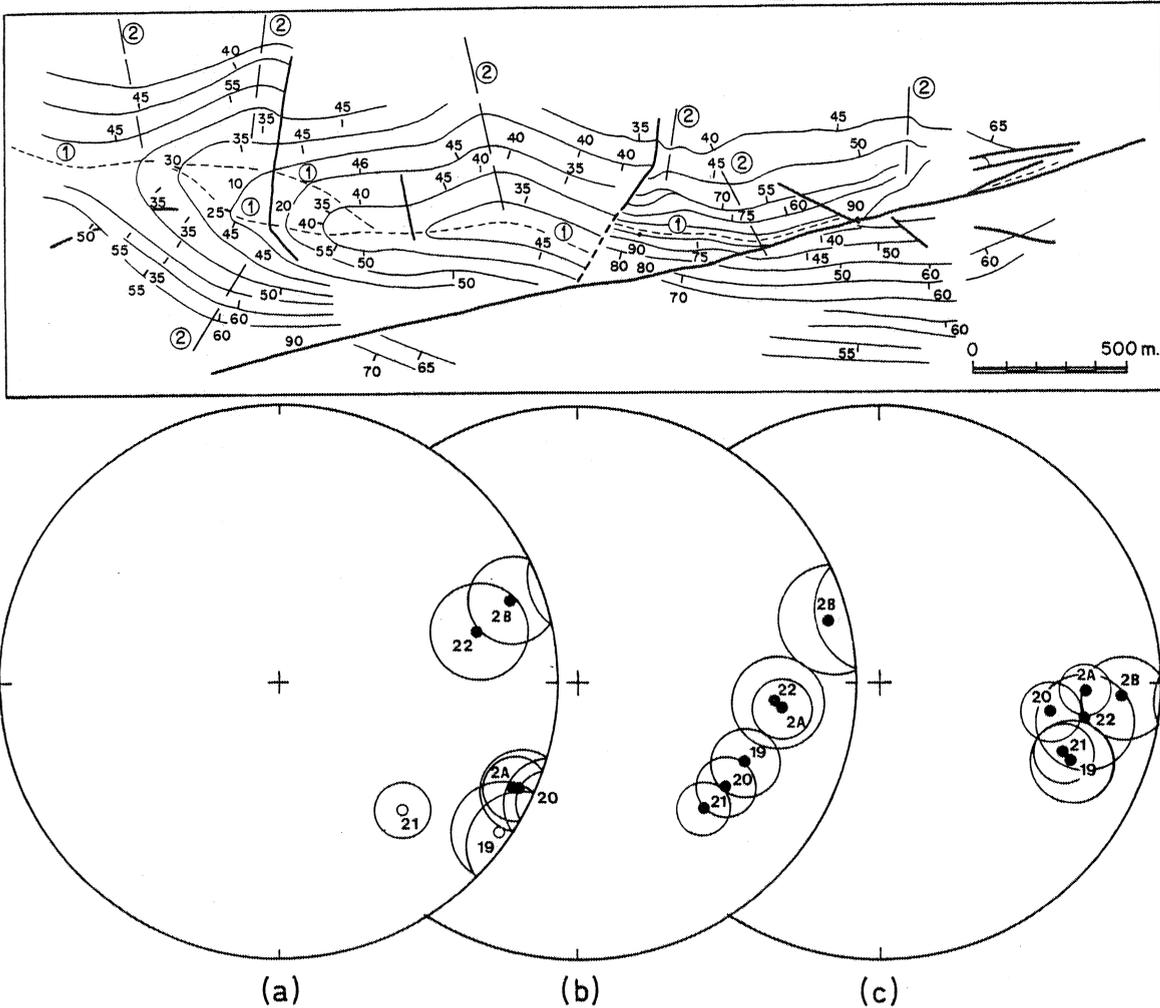


Fig. 2 - Résultats obtenus sur l'anticlinal de Villasecino (Arc Asturien) par Bonhommet et al. (1981). Carte : carte structurale schématique de la zone étudiée montrant la trace de la stratification (traits pleins) et son pendage en degrés, la trace axiale du pli de phase 1 et des plis de phase 2. Stéréogrammes : directions d'aimantation moyenne (ARN) de chaque site et leurs cercles de confiance (a) In Situ ; (b) correction de pendage classique ; (c) après déplissement successif des plis de phase 2 puis des plis de phase 1 (modèle F).

Divers cas de déformation comportant des composantes de rotations à axe vertical (cisaillements, failles, plissements non cylindriques) ou à axe incliné sont passés en revue par Mac Donald (1980).

Ces diverses méthodes mettent l'accent sur la nécessité d'une analyse structurale fine des sites échantillonnés lorsque l'on s'adresse à des séries déformées. Cependant, la déformation interne pose des limites importantes à ces traitements par rotation rigide. Il

apparaît donc nécessaire de pousser plus loin dans cette direction et d'essayer d'estimer si dans certains cas l'effet de la déformation interne sur l'orientation de l'aimantation peut être établi et s'il existe une possibilité de corriger ces effets pour retrouver la direction de l'aimantation antétectonique.

II - DEFORMATION INTERNE ET MAGNETISME.

La rotation des grains magnétiques durant la déformation, qu'il s'agisse de déformation "tectonique" ou de compaction, a deux conséquences principales :

- L'ellipsoïde d'anisotropie de susceptibilité magnétique a tendance à se paralléliser à l'ellipsoïde de déformation finie et de plus, à en avoir la forme (constriction, aplatissement). Depuis Ising (1943 in Nagata, 1961) cette propriété a été largement étudiée et un grand nombre d'études récentes s'attache à rechercher des corrélations quantitatives entre ellipsoïde de déformation finie et ellipsoïde d'anisotropie de susceptibilité magnétique, principalement dans les roches sédimentaires déformées (voir par exemple Kligfield et al., 1981 ; Henry, 1973 ; Van den Ende, 1977 ; Kneen, 1976, etc...)

- Par ailleurs, il est couramment admis que la déformation interne peut provoquer des déviations importantes de l'aimantation antétectonique (Irving, 1964 ; Van den Ende, 1977 ; Facer, 1983 ; Perroud, 1983 ; Kligfield et al., 1983). De ce fait, les roches visiblement déformées (schistes par exemple) ont été quasi-systématiquement écartées des études paléomagnétiques classiques. Par contre un problème largement débattu et non encore résolu est celui de l'effet de la compaction sur l'aimantation primaire d'un sédiment, qui peut être assimilée à la déformation d'une aimantation "antétectonique" pour une aimantation détritique, ou "syntectonique" dans le cas d'une aimantation chimique. Cette déviation, consistant essentiellement en une déviation de l'inclinaison vers le plan de dépôt, est généralement exprimée par :

$$\tan I_o = f \tan I_F$$

I_o : Inclinaison de l'ARN

I_F : Inclinaison du champ magnétique ambiant par rapport au plan de dépôt.

f est un coefficient de correction empirique déterminé par diverses modélisations (voir par exemple Irving, 1964 ; Blow et Hamilton, 1978 ; Bressler et Elston, 1980).

Bien que le problème ait été souvent soulevé, très peu de tentatives ont été faites pour essayer de trouver des corrélations entre déformation interne et déviation de l'aimantation rémanente antétectonique. La modélisation en laboratoire a jusqu'à présent été la seule méthode d'approche de ces phénomènes.

III - MODELISATIONS.

Les premiers travaux concernant le comportement de l'ARI acquise par des modèles de matériaux divers ont été récemment effectués pour des déformations isovolumiques en cisaillement pur (Kodama et Cox, 1978 ; Ozima, 1980) ou en aplatissement (Morash, 1981).

1. Présentation des modèles.

Le premier de ces modèles (Kodama et Cox, 1978) constitué d'une matrice de kaolinite contenant 0,03% de magnétite "en aiguille", ne montre aucune déviation cohérente de l'ARI par rapport aux axes de la déformation pour des raccourcissements jusqu'à 33 1/3%. Ceci est interprété par les auteurs comme dû au comportement cassant de ce matériau qui provoque une déformation discontinue à l'échelle du modèle. Les auteurs observent en effet le développement d'un

champ de fractures conjuguées englobant des blocs non déformés et, de ce fait, le vecteur aimantation résultant ne subit pas de déflexion notable.

Travaillant sur un alliage Cu-Co (2% dans le Co dans une matrice de Cu), Ozima (1980) obtient une déformation plastique de ses modèles en forme de disques de 0.38 cm de diamètre et 0.31 cm d'épaisseur soumis à une compression parallèle au plan du disque, les deux faces de celui-ci étant maintenu par des presses en acier. L'auteur observe une rotation systématique de l'ARI acquise à 1 T par le Cobalt vers l'axe d'allongement du modèle. Ceci est interprété par la rotation des particules supposées ellipsoïdales de Co, dont l'axe d'allongement s'oriente parallèlement à l'axe d'allongement de la déformation.

Les modèles de Morash (1981) sont constitués de grains d'hématite englobés dans une matrice de plasticine. Soumis à une contrainte uniaxiale provoquant une déformation plastique en aplatissement, ces échantillons synthétiques montrent que pour une fabrique magnétique initiale isotrope, l'ARI (à 1.25 T) se comporte comme un vecteur passif, aux erreurs expérimentales près quelle que soit l'orientation initiale entre ARI et axe de raccourcissement. ceci est interprété comme résultant de la réorientation passive des minéraux anisotropes d'hématite.

Enfin, une modélisation numérique bidimensionnelle a été effectuée récemment (Rochette, 1983) décrivant la déviation théorique d'une ARI et d'une ATR acquise avant ou après déformation, fonction du rapport d'anisotropie d'aimantation rémanente. Cependant ce modèle présente d'importantes limitations liées aux postulats de base : comportement passif des minéraux magnétiques (modèle de March) bidimensionnalité du modèle, anisotropie uniaxiale des grains, taille identique de tous les grains.

2. Conclusion.

Ces modèles montrent qu'il peut exister une relation cohérente entre déformation et déviation de l'aimantation rémanente antétectonique. Il apparaît donc nécessaire d'entreprendre des études spécifiques à ce type de problème dans des séries naturelles.

Dans ce mémoire, je m'efforcerai de tester l'hypothèse la plus simple qui peut être émise : le vecteur aimantation se comporte-t-il comme un vecteur passif durant la déformation, tel que cela a pu être suggéré par des modèles comme ceux d'Ozima (1980) ou Morash (1981).

IV - EXEMPLES NATURELS TRAITES.

1. Critères de choix.

Dans le but de tester le comportement passif de l'aimantation dans une roche déformée, trois critères ont guidé le choix des terrains d'étude :

- On doit pouvoir supposer, à priori, que les minéraux magnétiques porteurs de l'aimantation subissent une réorientation pendant la déformation. Des minéraux fortement anisométriques tels que l'hématite permettent cette supposition.
- L'aimantation rémanente portée par ces minéraux doit être antétectonique.
- D'autre part, la quantification de la déformation nécessite la présence de bons marqueurs de déformation, et en quantité suffisante.

De l'exigence d'une origine antétectonique de l'aimantation découlent deux conséquences directes : (a) l'acquisition de l'aimantation et le ou les épisodes de déformation doivent être nettement séparés dans le temps ; de ce fait ont été écartées de cette étude les roches magmatiques ou effusives où pourraient se poser le problème de la période d'acquisition de l'aimantation par rapport à la fin des processus d'orientation des minéraux magnétiques pendant la mise en place. (b) La roche ne doit pas avoir subi de réchauffement notable susceptible d'effacer l'aimantation rémanente primaire, aussi les séries métamorphiques sont-elles écartées.

2. Présentation sommaire des terrains étudiés

Compte tenu de ces remarques les séries rouges au sens large ont été choisies pour aborder le problème des relations aimantation-déformation. Le traitement de 3 exemples naturels sera présenté ici.

La première série de résultats concerne 9 sites échantillonnés dans les séries rouges permienes formant la couverture de l'Argentera (Alpes Maritimes) (Cogné, 1982 ; Cogné et al., 1982a, 1982b). Les sites montrent différents stades de déformation croissante (Graham, 1978a) et on pourra suivre l'évolution de l'orientation des minéraux magnétiques aux différents stades. Dans la partie la plus déformée de ces séries, 6 sites ont été choisis sur un pli pluri-décamétrique à schistosité prononcée, dont l'étude sera le deuxième exemple (Cogné, 1983). Le troisième exemple sera constitué par l'analyse des résultats de 6 sites répartis le long d'une coupe des séries rouges permo-triasiques pyrénéennes au Col du Somport.

Outre le fait qu'elles répondent aux critères exigés, ces séries offrent l'avantage supplémentaire, propre aux séries sédimentaires, de présenter un plan de stratification représentant en première approximation une "paleo-horizontale" qui permet d'estimer la part de rotation rigide associée à la déformation, ce qui n'est pas toujours évident dans le cas des roches effusives.

CHAPITRE II - QUANTIFICATION DE LA DÉFORMATION.

I - DEFORMATION - RAPPELS ET DEFINITIONS.

1. Déformation interne

Un volume de roches soumis à contraintes peut subir trois types de transformations permanentes (Ramsay, 1967) (Fig. 3).

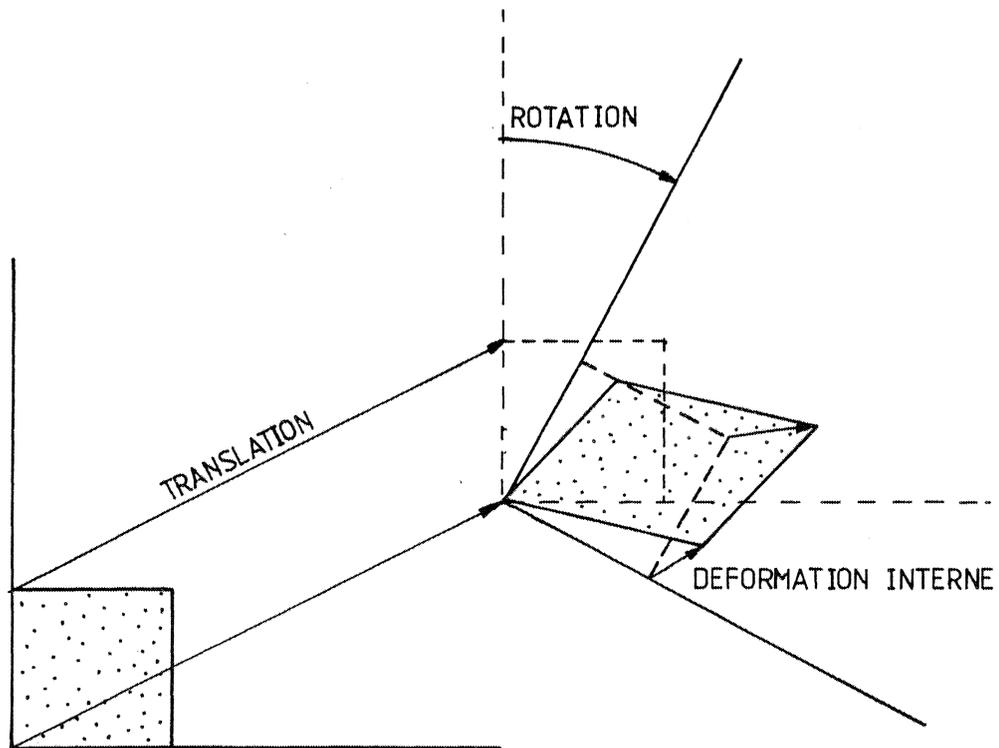


Fig. 3 - Translation. Rotation. Déformation.

- Une translation d'ensemble du volume considéré.

Cette translation est généralement difficile et souvent impossible à estimer sur des arguments uniquement structuraux. Par contre le paléomagnétisme se révèle ici comme un outil puissant pour déterminer les déplacements absolus, sous réserve d'une grande amplitude et d'une forte composante de déplacement en paléolatititude (Van der Voo et al., 1979).

- Une rotation rigide dont certaines composantes peuvent être déterminées si l'on possède certains éléments, comme par exemple une "paléo-horizontale" telle que le plan de stratification de roches sédimentaires. Les composantes de rotation dans le plan horizontal sont également mises en évidence par le paléomagnétisme à grande ou à petite échelle : rotation antihoraire de 35° de l'Espagne (Zijderveld et Van der Voo, 1971), rotation antihoraire de 30° du Pelvoux (Westphal, 1973) par exemple.

- Un changement des positions relatives des particules constituant le volume, qui provoque un changement de forme de celui-ci. C'est cette transformation que l'on entend par *déformation interne (strain)*. Contrairement aux déplacements rigides (translation + rotation), il est souvent possible de quantifier la déformation interne sur des arguments structuraux par l'étude de la forme d'objets déformés dont on connaît la géométrie initiale (Fig. 4). Dans les séries sédimentaires ces marqueurs de la déformation sont nombreux et de plusieurs types : oolites, fossiles, taches de réduction, galets, etc...

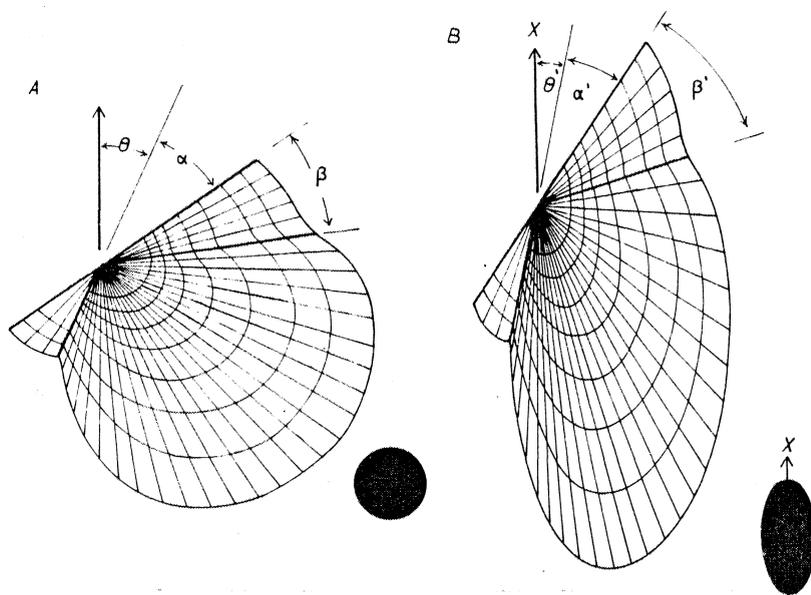


Fig. 4 - Exemple d'utilisation de fossiles comme marqueurs de la déformation (d'après Ramsay, 1967, p. 244).

2. Déformation homogène et hétérogène

La déformation d'un corps donné peut-être décrite comme homogène ou non homogène selon les critères géométriques suivants (Fig. 5) :

- La déformation est dite homogène si (a) les lignes droites à l'état non déformé restent droites après déformation, (b) des lignes parallèles restent parallèles.

- La déformation est non homogène (ou hétérogène) lorsque (a) les droites se transforment en courbe (b) des lignes parallèles perdent leur parallélisme.

L'analyse de la déformation hétérogène est évidemment très complexe. Cependant ce problème peut être abordé en considérant qu'un volume de roche déformé de façon inhomogène

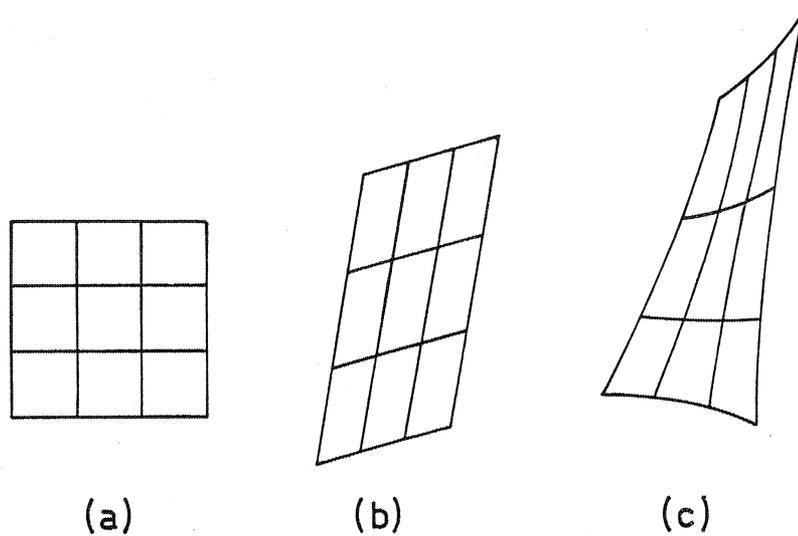


Fig. 5 - (a) : état non déformé, (b) : déformation homogène
(c) déformation non homogène (d'après Ramsay, 1967
p. 54).

est constitué de domaines restreints où la déformation peut être considérée comme homogène (voir par ex. Percevault, 1983).

De ceci découle la très importante notion d'*échelle* (Schwerdtner, 1973 ; Le Corre, 1978) d'étude de la déformation.

En particulier, la taille des sites d'échantillonnage paléomagnétique doit être choisie de manière à pouvoir considérer la déformation comme homogène à cette échelle.

3. Ellipsoïde et tenseur de déformation finie.

La déformation finie d'un objet peut être décrite par la transformation d'une sphère unitaire en ellipsoïde et une rotation de ses axes principaux, et exprimée sous la forme (en supposant la rotation antérieure à la déformation interne)

$$D = S \cdot R$$

où D est le tenseur Eulérien des gradients de la déformation (Cobbold, 1977)

S : tenseur de déformation interne

R : tenseur de la rotation rigide

Les axes de l'ellipsoïde de déformation ont pour longueur

$$\lambda_i = 1 + e_i \quad (i = 1, 2, 3)$$

où $e_i = \frac{l - l_0}{l_0}$ est l'extension suivant chacun des axes

Les étirements λ_i suivant chacun des axes sont les valeurs propres du tenseur de déformation interne (strain) S (Cobbold, 1977) qui s'écrit :

$$S_{ij} = a_{ik} a_{jl} S'_{kl} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3)$$

$$\text{où } S' = \begin{pmatrix} (1 + e_1) & 0 & 0 \\ 0 & (1 + e_2) & 0 \\ 0 & 0 & (1 + e_3) \end{pmatrix}$$

et a_{ij} : cosinus directeurs des axes principaux de la déformation dans le système de référence. On verra plus loin comment est définie la rotation rigide.

4. Comportement d'une ligne passive.

Une ligne passive définie par son vecteur r_i dans l'état non déformé est reliée au vecteur r_f après déformation interne (et sans rotation rigide) par :

$$r_f = S r_i \quad \begin{array}{l} r_i = \text{état initial} \\ r_f = \text{état final} \end{array}$$

où S est le tenseur de déformation interne défini ci-dessus.

De même, si l'on connaît l'état final déformé on retrouve l'orientation initiale r_i par

$$r_i = S^{-1} r_f$$

$$\text{où } S_{ij}^{-1} = a_{ik} a_{jl} S_{kl}^{-1} \quad (i, j, k, l = 1, 2, 3)$$

$$S^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{1 + e_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{1 + e_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{1 + e_3} \end{pmatrix}$$

5. Comportement d'un plan passif (Owens, 1973 ; Percevault, 1983)

On définit :

l_i (l_f) : pôle du plan initial (final)

r_i (r_f) : vecteur contenu dans le plan initial (final)

l et r formant un angle de 90° , leur produit scalaire est nul :

$$r_i^T l_i = r_f^T l_f = 0 \quad (1) \quad r^T = (x_1, x_2, x_3)$$

Soumis à une déformation interne S , le vecteur r_i se transforme en :

$$r_f = S r_i \quad (2)$$

et inversement

$$r_i = S^{-1} r_f \quad (3)$$

d'où

$$r_i^T = (S^{-1} r_f)^T = r_f^T [S^{-1}]^T \quad (4)$$

où $[S^{-1}]^T$ est la matrice inverse transposée de S. Par substitution de (4) dans (1) on obtient :

$$\begin{aligned} r_f^T z_f &= r_f^T [S^{-1}]^T z_i \\ z_f &= [S^{-1}]^T z_i \end{aligned}$$

S étant une matrice symétrique on peut écrire :

$$[S^{-1}]^T = S^{-1}$$

et l'on obtient :

$$z_f = S^{-1} z_i$$

et inversement :

$$z_i = S z_f$$

On constate donc que pour retrouver l'orientation *initiale* du pôle d'un plan ayant un comportement passif dans la déformation, il faut appliquer *le tenseur de déformation* au pôle *final* (après déformation) du plan considéré.

II - QUANTIFICATION DE LA DEFORMATION.

Après détermination de la taille du site, essentiellement fonction de l'échelle à laquelle on peut considérer la déformation comme homogène (parallélisme des plans de stratification, de schistosité etc....) et qui dans notre cas sera de l'ordre de 2m x 2m à 10m x 10m, les divers paramètres nécessaires à l'estimation du tenseur de déformation, unique pour le site, ont été mesurés sur le terrain (Fig. 6).

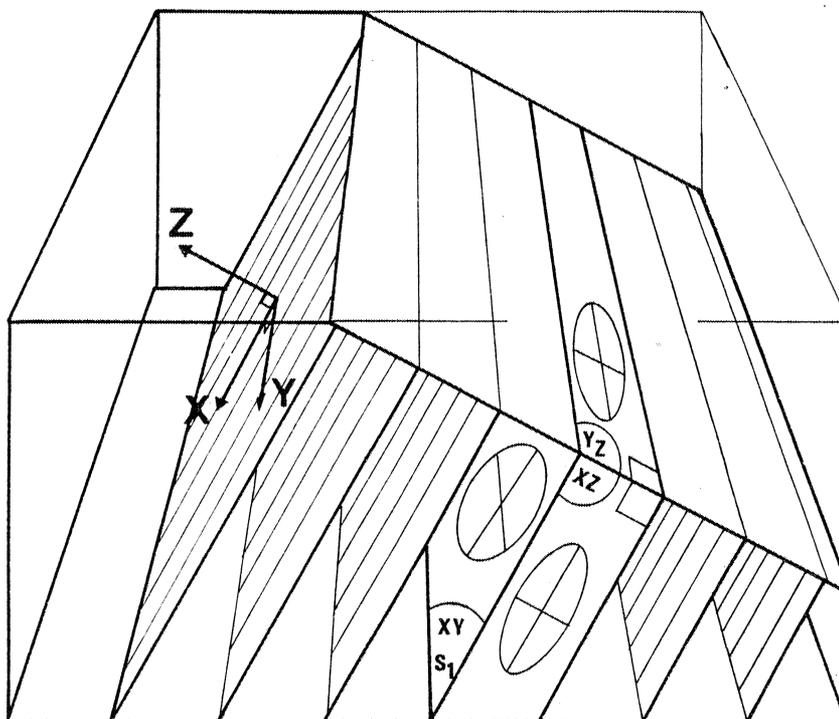


Fig. 6 - Bloc diagramme schématique illustrant les éléments nécessaires à l'estimation du tenseur de déformation sur un site.

1. Déformation interne

- Marqueurs

Dans tous les cas présentés, de nombreuses taches de réduction ellipsoïdales ont fourni d'excellents marqueurs de la déformation interne. Ces taches résultent d'une décoloration de la roche due à la réduction du fer oxydé à partir d'un point source (Wood et al., 1976). Mise à part l'absence d'hématite pigment, les taches ont la même composition minéralogique que l'ensemble de la roche. De ce fait, il n'existe pas de contraste de viscosité entre la tache et sa matrice et la déformation reste homogène entre marqueur et matrice. Considérés comme les plus fiables ces marqueurs ont été utilisés pour quantifier la déformation dans de nombreux cas (Wood et al., 1976 ; Graham, 1978a ; Crambert, 1981).

Les valeurs et vecteurs propres du tenseur de déformation interne sont calculés à partir des mesures de longueur et d'orientation de ces taches effectuées dans au moins deux des trois plans principaux XY, XZ ou YZ, et traitées selon diverses méthodes :

- Méthode R_f/ϕ (Ramsay, 1967 ; Dunnet, 1969)

Sur chaque plan principal, on mesure le rapport grand axe sur petit axe de chaque ellipse, ainsi que l'orientation du grand axe par rapport à une droite repère. Cette ligne peut être la trace du plan de schistosité ou de stratification sur le plan de mesure, la li-
néation d'allongement minéral dans le plan considéré ou une droite quelconque (Fig. 7).

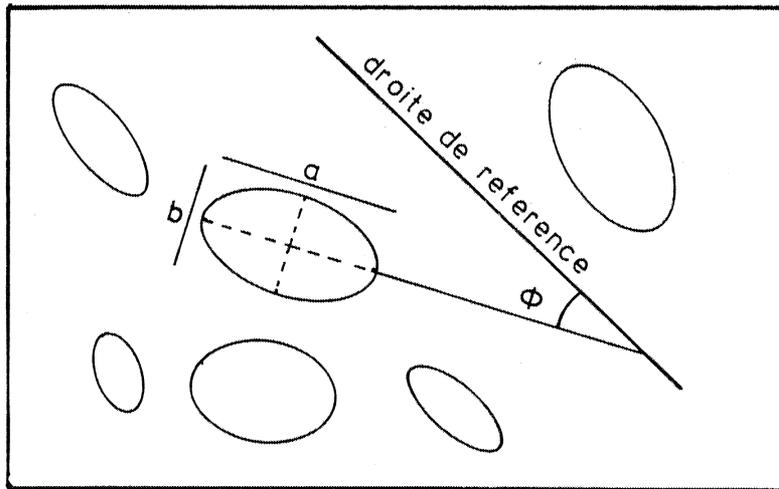


Fig. 7 - Technique de mesure des marqueurs elliptiques.

On obtient ainsi un ensemble de couples de valeurs R_f , ϕ , où R_f est le rapport axial de l'ellipse et ϕ l'angle du grand axe avec la droite de référence ; ces mesures sont reportées dans un diagramme R_f/ϕ auquel on superpose l'abaque de Dunnet (1969) correspondant le mieux au nuage de points (Fig. 8). La distribution théorique des données (R_f, ϕ) se faisant de manière symétrique autour de l'axe d'allongement de la déformation interne, le nuage de points mesurés doit être symétrique autour de la droite de référence si celle-ci est une direction principale d'étirement dans le plan considéré.

- Moyenne arithmétique

S'il n'existe pas de fluctuations d'angles de l'axe d'allongement par rapport à la droite de référence et si l'ensemble des rapports grand axe/petit axe est homogène, une simple

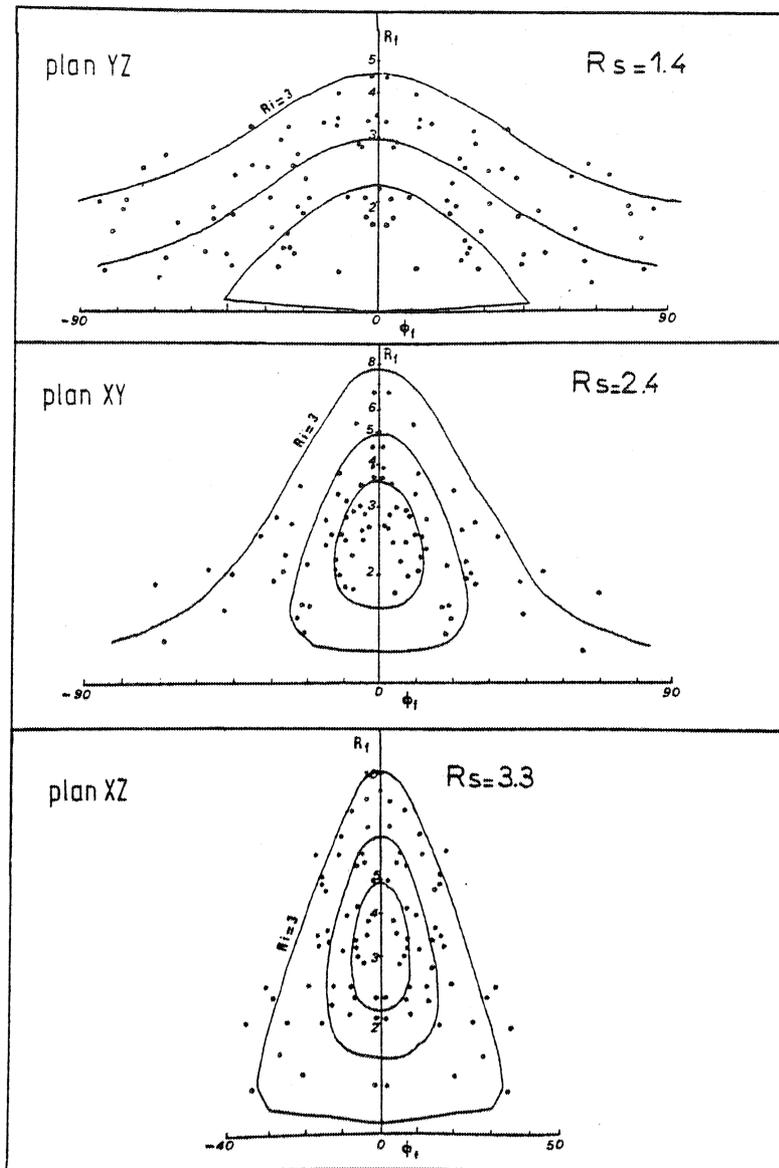


Fig. 8 - Exemples de diagrammes R_f/ϕ et des abaques de Dunnet (1969) correspondantes pour les trois plans principaux d'un même échantillon (d'après Le Théoff, 1977). L'égalité $\lambda_1/\lambda_2 \times \lambda_2/\lambda_3 = \lambda_1/\lambda_3$ est vérifiée.

moyenne arithmétique permet de déterminer le rapport axial de l'ellipse de déformation finie du plan (Fig. 9).

En combinant les valeurs des rapports axiaux obtenus dans les trois plans principaux de déformation on peut calculer les trois valeurs propres λ_1 , λ_2 et λ_3 du tenseur de la déformation interne du site considéré.

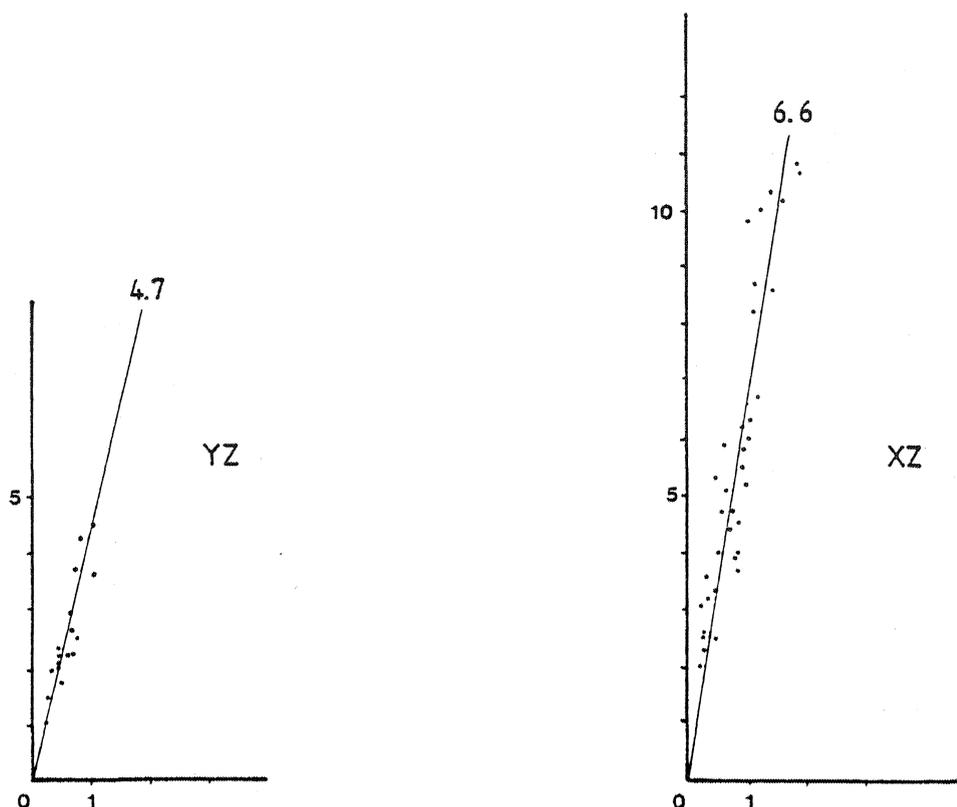


Fig. 9 - Exemples de diagrammes Grand Axe/Petit Axe utilisés lorsque $0 < \phi < 10^\circ$ (graduations en cms)

- Directions principales

L'application de ces méthodes permet de justifier l'assimilation du plan de schistosité au plan de déformation finie XY. Dans la majorité des cas étudiés ici, le grand axe des ellipses mesurées dans les plans perpendiculaires à la schistosité (XZ ou YZ) est confondu avec la trace de la schistosité dans ce plan ; de plus quand il existe des variations angulaires, elles sont effectivement symétriques de part et d'autre de la trace de la schistosité (Fig.10). Le pôle de ce plan constitue donc l'axe de raccourcissement Z.

De la même manière, la linéation d'étirement minéral, ou la linéation d'intersection stratification-schistosité, selon l'état de la déformation, constitue l'axe d'allongement X. Ceci peut également être confirmé par la symétrie des points dans le diagramme R_F/ϕ ou par l'alignement des axes d'allongement des taches de réduction sur cette linéation.

De la mesure des axes X et Z on déduit l'axe orthogonal intermédiaire Y.

2. Rotation rigide

- Mesure du plan de stratification

Dans les sites les plus déformés des schistes rouges des Alpes Maritimes, la mesure de la stratification pose quelques problèmes. En effet, le "plan" n'existe plus en tant que surface matérialisée sur le terrain, le développement de la schistosité l'ayant complètement "effacé". Cependant, le litage sédimentaire reste plus ou moins visible, essentiellement exprimé sous forme de "bandes de réduction" ou d'alignement de taches de réduction. La mesure de ces

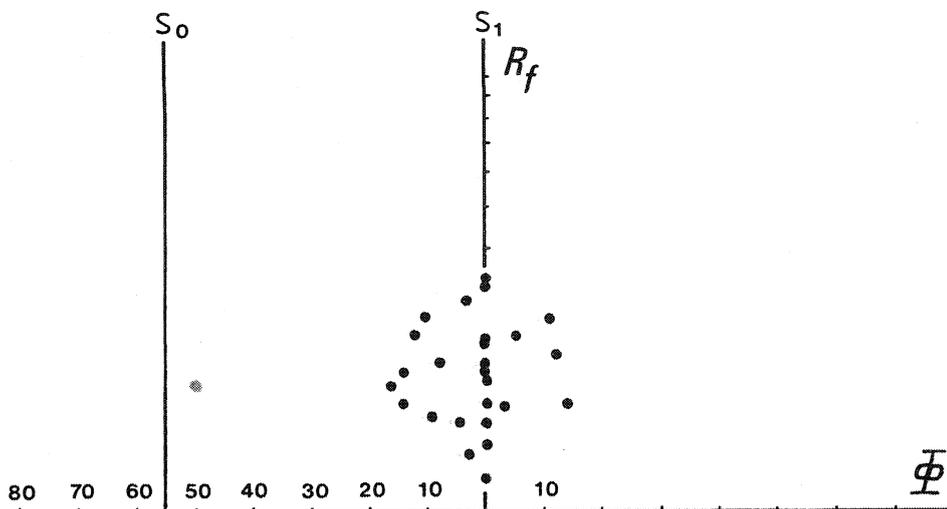


Fig. 10 - Diagramme R_f/ϕ . Plan X Z (site F - Alpes Maritimes).
Noter la symétrie du nuage de points autour de la trace de la schistosité (S_1).

traces sur les différents plans disponibles (schistosité, plans de fracture, etc...) permet de déterminer, sur projection stéréographique, un plan virtuel de stratification. Quoique n'étant pas d'excellente qualité, ces déterminations constituent la seule possibilité d'estimation du pendage de la stratification.

- Estimation de la rotation rigide

Le plan de stratification ainsi mesuré ne correspond pas à une discontinuité mécanique. On peut donc postuler le comportement passif de ce plan au cours de la déformation. De ce fait, l'orientation du plan mesuré dans l'état déformé résulte de la combinaison d'une rotation rigide et d'une rotation passive due à la déformation interne. Si l'on effectue la déformation inverse de ce plan, le pendage "résiduel" sera considéré comme représentatif de la part de rotation rigide de la déformation (Percevault, 1983).

III - DEFORMATION INVERSE DU VECTEUR AIMANTATION.

L'ensemble de ces données nous permet donc de déterminer le tenseur de la déformation interne S pour chaque site ainsi que la rotation rigide de l'ensemble.

Par ailleurs, l'analyse de l'aimantation (cf. Chap. III) nous fournit dans le meilleur des cas, un ensemble de vecteurs d'aimantation rémanente primaire.

Le traitement consiste à (Fig. 11) :

- recalculer la direction de chaque vecteur aimantation à l'aide du tenseur de déformation inverse S^{-1} du site.
- estimer le taux de rotation rigide en dédéformant le plan de stratification.
- effectuer la rotation rigide inverse qui ramène le plan de stratification à l'horizontale, à la manière de la correction de pendage courante en paléomagnétisme.

Cela revient à appliquer :

$$r_i = D^{-1} r_f$$

avec $D^{-1} = R^{-1} \cdot S^{-1}$

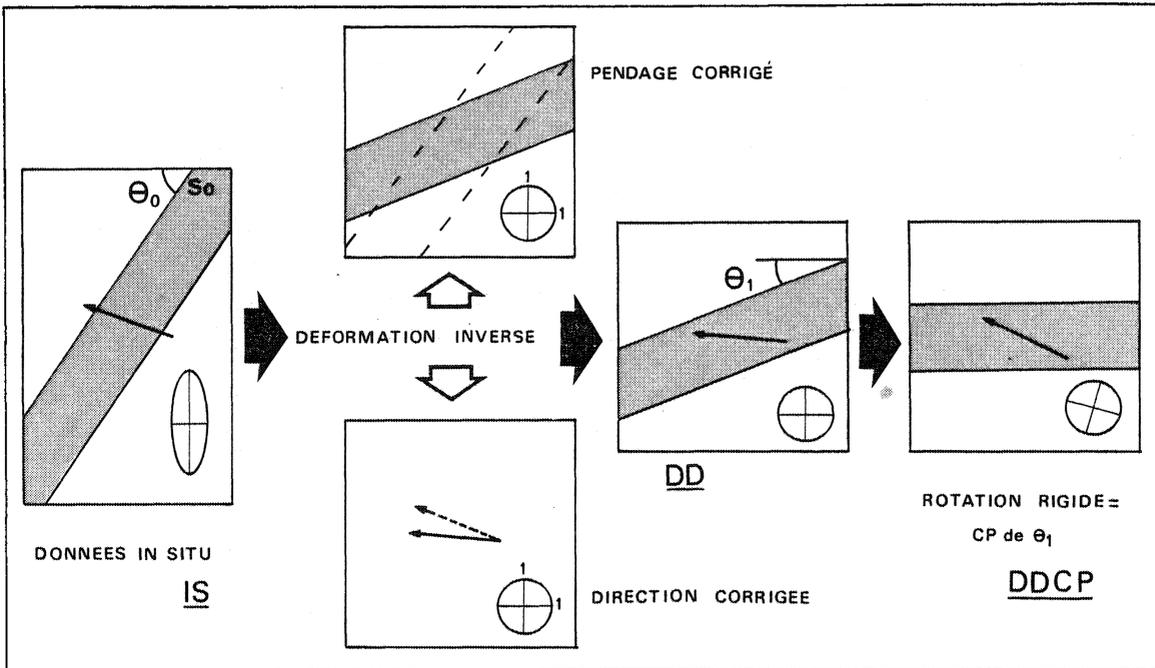


Fig. 11 - Schéma illustrant les étapes de la déformation inverse du vecteur aimantation.

La validité du traitement sera testée par comparaison des distributions des données avant et après déformation inverse.

Ce test, effectué sur le paramètre de précision k de la statistique de Fisher (1963), sera fait à 2 niveaux :

- comparaison de la distribution intrasite aux différentes étapes.
- qualité de la distribution intersite des directions moyennes de chaque site.

Outre ce test, le contrôle de la direction moyenne finale sera effectué en comparant celle-ci aux directions paléomagnétiques obtenues par d'autres auteurs sur les mêmes séries mais dans des affleurements non-déformés.

CHAPITRE III - AIMANTATION DES SERIES ROUGES.

I - NATURE ET ORIGINE DE L'HEMATITE DANS LES SERIES ROUGES.

Les séries rouges se présentent sous deux formes : grès et marnes fins uniformément pigmentés, séquences alternées de lits rouges et de lits gris-bruns (Van Houten, 1973). Pouvant provenir d'environnements divers (fluviatiles, lacustres, marins) ces séries acquièrent leur pigmentation pendant ou après dépôt, dans des conditions oxydantes liées à un climat sec et saisonnièrement aride (Mc Pherson, 1980).

La genèse de ce pigment d'hématite a été l'objet de longs débats et à l'heure actuelle les hypothèses les plus couramment admises sont :

- cristallisation de l'hématite in-situ par déshydratation d'oxydes ferriques hydratés amorphes hérités de l'érosion de la région source (Mc Pherson, 1980).

- altération des phyllosilicates durant la diagenèse et oxydation de magnétites en hématites avant, pendant et après le transport (Turner, 1974 ; Elmore et Van der Voo, 1982). Walker et al. (1981) distinguent jusqu'à six formes d'hématites (formations de Moenkopi, Colorado) :

- hématite microcristalline et hématite polycristalline remplaçant des silicates détritiques.
- grains poly et monocristallins formés par oxydation authigénique de magnétite.
- ilménite altérée également in-situ en hématite.
- pigment ultra fin.
- grains primaires formés de l'intercroissance d'ilménite et d'hématite, d'origine thermique et qui sont donc les seuls dont l'origine peut être considérée comme détritique.

II - REMANENCE DES SERIES ROUGES.

La présence de ces oxydes de fer fait que ces séries rouges portent une aimantation plus forte que les autres types de roches sédimentaires. Aussi sont-elles largement utilisées pour des études paléomagnétiques.

Cependant l'origine de la rémanence de ces séries pose des problèmes liés aux conditions de formation de l'hématite.

Certains auteurs considèrent que la formation d'hématite se termine relativement tôt et que sa rémanence reflète exactement le champ magnétique durant le dépôt, ce qui permettrait de l'utiliser pour des études magnétostratigraphiques (Purucker et al., 1980 ; Van den Ende, 1977).

Cependant la présence de composantes secondaires d'origine diagénétique conduit d'autres auteurs à remettre en question l'utilisation de ces séries pour de telles études (Turner, 1981 ; Walker et al., 1981). L'âge et la durée d'acquisition sont les problèmes cruciaux de ce débat qui mettent en évidence la nécessité d'une analyse magnétique poussée afin de séparer les diverses composantes et leurs porteurs magnétiques.

La rémanence portée par ces séries peut être de deux types :

- aimantation rémanente détritiques (ARD). Elle est obtenue par dépôt de minéraux détritiques alignés sur le champ magnétique. Cette aimantation peut être affectée par divers processus causant des déviations de la rémanence (Elmore et Van der Voo, 1982).

- aimantation rémanente chimique (ARC) principalement acquise durant la diagenèse par croissance authigénique d'hématite. Mais la croissance d'hématite pouvant se produire n'importe quand dans l'histoire de la roche, il est possible de trouver plusieurs composantes d'ARC (Roy and Park, 1974).

L'origine détritique de l'aimantation est souvent difficile à montrer, sauf cas particulier comme l'existence de minéraux d'origine thermique dans une série sédimentaire non métamorphisée (Walker et al., 1981) ; le cas de la magnétite présente dans les roches sédimentaires est plus délicat à interpréter : si, pour les séries rouges, il est montré que cette magnétite est détritique (Elmore et Van der Voo, 1982 ; Mc Cabe et Van der Voo, 1983), cela peut ne pas être le cas dans des roches de types carbonates (Scotese et al., 1982 ; Mc Cabe et al., 1983). Certaines structures sédimentaires telles que stratifications entrecroisées, figures de charges, slumps etc... peuvent également être utilisées pour tester l'origine détritique de l'aimantation (Elmore et Van der Voo, 1982 ; Liebes et Shive, 1982).

Cependant, pour le problème que je me propose de traiter, seul compte le caractère antétectonique de l'aimantation, et dans cette optique une ARC d'origine diagénétique pourra être considérée comme primaire.

III - METHODOLOGIE D'ETUDE DE L'AIMANTATION DES SERIES ROUGES.

1. Prélèvements

Tous les échantillons utilisés dans cette étude ont été forés sur le terrain. Les carottes, Ø 25mm, sont orientées d'une part à la boussole, et quand cela est possible, par rapport au soleil. Ceci permet de déterminer la déclinaison magnétique moyenne du site considéré.

Une dizaine de carottes par site ont été prélevées donnant généralement 2, parfois 3 spécimens de 25 mm de longueur par carotte.

2. Mesures

Toutes les mesures d'aimantation ont été effectuées sur un magnétomètre Spinner Schonstedt DSM-1 asservi par un mini-ordinateur PDP 11-05. Le mode d'acquisition des données et de leurs paramètres de qualité est donné par Perroud (1980).

3. ARN. Test de viscosité

Après stockage 8 jours dans le champ magnétique du laboratoire, les échantillons sont mesurés puis laissés 8 jours dans le sens inverse et remesurés. Ceci permet de définir une ARN vraie et le coefficient de Viscosité V , rapport entre le moment de la différence vectorielle des 2 mesures et 2 fois l'ARN vraie.

Les échantillons ayant une viscosité $> 20\%$ ont été écartés de l'étude paléomagnétique.

4. Désaimantation thermique

Les échantillons sont chauffés par paliers de température croissante (four Schonstedt TSD-1) refroidis en champ nul et mesurés entre chaque étape. Cette méthode largement utilisée en paléomagnétisme permet de séparer les composantes d'aimantations portées par des minéraux de températures de blocage différentes.

Cependant, dans notre cas, la possibilité de plusieurs ARC portées par l'hématite pigment peut rendre cette seule méthode inefficace. Si la résultante mesurée à chaque étape évolue suivant un plan de réaimantation (Perroud, 1980) les données sont traitées par la méthode des grands cercles (Halls, 1976). L'intersection des grands cercles correspondant à chacun des spécimens fournit une direction moyenne pour la population considérée et il est possible de déterminer une "ellipse de confiance" (Westphal, 1980) de cette intersection.

Par ailleurs, des problèmes de modification minéralogique apparaissent souvent en cours de chauffe (Dunlop, 1972) et l'ARN de l'échantillon peut être sérieusement perturbée par l'acquisition d'une aimantation parasite. Dans certains cas favorables les données pourront être également traitées par les grands cercles. Ces problèmes seront traités plus en détail lors de l'exposé des résultats.

5. Désaimantation chimique

Certains auteurs ont montré l'efficacité de cette méthode pour séparer des composantes dont les températures de blocage sont identiques comme par exemple 2 ARC portées par l'hématite pigment (Roy et Park, 1974 ; Roy et Lapointe, 1978).

Le principe de cette méthode consiste à dissoudre les minéraux porteurs de l'aimantation par attaque des échantillons à l'acide chlorhydrique. Cette attaque progressive par paliers de temps croissants permet de séparer les composantes portées par les minéraux de solubilités différentes ou d'expositions à la circulation d'acide différentes.

Pour assurer une pénétration homogène de l'HCl, diverses méthodes de préparation des échantillons ont été proposées par Henry (1979) afin d'augmenter la surface d'échange. Les échantillons ont été préparés par forage d'un trou de \varnothing 10 mm parallèle à l'axe du spécimen, méthode la plus couramment utilisée (Park, 1970 ; Perroud, 1980).

Le temps d'attaque à chaque étape est un des facteurs qui contrôlent les processus de désaimantation chimique. La durée des étapes d'abord très courtes (1, 3, 6, 12 heures) augmente progressivement, puis les échantillons sont mesurés tous les 8 jours jusqu'à un temps total de l'ordre de 1200 heures si nécessaire. Cette durée peut être considérablement réduite par augmentation de la température : Henry (1979) montre que la décroissance de l'intensité est achevée à 40h d'attaque d'HCl 8 N à 100° et à 450 h sous HCl 12 N à 25°C. Nous ne possédons pas d'équipement permettant de travailler à haute température, aussi les désaimantations chimiques ont-elles été effectuées à température ambiante.

La normalité de l'acide a également été augmentée en cours de manipulation, de 6 N au début à 12 N pour les dernières étapes. Pour éviter les effets de trainage dans le champ magnétique du laboratoire (Perroud, 1980), les échantillons, plongés dans l'acide en piluliers individuels, ont été stockés en champ nul à chaque étape.

Enfin, sur les schistes rouges étudiés, la diffusion de l'acide a souvent été améliorée par la présence de plan de schistosité permettant une bonne homogénéité de l'attaque chimique dans tout l'échantillon.

Cette méthode s'est révélée être extrêmement bien adaptée à l'étude des composantes d'aimantation de ces séries rouges, son seul inconvénient étant le temps d'acquisition des données qui peut aller jusqu'à trois mois pour une série d'échantillons.

6. Désaimantation par champs alternatifs.

Cette méthode est connue pour être inefficace dans la majorité des cas pour les séries rouges dont l'hématite possède une forte coercivité, très supérieure aux 1000 Oe de champ alternatif fourni par l'appareil du laboratoire (Schonstedt GSD-1). Cette technique n'a donc pas été utilisée ici.

Il faut cependant noter l'utilisation qui en a été faite par Elmore et Van der Voo (1982) en complément de désaimantations chimiques dans des séries où la composante finale stable de la désaimantation chimique est portée par de la magnétite, livrant par désaimantation par champ alternatif une direction d'aimantation détritique indiscutablement primaire. Cette très intéressante méthode n'a pu être appliquée ici, dans la mesure où les dernières mesures de désaimantations chimiques sont généralement trop faibles pour pouvoir être mesurées avec précision lors d'une désaimantation ultérieure.

7. Minéralogie magnétique.

- Détermination du point de Curie

L'échantillon, placé dans l'entrefer d'un électroaimant (Brucker BE 10) à pièces polaires à gradient de champ vertical acquiert une aimantation induite. Si la susceptibilité est positive, la force exercée sur l'échantillon sera de même sens que le gradient de champ.

La balance de Curie (Sartorius) mesure cette force et un enregistrement graphique direct de la force en fonction de la température permet l'obtention des courbes thermomagnétiques.

Cette technique facile à mettre en oeuvre pour les roches ignées en général peut poser certains problèmes dans le cas des séries rouges :

- La mise en capsules scellées sous vide provoque la production de magnétite, probablement par réduction d'hématite, en cours de chauffe et il n'est plus possible d'apprécier le comportement de l'hématite (Fig.12a). Ces expérimentations ont donc été faites à l'air libre.

- Le fait de travailler sur godets ouverts provoque des pertes de poids importantes en cours de chauffe. La balance utilisée étant une balance verticale, ces pertes de poids sont enregistrées avec les variations de force. Il a donc fallu, à chaque expérience, établir une courbe de perte de poids en coupant le champ à intervalles de 20 ou 50° C pour mesurer la force résultante. La courbe thermomagnétique est alors obtenue par soustraction de cette courbe à la courbe totale (Fig.12b). Après tarage de la balance à haute température la reproductibilité de la courbe est testée en baisse de température.

- Acquisition d'ARI

Les acquisitions d'ARI pour des champs jusqu'à 1,25 T permettent d'estimer d'après le spectre de coercivité correspondant et par comparaison avec des échantillons synthétiques

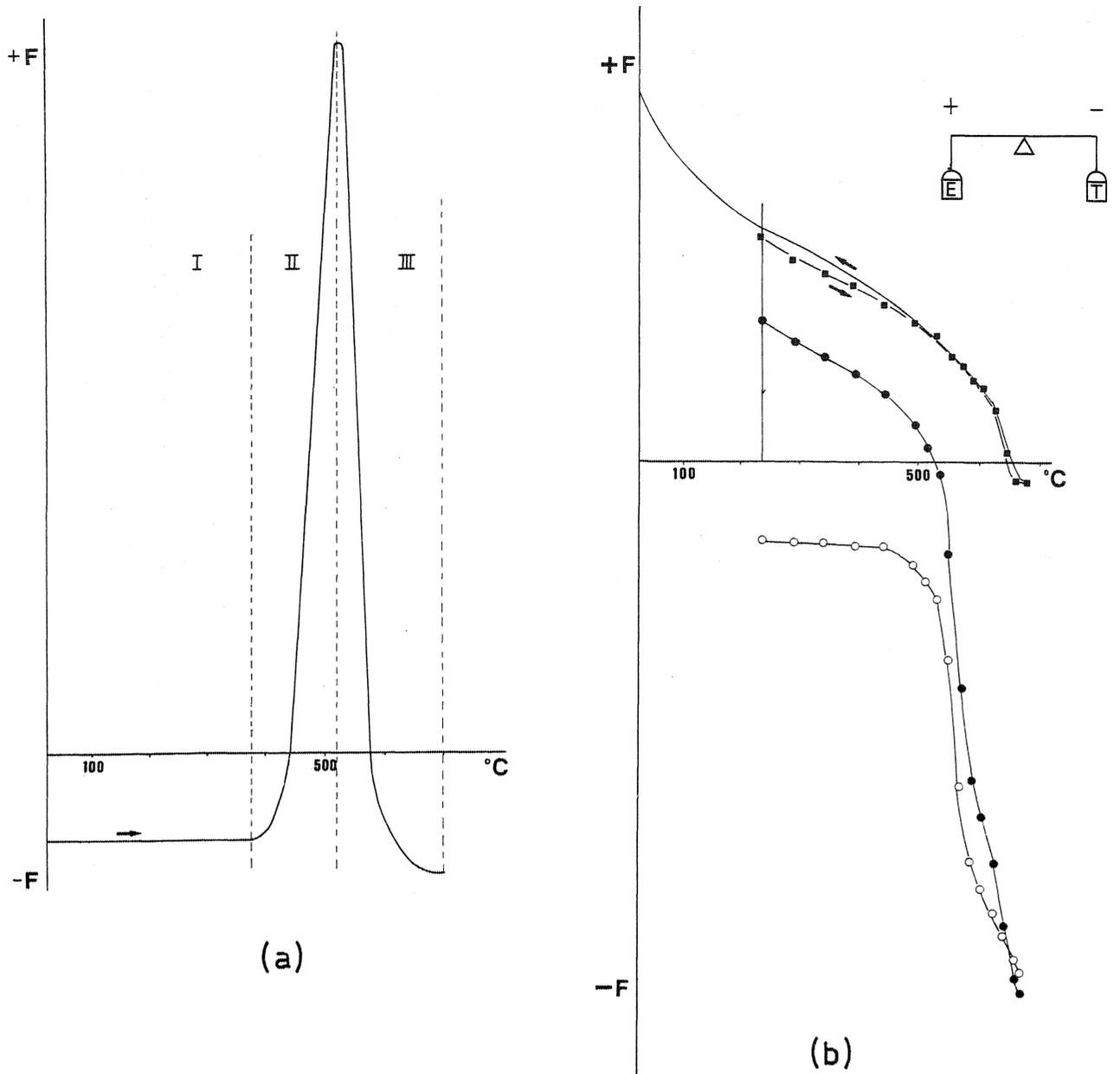


Fig. 12 - Courbes thermomagnétiques obtenues sur des échantillons de schistes rouges. (a) : sous vide ; on peut distinguer trois domaines : I : la susceptibilité négative du godet de Qz est supérieure à celle de l'hématite, pas d'évolution jusqu'à $\sim 380^\circ\text{C}$; II : la production de magnétite par réduction de l'hématite entraîne une brusque augmentation de la susceptibilité de l'échantillon. III : chute de cette susceptibilité au voisinage du point de Curie de la magnétite
(b) : à l'air libre ; ronds noirs : courbe enregistrée ; ronds blancs : courbe de perte de poids ; carrés noirs : courbe résultante d'évolution de la susceptibilité de l'hématite ; courbe continue : refroidissement après retarage à 700° , champ coupé.

(Dunlop, 1972), la nature des minéraux magnétiques contenus dans la roche. Cette technique a été essentiellement utilisée pour comparer les spectres de coercivité d'échantillons désaimantés chimiquement et d'échantillons non attaqués de la même carotte (Perroud, 1982). Elle a également contribué à la compréhension des phénomènes de modifications minéralogiques des échantillons en cours de désaimantation thermique.

2^o partie

les schistes rouges
des alpes et
des pyrénées

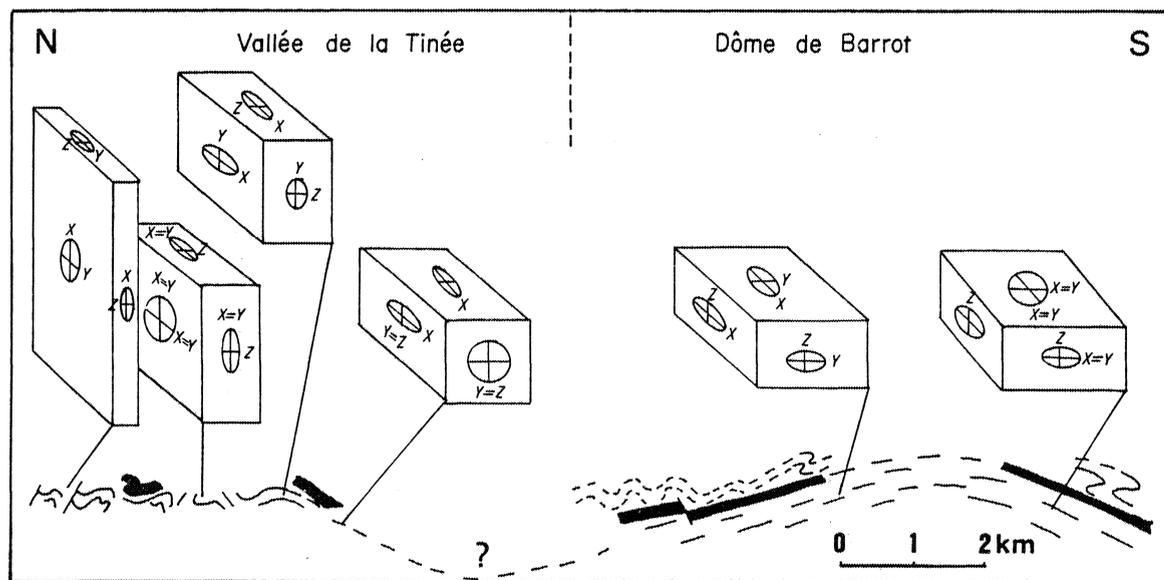
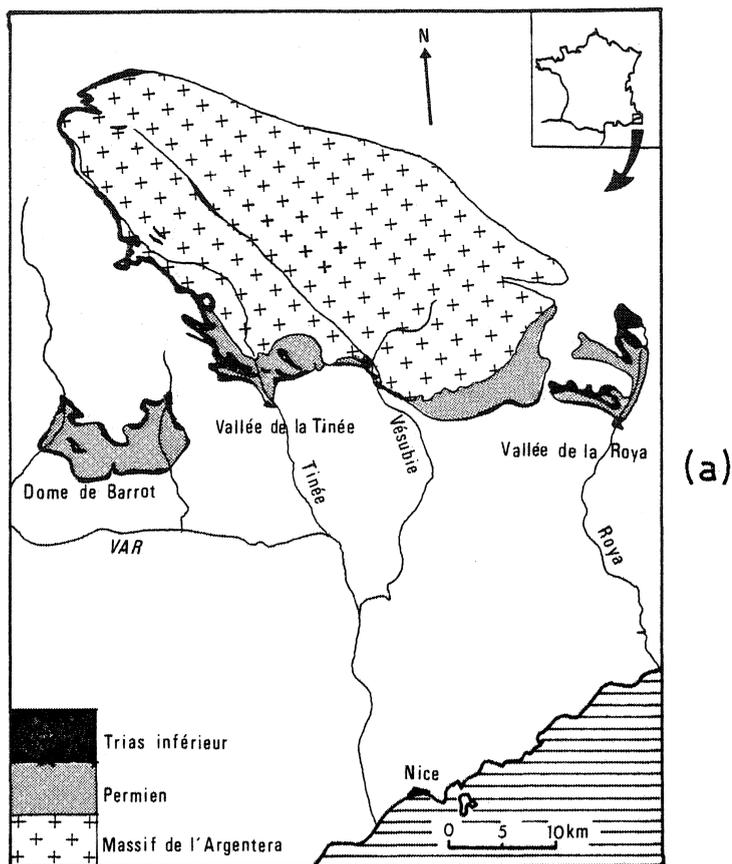


Fig. 13 - Les séries rouges permienes des Alpes Maritimes (a) : principaux affleurements (b) coupes schématique, du Sud au Nord, du Dôme de Barrot et de la Vallée de la Tinée ; les blocs-diagrammes illustrent les différents stades de déformation croissante (d'après Graham, 1978a).

CHAPITRE I - LES SERIES ROUGES DES ALPES MARITIMES.

I - SITUATION - CONTEXTE GEOLOGIQUE ET PALEOMAGNETIQUE.

Les pelites et schistes rouges des Alpes Maritimes forment la partie supérieure de l'épaisse couverture permienne du massif cristallin externe de l'Argentera, et sont connus sous le nom de formation de Barrot (Bordet, 1950) ou de Capeiretto (Faure-Muret, 1955) (Fig. 13a).

La discordance des quartzites werfeniennes, mineure dans la vallée du Var (gorges de Daluis) plus prononcée dans les vallées de la Tinée et de la Roya, met en évidence un épisode de déformation antétriasique le long de couloirs WNW-ESE où des failles du socle sous-jacent ont induit dans la couverture des synclinaux pincés (Graham, 1978b). L'ensemble est repris lors de la phase alpine synschisteuse (Siddans, 1979) développant les plis isoclinaux de même direction à schistosité de plan axial prononcée des vallées de la Tinée et de la Roya.

La présence, essentiellement dans la partie supérieure de la série, de nombreuses taches de réduction ellipsoïdales en a fait un cas d'exemple pour l'étude quantitative de la déformation finie.

Graham (1978a) met ainsi en évidence l'existence d'un gradient de la déformation du Sud vers le Nord (Fig. 13b) illustré par la coupe du Dôme de Barrot et de la vallée de la Tinée. Il montre que dans le Dôme de Barrot, la compaction est illustrée par des ellipsoïdes "en galette" ($\lambda_1 = \lambda_2 > \lambda_3$) aplatis dans la stratification. A l'extrême sud de la vallée de la Tinée, la superposition du raccourcissement tectonique conduit à des ellipsoïdes "en cigare" ($\lambda_1 > \lambda_2 = \lambda_3$) dont l'axe d'allongement, de direction N 110, est parallèle à l'intersection schistosité stratification. Ceci s'exprime par un très beau débit en "crayons" de la roche. En remontant vers le Nord, la déformation augmente et les ellipsoïdes s'aplatissent dans la schistosité $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ avec l'axe X toujours parallèle à l'intersection stratification-schistosité, puis repassent à un stade "en galette" $\lambda_1 = \lambda_2 > \lambda_3$, et finalement reviennent à une forme triaxiale $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$ avec X dans la ligne de plus grande pente de la schistosité, marquée par la linéation d'étirement minéral.

Ces résultats ont été repris et complétés par Siddans (1980) qui, par ailleurs montre le faible métamorphisme (anchizone) de ces séries et met en évidence les mécanismes de recristallisation des illites dominants durant la déformation.

Après Henry (1973), Kligfield et al. (1981) étudient les relations déformation-anisotropie de susceptibilité magnétique et concluent que la réorientation de l'hématite durant la déformation progressive permet de rendre compte des corrélations entre variations de déformation et variation de la forme moyenne de l'ellipsoïde d'anisotropie. Cependant, les auteurs concluent qu'il n'est pas possible d'effectuer des estimations quantitatives de la déformation interne à partir des mesures de fabrique magnétique.

Enfin, le paléomagnétisme du Dôme de Barrot a été étudié par Van den Ende (1977) qui donne une direction moyenne pour le Permien supérieur de $D = 205,5$ $I = -13,5$ qui me servira de direction de référence.

II - SITES D'ECHANTILLONNAGE.

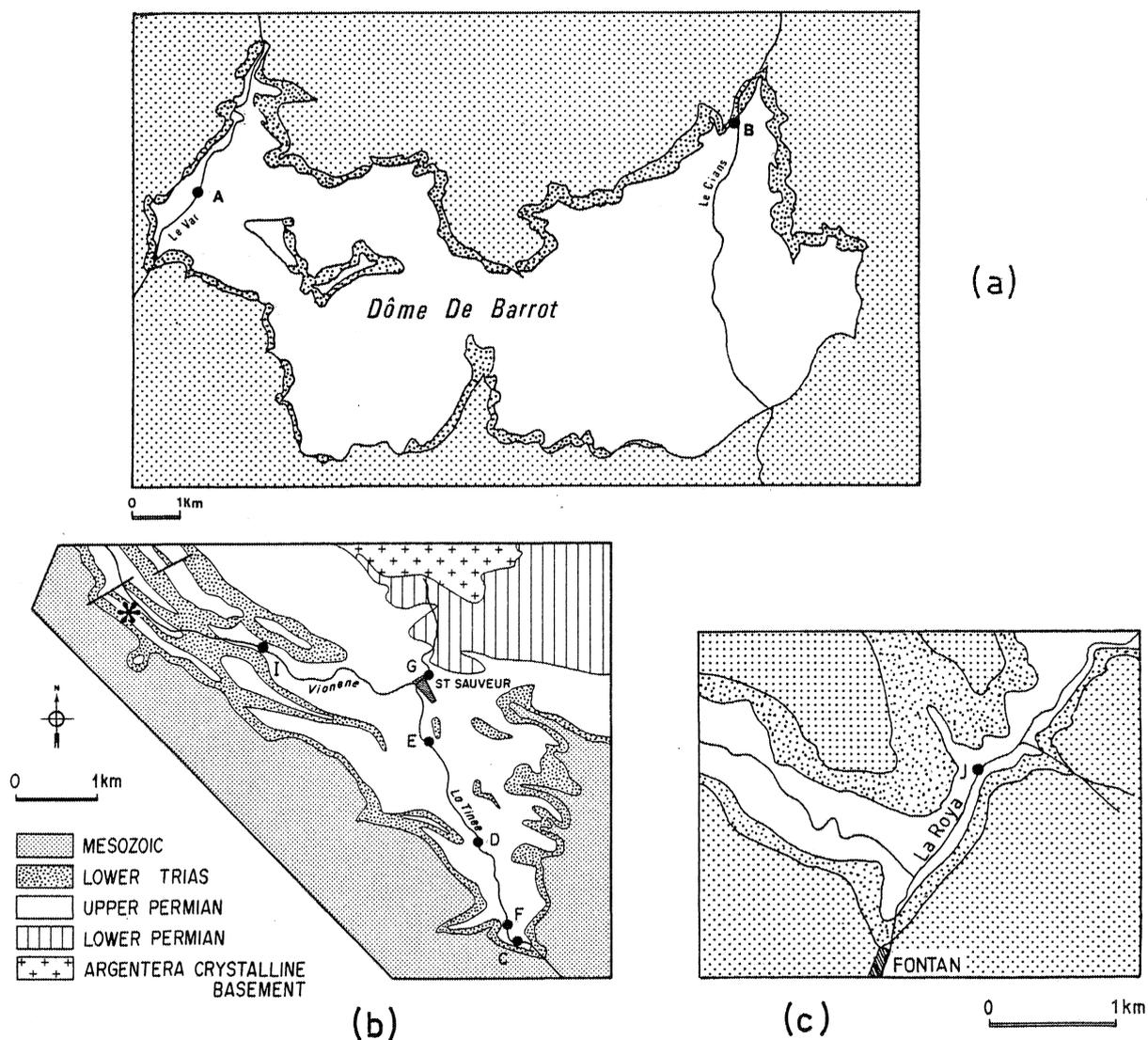


Fig. 14 - Cartes détaillées des sites d'échantillonnage sur les 3 principaux affleurements : (a) Dôme de Barrot ; (b) Vallées de la Tinée et de la Vionène ; (c) Vallée de la Roya.

A la lumière de ces divers travaux, 9 sites d'échantillonnage ont été répartis le long de ce gradient de la déformation (Fig. 14) sur les trois affleurements principaux :

- Dôme de Barrot : 2 sites (A, B)
- Vallées de la Tinée et de la Vionène : 6 sites (C, D, E, F, G, I)
- Vallée de la Roya : 1 site (J)

95 carottes ont été forées et orientées sur le terrain.

III - ANALYSE QUANTITATIVE DE LA DEFORMATION.

Dans le tableau I sont donnés pour chaque site le nombre de mesures de rapports axiaux des taches de réduction et le type de traitement de ces mesures pour l'obtention du rapport axial moyen de l'ellipse de déformation finie dans chaque plan principal de déformation.

Plan de mesure \ Sites	A*	B	C	D	E	F	G	I	J
X Y	N		23	35	17	19	27	13	30
	T		Rf/φ						
X Z	N	55	29	20	10		29	43	31
	T	Rf/φ	Moy.	Moy.	Moy.		Moy.	Moy.	Rf/φ
Y Z	N			58	30	26		22	
	T			Moy.	Moy.	Rf/φ		Moy.	

Tableau I : Nombre de mesures de rapports axiaux et nature du traitement de ces mesures par plan de déformation et par site. N : nombre de mesures ; T : traitement ; Rf/φ : traitement des mesures par diagramme Rf/φ ; Moy. : détermination du rapport axial de strain par moyenne arithmétique des mesures.

* : Pour le site A, l'ellipsoïde est de révolution autour de Z ($\lambda_1 = \lambda_2$) dans la stratification) les mesures $\lambda_1/\lambda_3 = \lambda_2/\lambda_3$ ont été effectuées dans tous les plans disponibles parallèles à Z.

1. Mesures. Résultats.

Dôme de Barrot.

- Site A (Sud Daluis) : le diagramme Rf/φ de la figure 15 est une compilation des mesures effectuées sur toutes les surfaces perpendiculaires à la stratification. Comme cela a été montré par Graham (1978a) ces taches sont de type "en galette" $\lambda_1 = \lambda_2$ aplatis dans la stratification et reflètent la fabrique sédimentaire. Ceci est confirmé par l'homogénéité des mesures sur l'ensemble des plans de mesures perpendiculaires à S_0 .

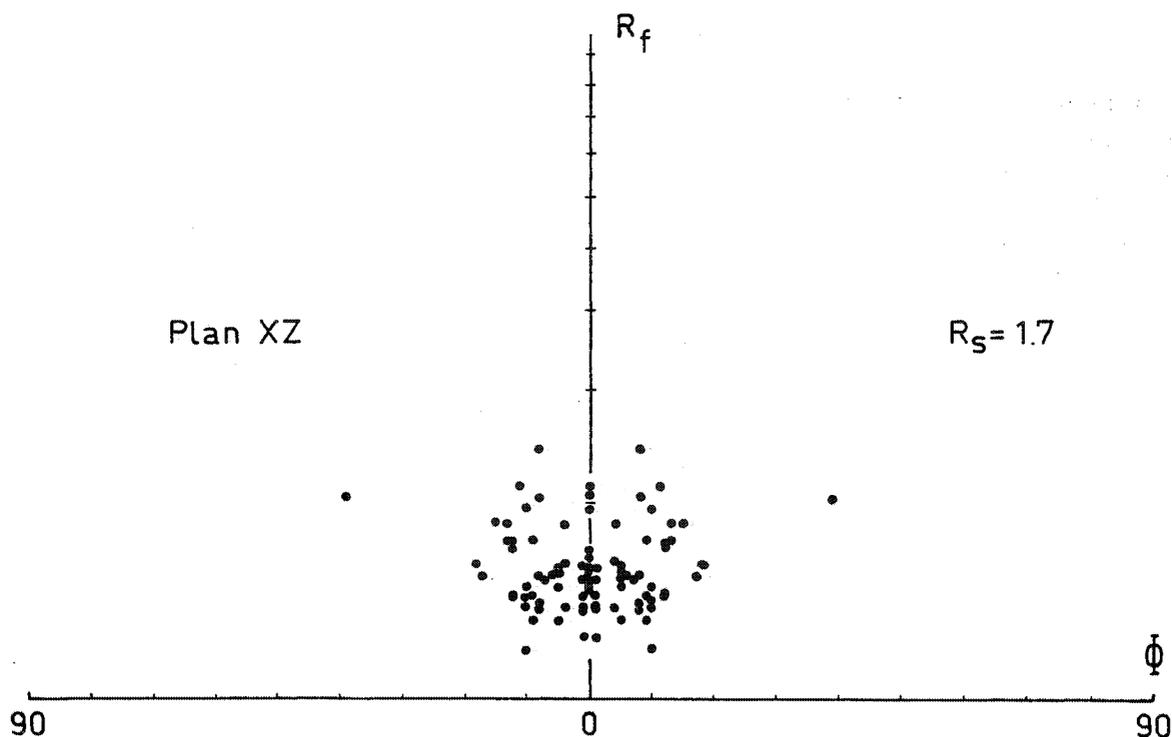


Fig. 15 - Diagramme R_f/ϕ des sections XZ du site A. R_S est le rapport λ_1/λ_3 déterminé d'après les abaques de Dunnet (1969).

Le pendage moyen du plan de stratification est de l'ordre d'une dizaine de degrés vers l'ouest (Fig. 16a), compatible avec la forme en dôme de l'affleurement.

- Site B (Nord Cians) : Pour ce site, seules les directions structurales ont été relevées (Fig. 16a). Les mesures de taches utilisées pour la détermination du tenseur de déformation de ce site sont celles du site "North Cians" de Graham (1978a, p. 226, Fig. 5). Bien qu'il n'y ait pas de schistosité visible sur cet affleurement, le raccourcissement tectonique se superpose à la fabrique sédimentaire et produit des ellipsoïdes "en cigare" ($\lambda_2=\lambda_3$) d'axe d'allongement compris dans la stratification et de direction N 130 (Fig. 16a).

Vallée de la Tinée.

La coupe de la vallée de la Tinée constitue le plus bel affleurement pour l'illustration du gradient de la déformation du Sud vers le Nord.

Dans ce qui suit, les sites sont classés dans l'ordre de leur position géographique que le long de la coupe, du Sud au Nord. Les directions structurales moyennes de chaque site sont représentées Fig. 16b et les diagrammes R_f/ϕ et Grand axe/Petit axe des taches de réduction, Fig. 17, 18 et 19.

Juste sous les quartzites Werfeniennes, à l'extrême Sud de la coupe, la roche ne montre pas de schistosité, mais quelques mètres plus bas stratigraphiquement, au site C, la roche montre un débit "en crayons" marquant l'apparition d'une schistosité (S_1) frustrée de

direction N95, Sub-perpendiculaire à la stratification (S_0). L'ellipsoïde de déformation y est de type constriction (Fig. 20) avec l'axe d'allongement X parallèle à l'intersection S_0/S_1 . Les mesures de taches dans les plans XZ et XY (Fig. 17 et 18) donnent des rapports axiaux respectivement de 1.9 et 1.7 et l'ellipsoïde n'est donc plus de révolution autour de X.

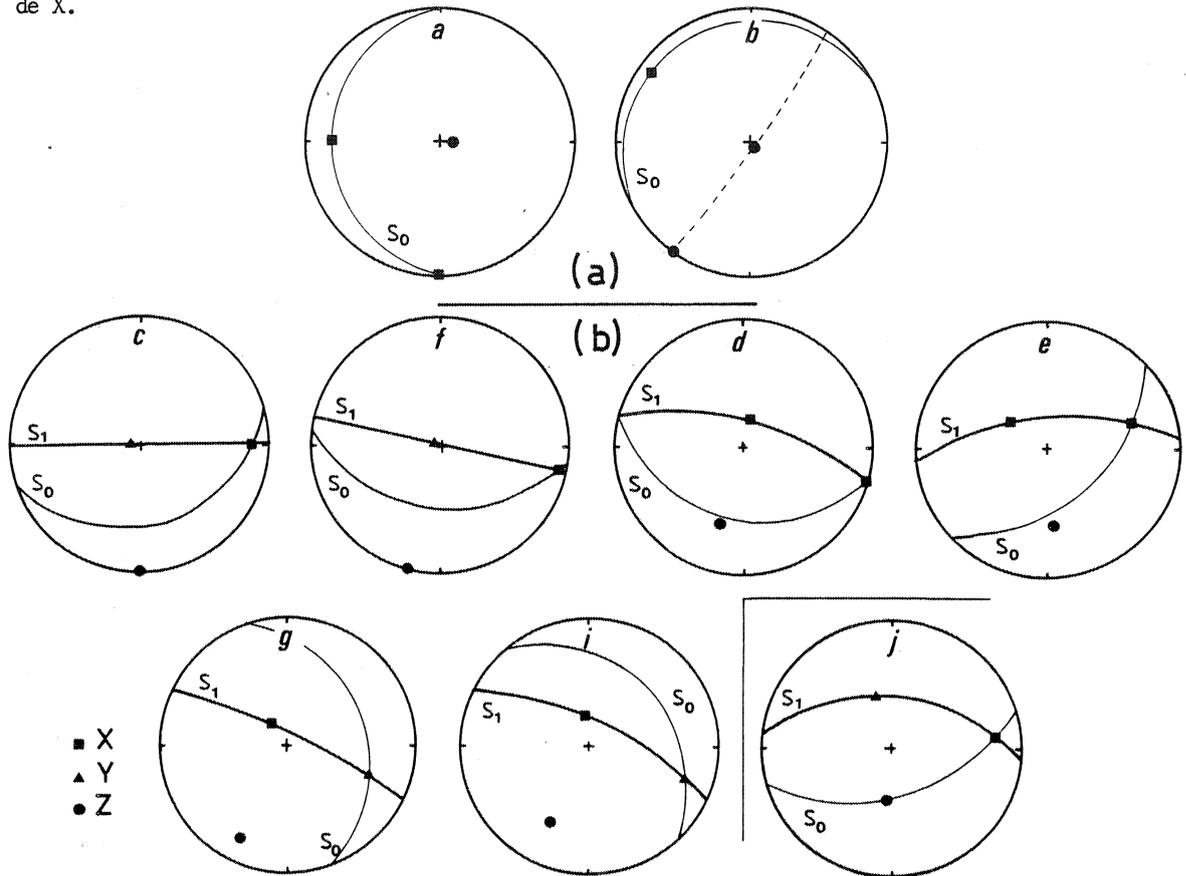


Fig. 16 - Mesures structurales moyennes par site. (a) sites A et B ; pointillé (site B) : plan de révolution $\lambda_2 = \lambda_3$; site A : S_0 est plan de révolution $\lambda_1 = \lambda_2$; (b) sites des vallées de la Tinée et de la Roya. S_0 : plan de stratification ; S_1 : plan de schistosité.

En remontant vers le Nord on observe le développement d'une forte schistosité toujours subverticale. Au site F, l'ellipsoïde repasse dans le domaine de l'aplatissement (Fig. 20) l'axe d'allongement X est toujours subhorizontal et parallèle à l'intersection S_0/S_1 ; les mesures de taches dans le plan subvertical YZ (Fig. 19) montrent une symétrie des fluctuations angulaires de l'axe intermédiaire Y par rapport à la trace de la schistosité ; le plan de schistosité est donc assimilé au plan de déformation XY.

Les sites D et E illustrent le stade "en galette" ($K = 0$, Fig. 20) où l'ellipsoïde en aplatissement est de révolution autour de Z dans la schistosité. Les mesures de taches dans les trois plans sont compatibles entre elles : $\lambda_1 = \lambda_2$ (Fig. 17) et $\lambda_1/\lambda_3 = \lambda_2/\lambda_3$ (Fig. 18 et 19).

Les sites G et I, enfin montrent les stades les plus poussés de la déformation dans ces séries : les ellipsoïdes, toujours de type aplatissement (Fig. 20) ont l'axe d'allongement X qui se parallélise à la linéation d'étirement minéral, subverticale dans le plan de

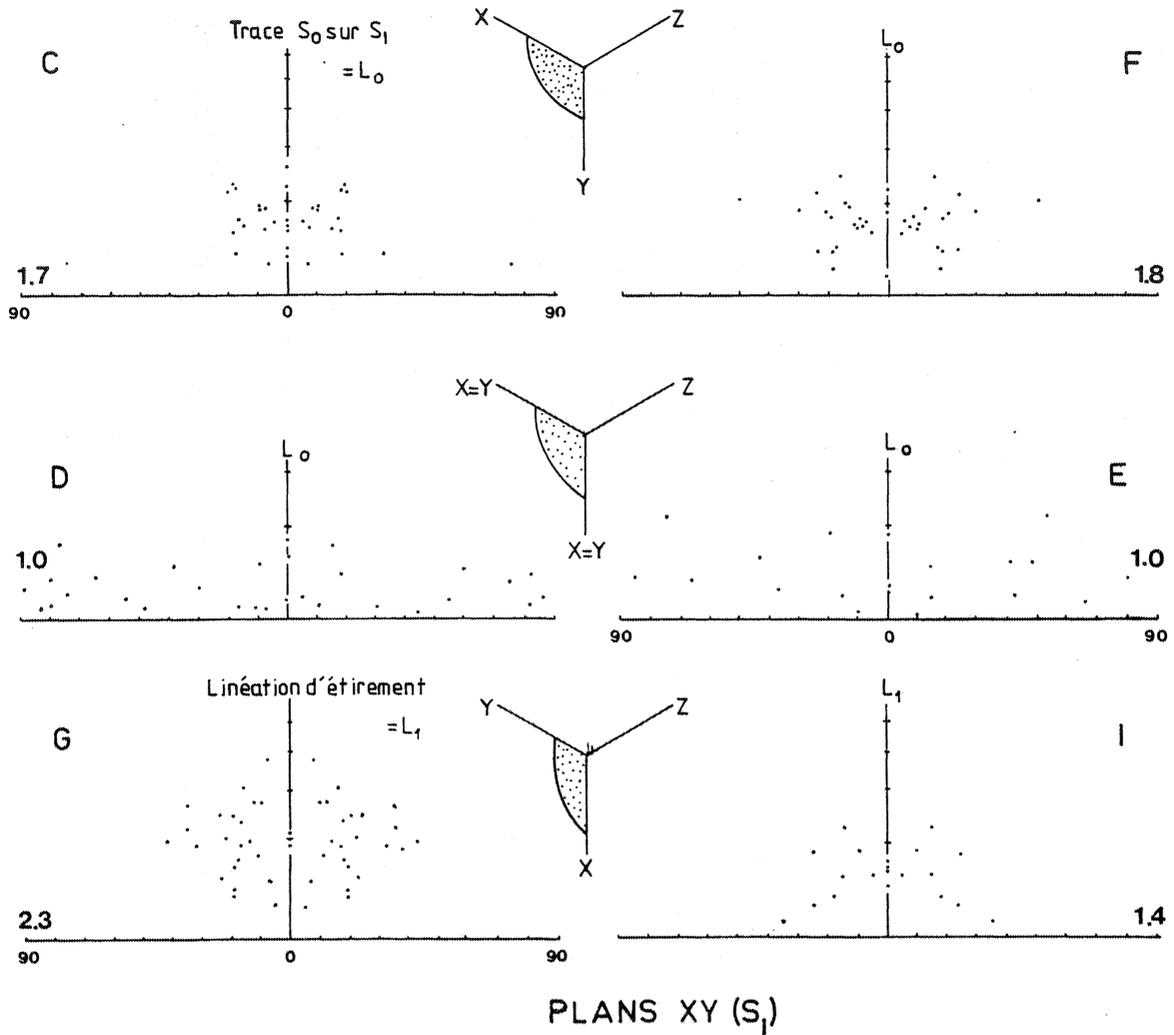


Fig. 17 - Vallée de la Tinée : diagrammes Rf/ϕ des mesures effectuées dans le plan de schistosité. Les systèmes d'axes XYZ illustrent de manière schématique l'évolution des axes de la déformation entre les sites ; pointillé : plan de mesure. Les rapports moyens déterminés sont reportés sur ces diagrammes.

schistosité. Comme il a été noté en première partie (Chapitre II) certaines difficultés apparaissent pour les mesures de plan de stratification. Un exemple est illustré Fig.21 pour le calcul de S_0 sur le site G.

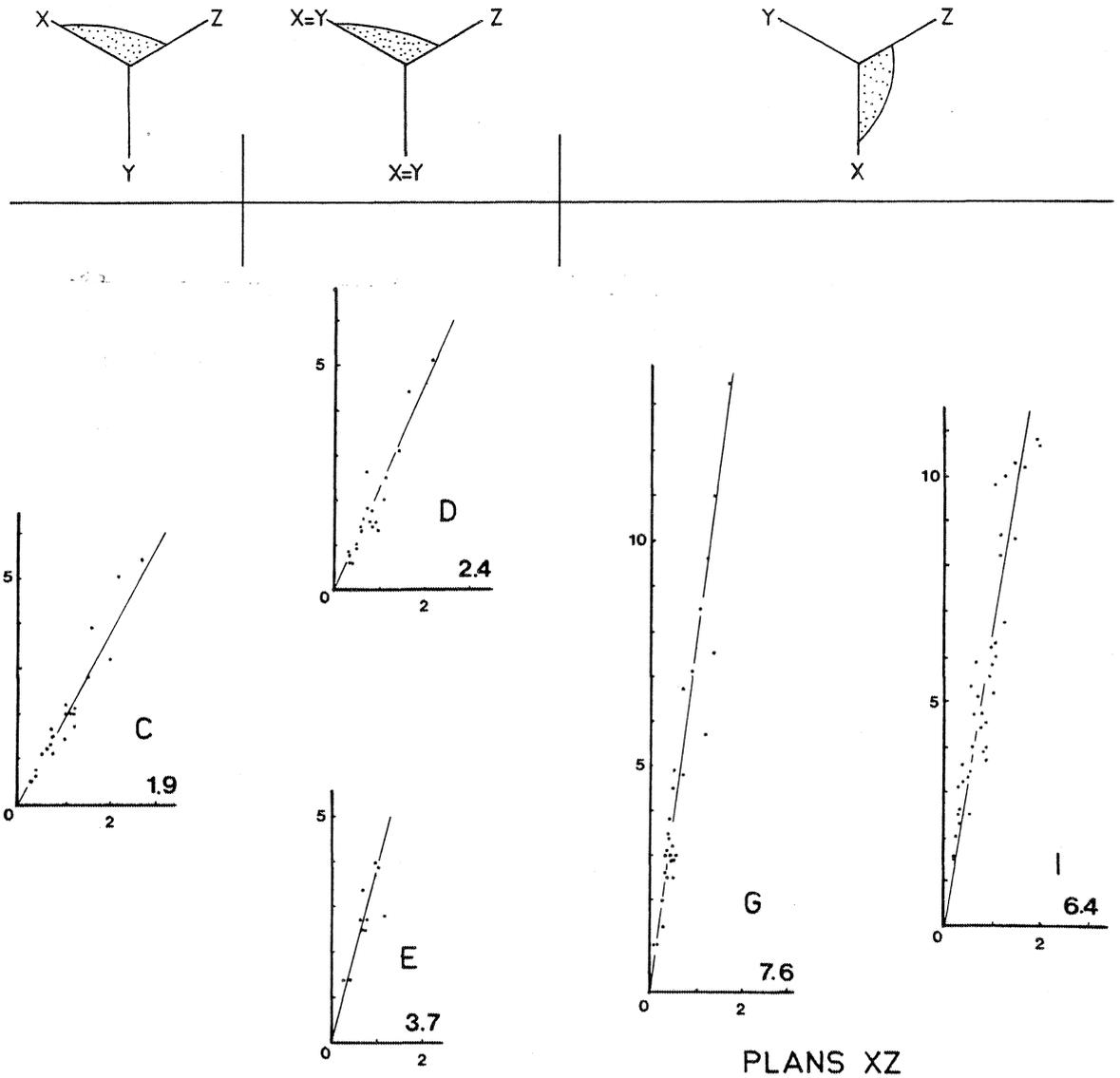


Fig. 18 - Vallée de la Tinée : diagrammes Grand Axe/Petit Axe des mesures effectuées dans le plan XZ ; graduations en cm. Systèmes d'axes XYZ et fractions d'ellipses : voir figure 17.

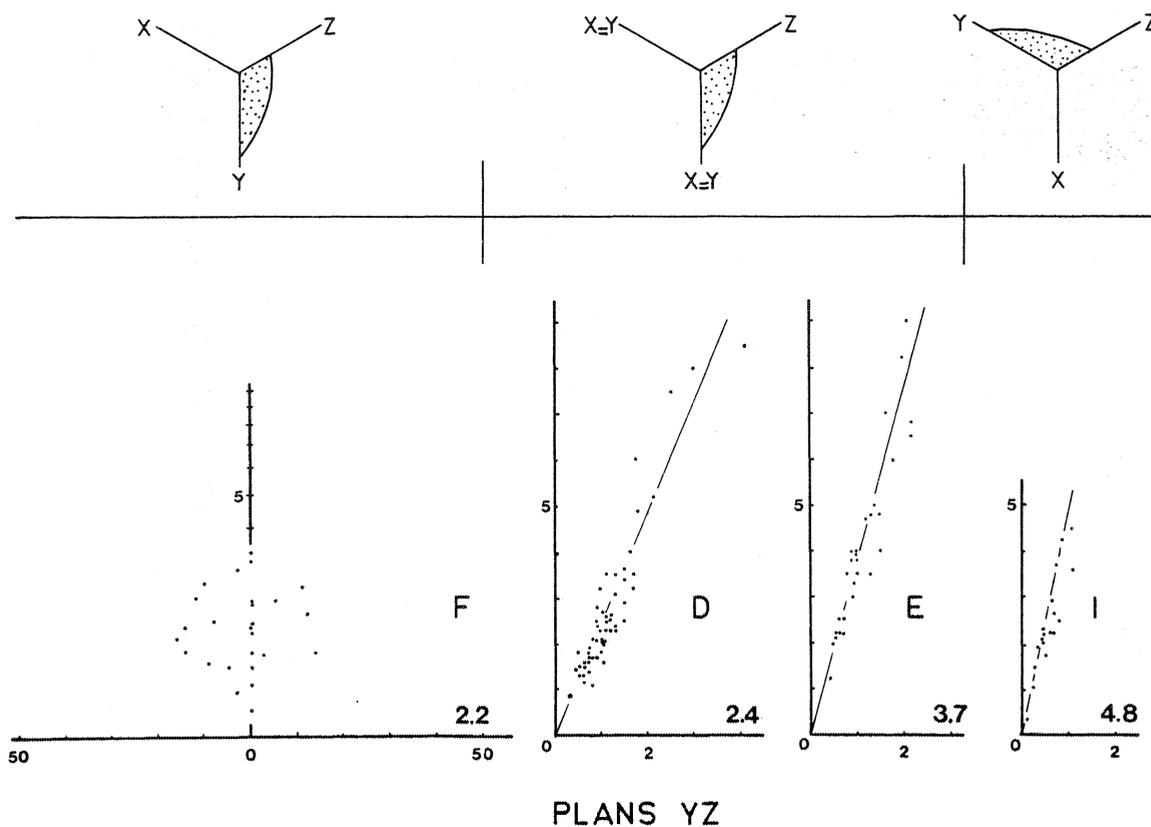


Fig. 19 - Vallée de la Tinée : diagrammes Rf/ϕ et Grand Axe/ Petit Axe des mesures effectuées dans le plan YZ.

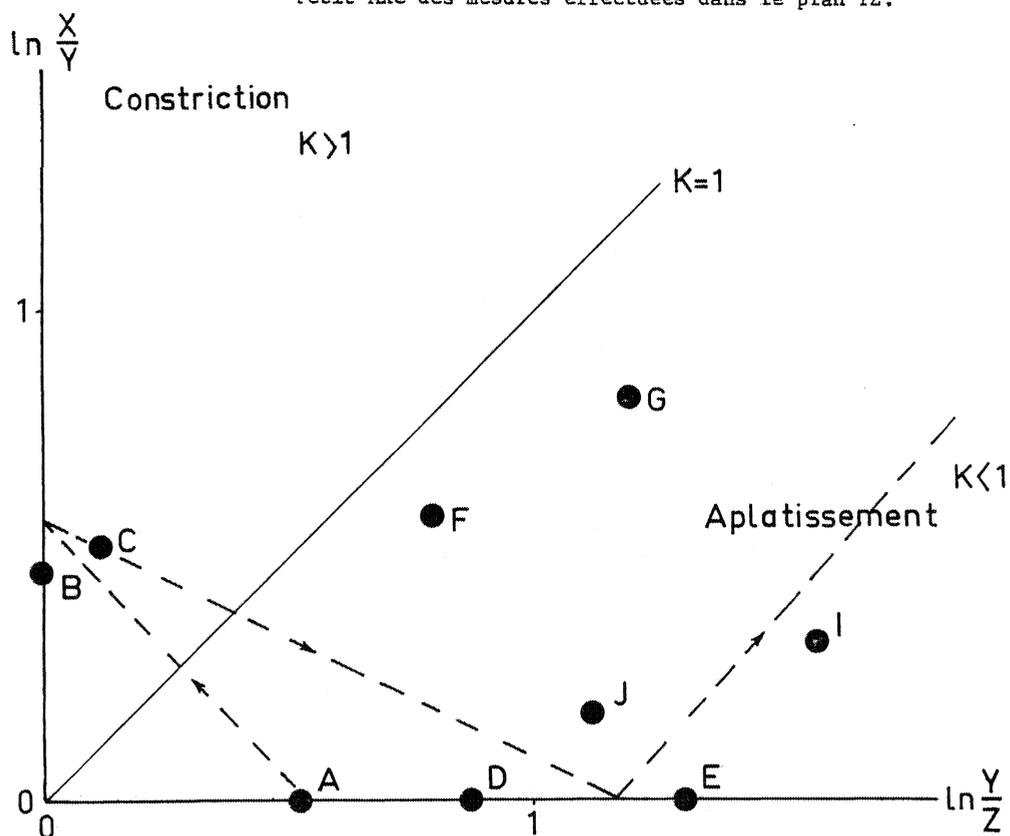


Fig. 20 - Diagramme logarithmique de Flinn donnant la répartition des sites étudiés. Pointillé : droite qualitative de l'évolution des ellipsoïdes (d'après Graham, 1978a).

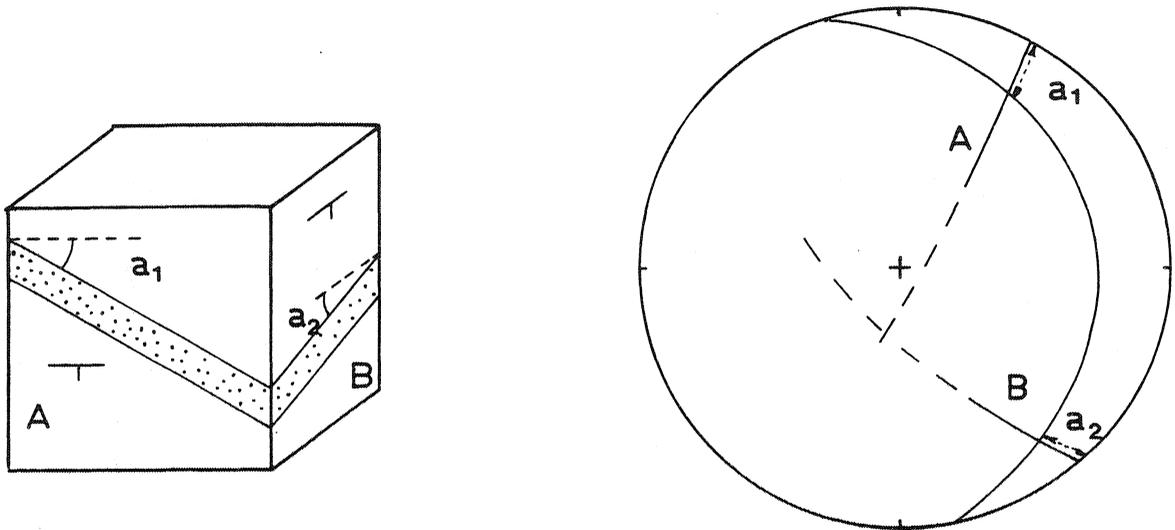


Fig. 21 - Exemple de détermination du plan de stratification d'après les mesures de sa trace sur 2 plans A et B. Site G, Vallée de la Tinée.

Vallée de la Roya.

L'unique site (J) échantillonné dans cette zone présente un ellipsoïde en aplatissement (Fig. 22) avec l'axe d'allongement subhorizontal, parallèle à l'intersection S_1/S_0 . Replacé dans le gradient de la déformation décrit dans la vallée de la Tinée, ce site illustre un stade intermédiaire entre les sites F et D;

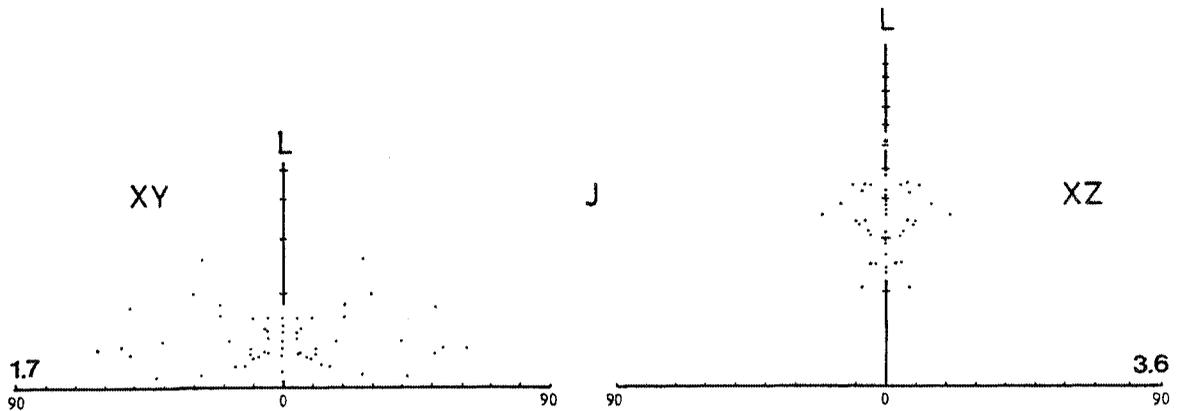


Fig. 22 - Site J (Vallée de la Roya). Diagrammes Rf/ϕ des mesures effectuées dans les plans XY et XZ.
L : Intersection S_1/S_0 .

2. Synthèse.

A partir des données de rapport axiaux présentées ci-dessus, on peut calculer les 3 valeurs propres λ_1 , λ_2 et λ_3 du tenseur de déformation S pour chaque site (Tableau II). Les mesures des plans de stratification, de schistosité et les linéations d'étirement donnent l'orientation des axes principaux de la déformation (Tableau III).

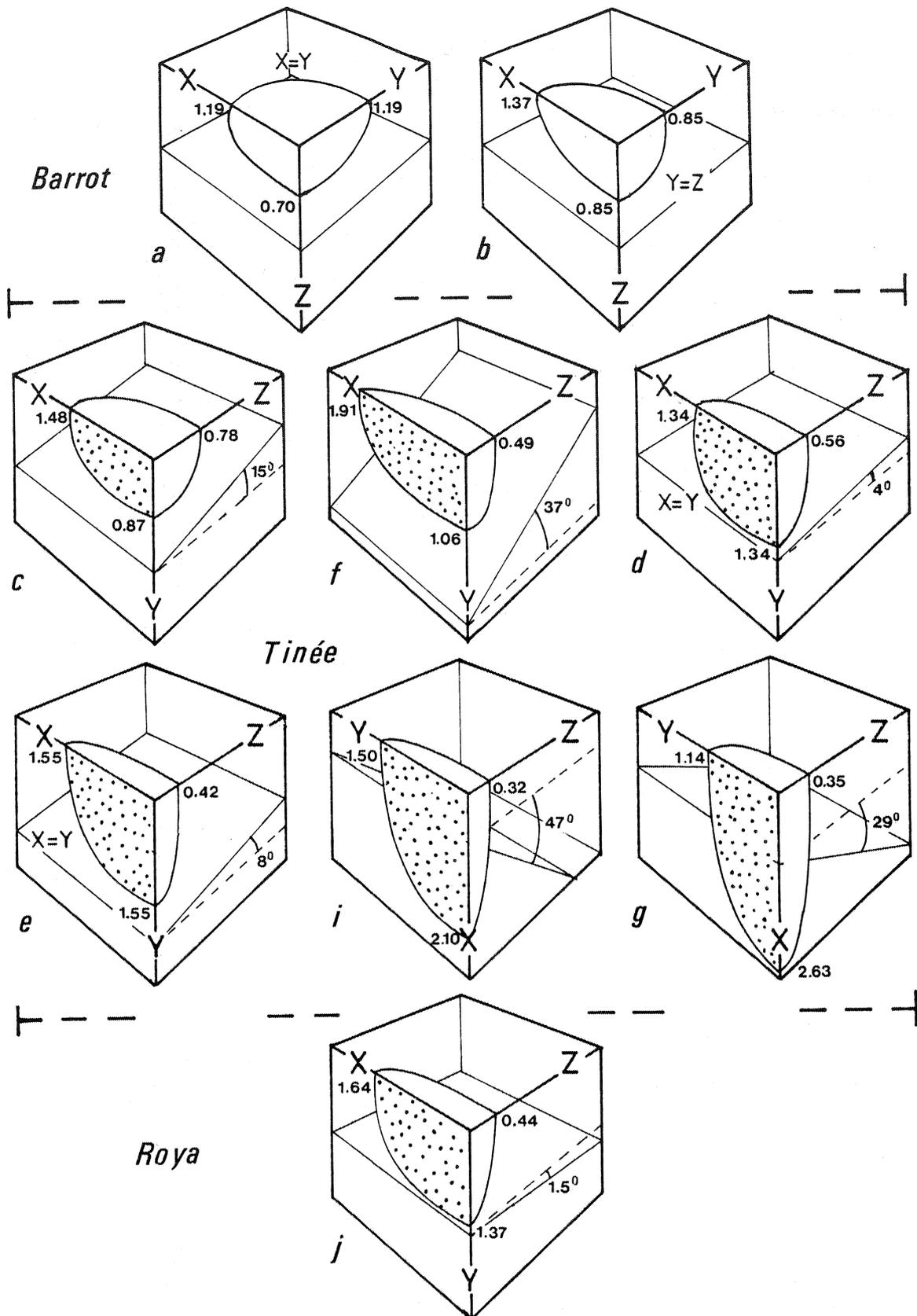


Fig. 23 - Blocs-diagrammes schématiques illustrant les données acquises sur la déformation interne des sites étudiés : valeurs des axes de l'ellipsoïde (λ_i), relations angulaires des axes de la déformation (X,Y,Z) avec le plan de stratification. Fractions d'ellipses pointillées : schistosité.

La figure 23 donne une illustration schématique de ces données : forme de l'ellipsoïde, longueur des axes, relations angulaires S_0 /axes principaux. Les sites échantillonnés illustrent donc bien l'évolution de la déformation de ces séries, du Sud vers le Nord :

- *Dôme de Barrot* : ellipsoïdes "en galette" aplatis dans la stratification (site A), puis (site B) l'apparition d'une élongation parallèle à la schistosité présente plus au Nord donne une forme "en cigare" (constriction) à l'ellipsoïde de déformation.

- *Vallées de la Tinée et de la Roya* : on assiste au développement de la schistosité subverticale, de plus en plus intense du Sud vers le Nord. Partant du stade en constriction (site C), les ellipsoïdes s'aplatissent dans la schistosité, avec l'axe X subhorizontal (sites F, J) repassent à un stade "en galette" ($K = 0$, sites D, E), enfin, les stades les plus évolués montrent des ellipsoïdes très aplatis dans la schistosité avec l'axe d'allongement subvertical, parallèle à la linéation d'étirement contenue dans la schistosité (sites G, I).

3. Estimation de la rotation rigide

Les mesures de stratification ont été faites, soit sur les plans eux-mêmes lorsqu'ils sont matérialisés sur le terrain, soit en mesurant leur trace sur d'autres plans comme cela a été exposé en première partie (Chapitre II) et illustré figure 21. Quelles qu'en soient les modalités, ces mesures ont toujours été effectuées sur des surfaces ne montrant pas de contraste rhéologique avec les bancs où ont été mesurées les taches de réduction. On peut donc considérer ces plans comme passifs au cours de la déformation progressive et attribuer leur orientation observée dans l'état déformé au résultat de la combinaison d'une rotation rigide et d'une déformation interne.

En effectuant la déformation inverse de ces plans, le pendage résiduel sera considéré comme représentatif de la composante de rotation rigide de la déformation finie.

Pour les sites A et B, la stratification étant elle-même assimilée au plan XY de déformation finie, elle ne sera pas affectée par la déformation inverse. Pour les autres sites les résultats sont exposés dans le tableau IV.

Sites	λ_1/λ_2	λ_2/λ_3	K	R	λ_1 ($\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$)	λ_2	λ_3
A	1.00	1.7	0	1.70	1.193	1.193	0.702
B *	1.60	1.00	∞	1.60	1.368	0.855	0.855
C	1.70	1.10	4.682	1.80	1.478	0.869	0.778
F	1.80	2.20	0.745	3.00	1.915	1.063	0.491
D	1.00	2.40	0	2.40	1.339	1.339	0.558
E	1.00	3.70	0	3.70	1.546	1.546	0.418
G	2.30	3.30	0.697	4.60	2.629	1.143	0.346
I	1.40	4.80	0.214	5.20	2.098	1.499	0.318
J	1.20	3.10	0.162	3.30	1.643	1.369	0.444

Tableau II : Rapports axiaux, paramètres de la déformation et valeurs propres du tenseur S pour chaque site. Les sites C à I sont présentés dans l'ordre du gradient croissant.
 K : paramètre de forme défini : $K = \ln(\lambda_1/\lambda_2)/\ln(\lambda_2/\lambda_3)$
 R : paramètre d'intensité $R = (\lambda_1/\lambda_2) + (\lambda_2/\lambda_3) - 1$
 * : d'après Graham (1978a)

Sites	S_0		S_1		X		Z		
	D	P	D	P	D	I	D	I	
A	181.5	10.5	—	—	—	—	91.5	79.5	
B	242.5	5.5	—	—	305.0	5.0	—	—	
C	72.0	25.0	90.0	90.0	90.0	8.0	180.0	0.0	
F	96.0	37.0	102.0	90.0	102.0	4.5	192.0	0.0	
D	105.0	30.0	285.0	64.0	—	—	195.0	26.0	
E	46.5	45.0	264.5	61.0	—	—	174.5	28.5	
G	340.0	26.0	295.5	78.5	324.0	66.5	205.5	11.5	
I	317.5	26.5	295.5	67.5	353.0	13.0	205.5	23.0	
J	73.5	46.0	276.5	44.5	89.5	11.5	186.5	45.5	
D : Direction P : Pendage					D : Déclinaison I : Inclinaison				

Tableau III : Directions structurales moyennes . L'axe intermédiaire Y est orthogonal à X et Z.

Remarques : (1) sites A,B,D,E : l'ellipsoïde est de révolution autour de l'un des axes ; les 2 autres ont donc une direction arbitraire dans le plan perpendiculaire à l'axe défini. (2) Définitions structurales des axes :
- Z : site A : pôle S_0 , sites C à J : pôle S_1 .
- X : site B : direction moyenne d'allongement des taches sites C,F,J : L_{S_0/S_1} , sites G,I : L_1 (perpendiculaire à L_{S_0/S_1}).

SITES	Mesurées		Dédéformées	
	D	P	D	P
C	72.0	25.0	70.00	23.0
F	96.0	37.0	89.0	19.5
D	105.0	30.0	105.0	27.5
E	46.5	45.0	41.0	40.0
G	340.0	26.0	44.0	21.5
I	317.5	26.5	69.0	19.5
J	73.5	46.0	75.0	47.0

Tableau IV : Orientations du plan de stratification avant et après déformation inverse. D : Direction ; P : Pendage.

Ces orientations de la stratification après déformation inverse seront utilisées pour effectuer la rotation rigide inverse, dernière étape de la déformation inverse des vecteurs aimantation.

IV - ETUDE PALEOMAGNETIQUE.

1. A.R.N.

Tous les échantillons, 154 au total, de ces sites ont été soumis à un test de viscosité. Dans l'ensemble, le trainage dans le champ du laboratoire s'avère relativement faible, 91% des échantillons ayant un coefficient de viscosité inférieur à 20% (Fig. 24b). L'histogramme de fréquence des intensités d'aimantation rémanente (Fig. 24a) montre une bonne homogénéité de ces intensités, comprises entre 0.01 et 1 Am^{-1} pour 99% des spécimens.

Du point de vue des directions (Fig. 24c) bien que groupées dans le quart SW de la projection, elles sont relativement dispersées, principalement en inclinaison. Deux remarques peuvent être faites :

- D'une part, il n'existe pas avant correction de pendage, de tendance significative de ces directions vers un champ récent ou actuel (Fig. 24c). La phase majeure de déformation alpine étant d'âge Oligo-Miocène, on peut supposer qu'il n'y a pas de composante importante syn- ou post-tectonique.

- La distribution des moyennes par site (Fig. 24 d et e) montre un test de plissement négatif, k passant de 32 (In Situ) à 8.5 (après correction de pendage) pour $n = 9$ ce qui est statistiquement significatif. Il existe donc là un problème important : des directions d'aimantation à affinité permienne (déclinaison SW) et à priori anté-tectonique sont plus dispersées après correction de pendage qu'avant. Il est donc permis de supposer en première approximation que la déformation interne, qui peut être très poussée dans la majorité des sites, est responsable au moins pour partie de cette importante dispersion.

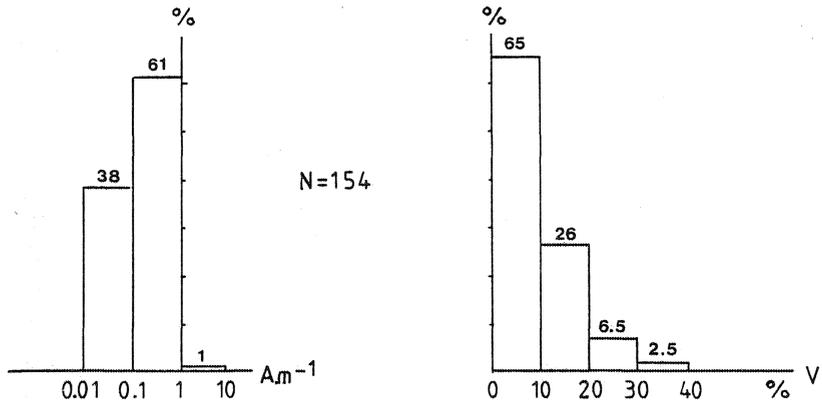
Cependant, afin d'isoler la composante primaire d'une aimantation éventuellement multivectorielle, l'analyse de cette aimantation rémanente a été effectuée par les techniques de désaimantation thermiques et chimiques.

2. Désaimantations : comportement magnétique.

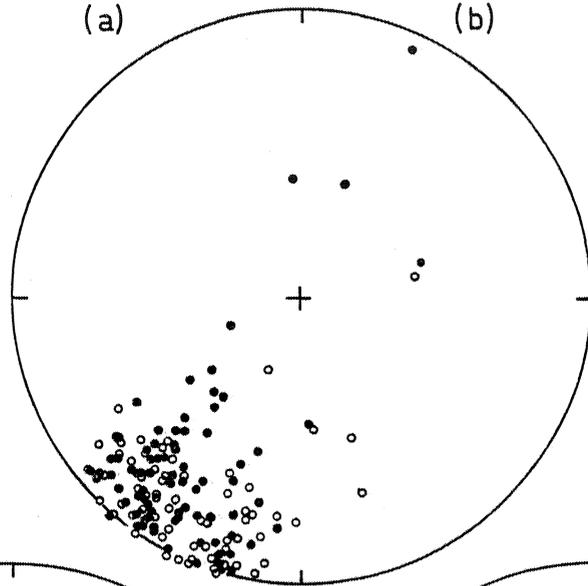
Dans l'étude paléomagnétique du Dôme de Barrot, Van Den Ende (1977) fait subir à ses échantillons des désaimantations par champ alternatif jusqu'à des valeurs de champs de 3000 Oe. Cependant, même pour ces valeurs l'intensité ne décroît que de l'ordre de 15 à 30%. L'appareillage du laboratoire ne permettant d'atteindre que 1000 Oe de champ alternatif, j'ai laissé cette technique de côté, au profit des désaimantations thermiques et chimiques plus efficaces.

a. Désaimantations thermiques.

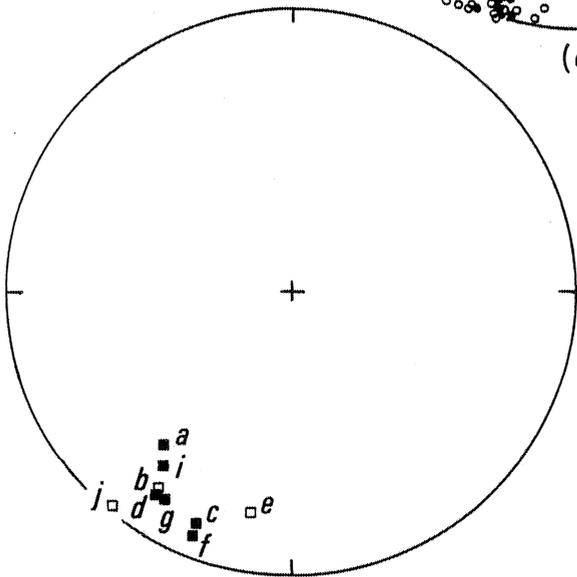
Les résultats obtenus par cette méthode ont posé des problèmes dans la majorité des cas. Il n'y a guère que pour le site E que l'on obtient des courbes de désaimantation aisément interprétables (Fig. 25a). Sur ce site il n'apparaît qu'une direction stable, dont l'intensité décroît brusquement à des températures proches de la température de blocage de l'hématite, 680°C (Fig. 25b).



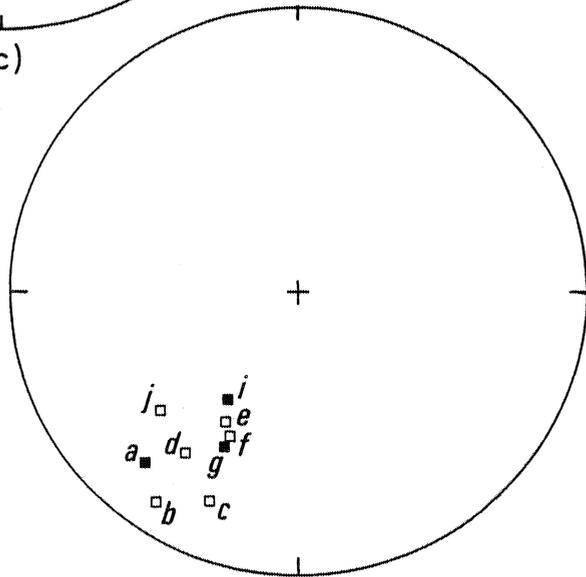
(a) (b)



(c)



(d)



(e)

Fig. 24 - ARN (a) Histogramme de fréquence des intensités (b) Histogramme de fréquence des pourcentages de viscosité (c) IS 154 specimens (d) directions moyennes par site, IS (e) Idem, CP.

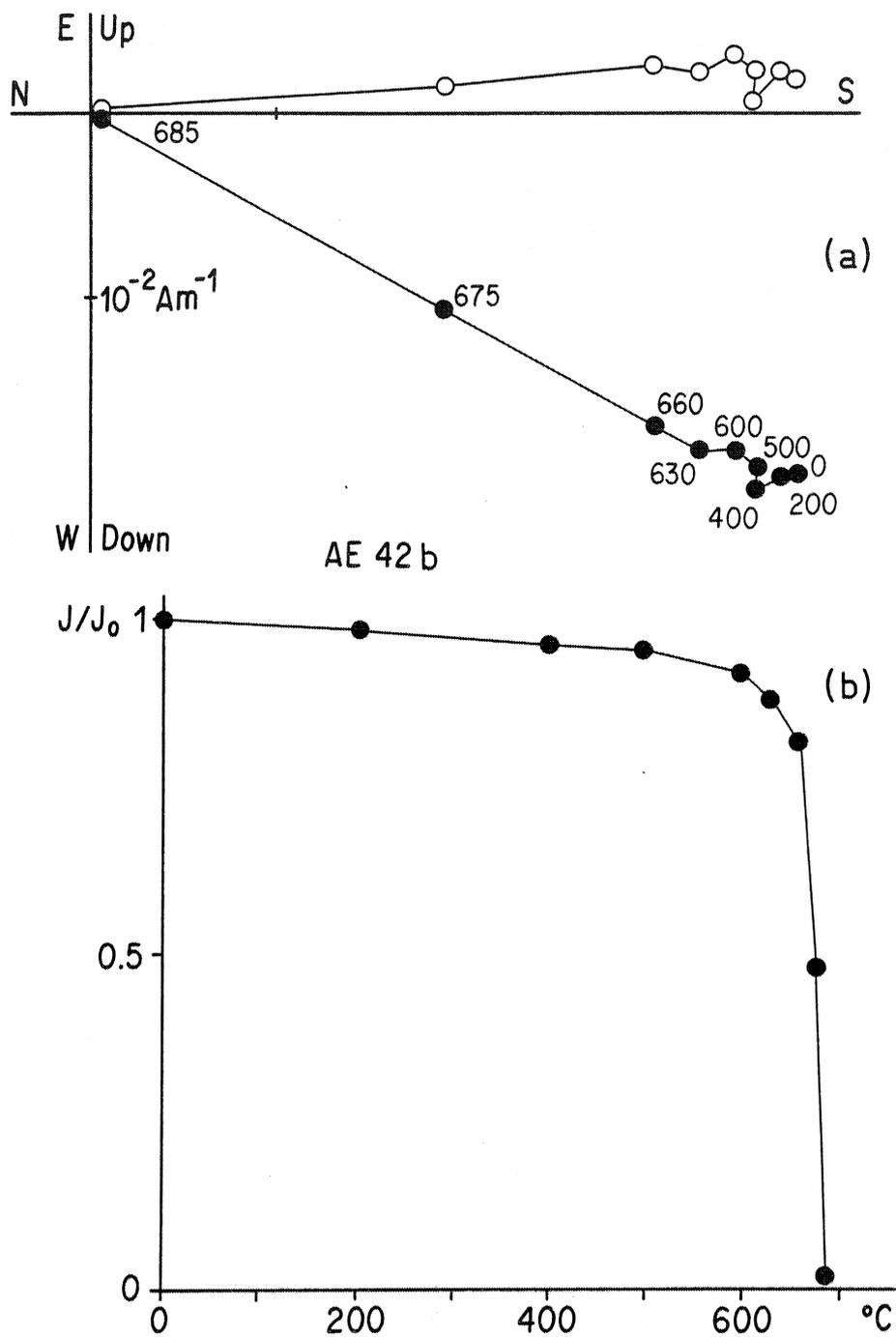


Fig. 25 - Désaimantation thermique d'un échantillon du site E. (a) diagramme de Zijderveld ; les chiffres sur la courbe indiquent les températures en $^{\circ}\text{C}$. (b) Evolution de l'intensité en fonction de la température.

Sur les autres sites, il existe des cas où l'on peut séparer deux composantes par cette méthode (Fig. 26), mais ils sont dans l'ensemble assez rares.

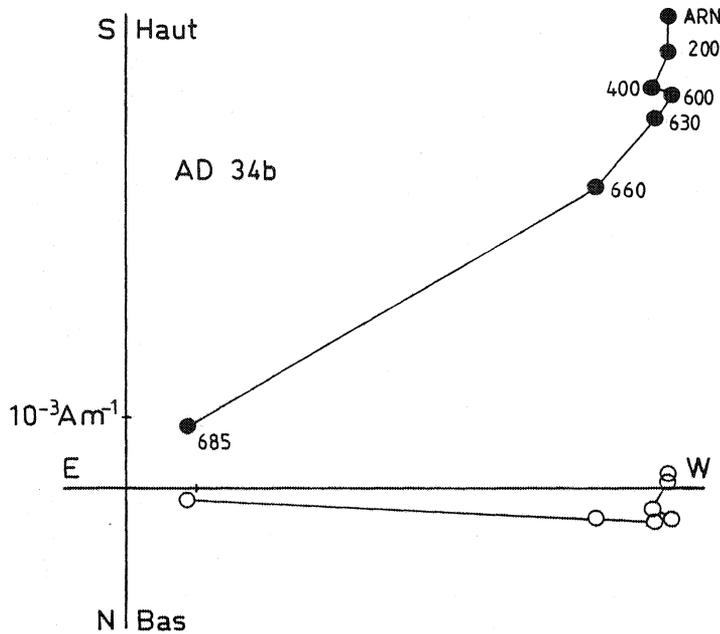


Fig. 26 - Diagramme de Zijderveld de la désaimantation thermique d'un échantillon présentant deux composantes qui peuvent être séparées.

- *Mauvaise séparation des composantes* : ceci se manifeste par une constante évolution en déclinaison, en inclinaison ou les deux de la résultante mesurée à chaque étape de la désaimantation, suivie d'une brusque chute de l'intensité mesurée sans que l'on ait atteint une direction stable (Fig. 27a). Ceci est dû au fait que les composantes sont portées par des minéraux à T° de blocage similaire ce qui fait que l'aimantation évolue peu aux températures inférieures puis décroît brusquement au voisinage de la température de Curie sans que l'on ait pu séparer les diverses composantes.

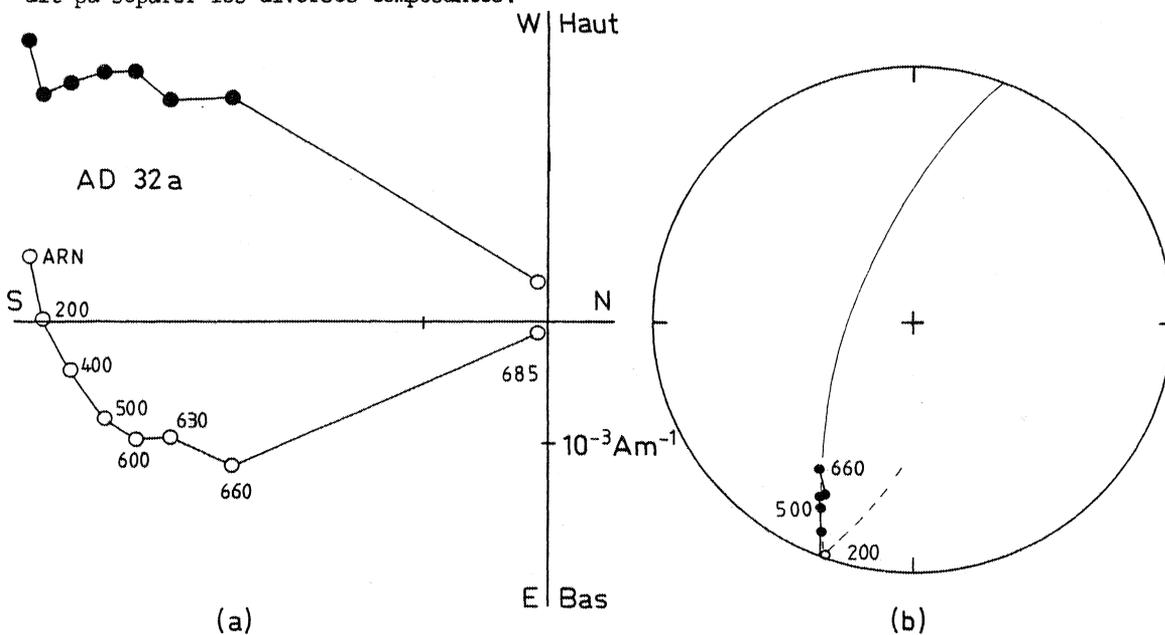


Fig. 27 - Désaimantation thermique ne séparant pas deux composantes (a) diagramme de Zijderveld (b) projection stéréographique de l'évolution du vecteur aimantation ; le plan calculé par la méthode des grands cercles est représenté (pointillé : hémisphère supérieur).

Cependant, s'il n'existe que 2 composantes d'aimantation contribuant à la rémanence totale, elles définissent un plan de réaimantation (PR) sur lequel évoluent les résultantes mesurées durant la désaimantation (Fig. 27b). Ce plan peut être calculé à partir du tenseur d'orientation des données (Scheidegger, 1965) dont le vecteur propre associé à la plus petite valeur propre (λ_3) représente le pôle du meilleur plan passant par ces données. Un facteur de qualité $Q = \lambda_3 / \lambda_1 \lambda_2$ (Halls, 1978) contrôle la répartition dans un plan : alignement parfait : $Q = 0$; distribution aléatoire : $Q = 1$.

Si l'une des composantes est aléatoire à l'échelle du site, les grands cercles ainsi calculés sur plusieurs échantillons se couperont suivant la droite support de la composante d'aimantation commune à tous les échantillons. Cette intersection peut être calculée de la même manière que le pôle du plan de réaimantation et on peut déterminer une "ellipse de confiance" à 95% (Westphal, 1980) qui donne une visualisation de l'erreur dans la détermination de cette intersection au même titre que l' α_{95} de la statistique de Fisher (Fig. 28).

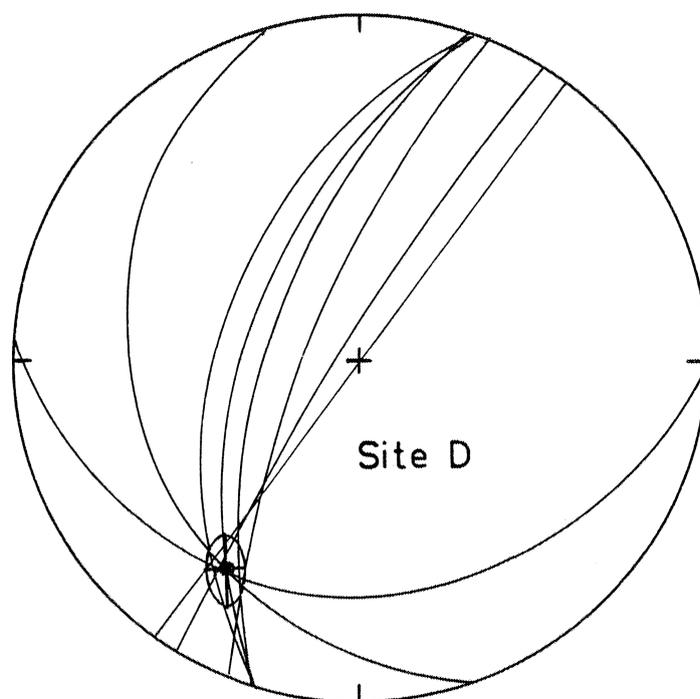


Fig. 28 - Exemple de la détermination (site D) de la direction moyenne d'aimantation du site par intersection de grands cercles. Chaque grand cercle correspond aux données d'un spécimen traité thermiquement.

Par contre, si les deux composantes sont identiques pour tous les échantillons, les plans qu'elles définissent seront subparallèles et il ne sera alors pas possible d'estimer la direction moyenne du site.

- *Modifications minéralogiques en cours de chauffe.* Pour un nombre d'échantillons également important, les courbes de désaimantation ne montrent aucune décroissance de l'intensité à température élevée (Fig. 29a, d). Au contraire, on observe une hausse importante de l'intensité d'aimantation jusque au-delà du point de Curie de l'hématite (Fig. 29b, e). Des acquisitions d'ARI effectuées sur ce type d'échantillon après traitement thermique (Fig. 29c, f) montrent que 45 à 60% de l'aimantation à 1.25T est acquise pour un champ inférieur à 0.1T.

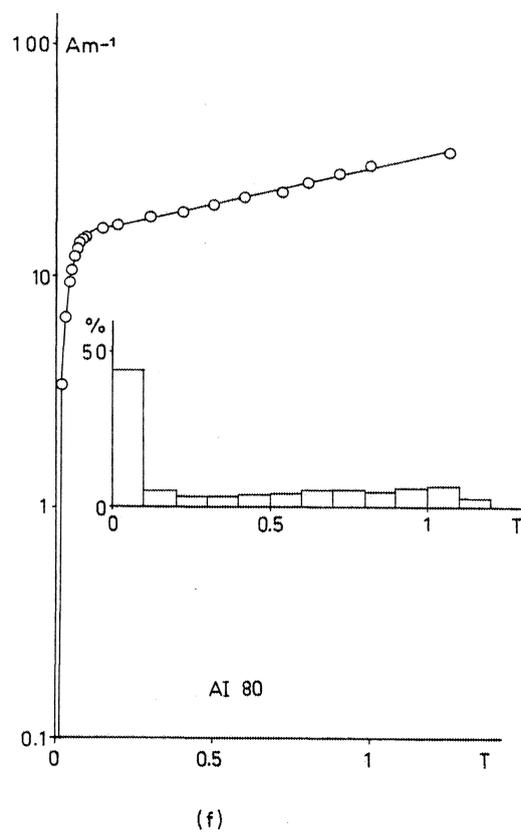
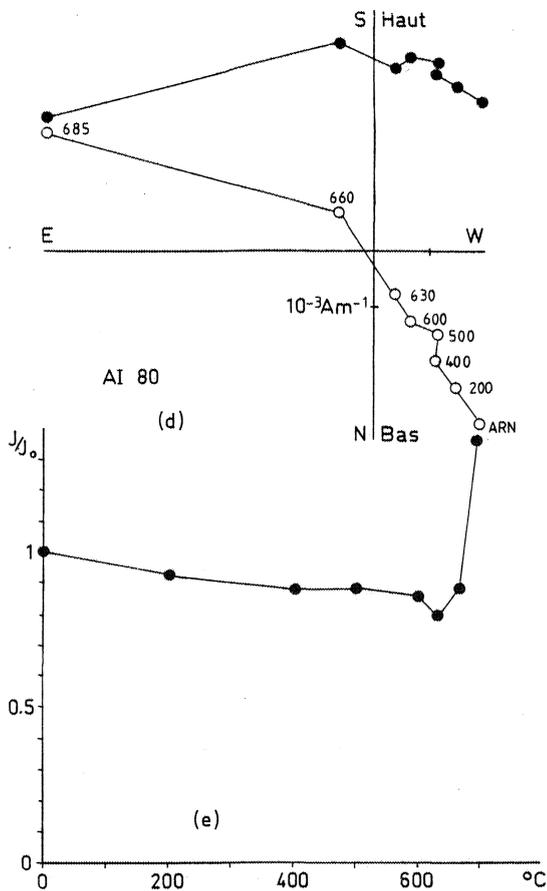
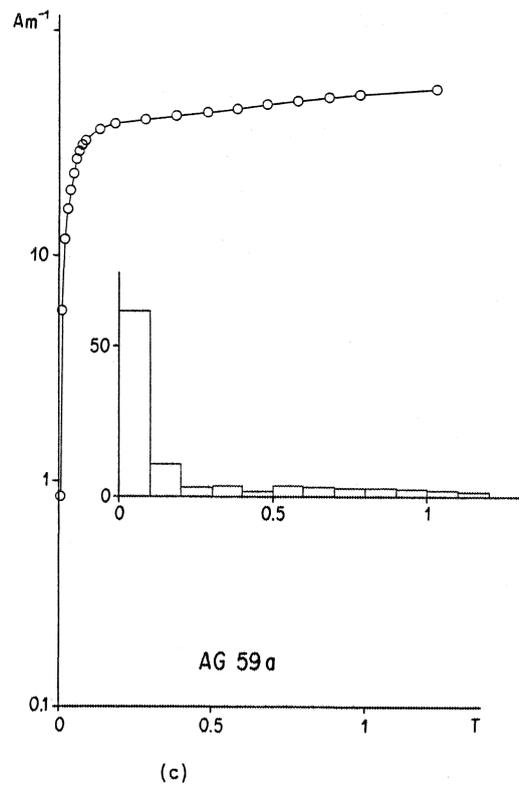
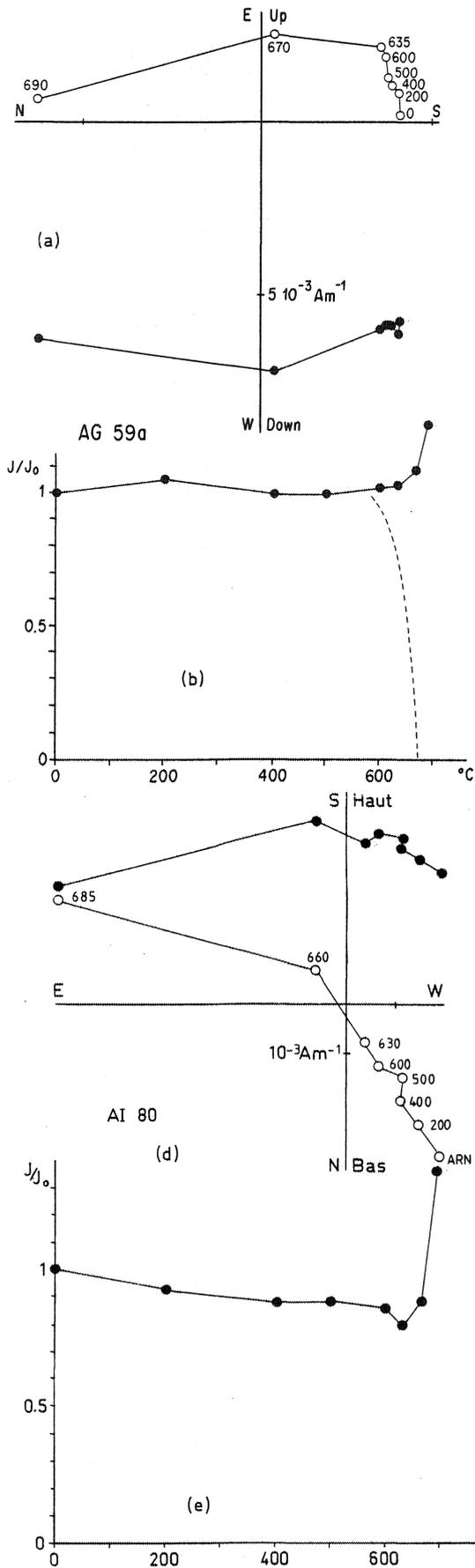


Fig. 29 - Comportement magnétique de deux échantillons en cours de chauffe (a) (d) Diagrammes de Zijderveld (b, e) évolution de l'intensité d'aimantation en fonction de la température (f, g) Courbes d'acquisition de l'ARI et spectres de coercivité correspondants.

Ce spectre de coercivité est typique de minéraux de type magnétite, mais ne correspond absolument pas à un spectre de schistes rouges classique (Collinson, 1968 ; Dunlop, 1972 ; Perroud, 1980). Comme cela a été proposé par Dunlop (1972) ce type de comportement est interprété comme résultant de la production de magnétite en cours de chauffe. On peut noter par ailleurs, que l'acquisition d'aimantation se poursuit sans atteindre la saturation jusqu'aux valeurs élevées de 1,25 T. Ceci est caractéristique de la présence d'hématite pigment soulignée par la persistance de la coloration rouge de la roche après traitement thermique. Deux processus peuvent être à l'origine de cette production de magnétite : soit une réduction de l'hématite, soit une destabilisation de silicates riches en fer (Dunlop, 1972).

Quoi qu'il en soit, cette magnétite est responsable de l'augmentation de l'intensité constatée. Dans la mesure où le refroidissement à chaque étape est effectué en champ nul, l'aimantation n'est vraisemblablement par une thermorémanente mais plutôt une aimantation visqueuse dont l'intensité est fonction du temps et de la quantité de magnétite produite, croissante à chaque étape

Ce problème de production de magnétite m'a contraint à abandonner plusieurs échantillons. Cependant il peut exister deux moyens de déterminer une direction stable dans ce cas-là.

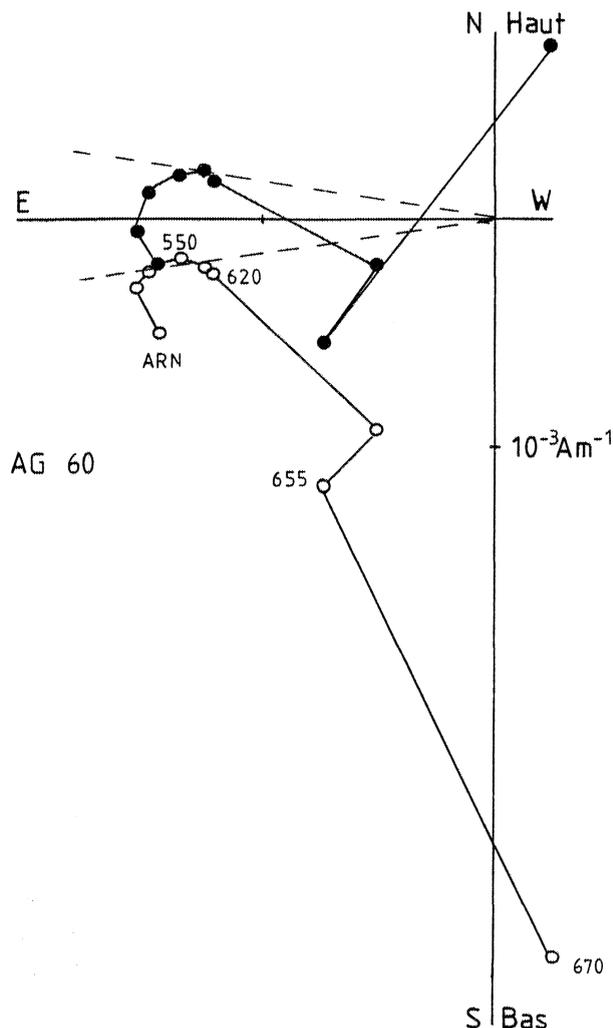


Fig. 30 - Désaimantation thermique avec modification minéralogique et réaimantation à partir de 550°C. Diagramme de Zijderveld en coordonnées échantillon. Pointillé : direction d'aimantation considérée comme caractéristique sur un tel échantillon.

- L'aimantation montre une direction stable avant l'apparition de phénomènes de ré-aimantation. Le cas est rare mais existe (Fig. 30) ; cette direction est souvent difficile à déterminer avec précision, aussi faudra-t-il prendre des précautions dans l'interprétation de ce type de résultat.

- L'aimantation mesurée à chaque étape évolue en direction jusqu'à ce que se produisent les modifications minéralogiques. Dans ce cas, les données peuvent être traitées par la méthode des grands cercles (Fig. 31).

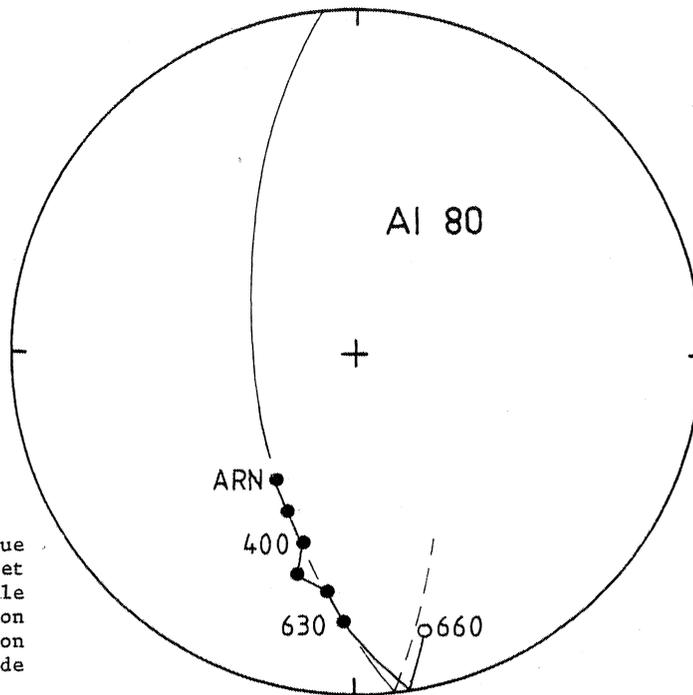


Fig. 31 - Désaimantation thermique avec modification minéralogique et réaimantation. Utilisation possible des données pour la détermination d'un grand cercle. (Echantillon AI 80 présenté en diagramme de Zijderveld Fig. 29(e)).

En conclusion, les désaimantations thermiques effectuées sur ces échantillons donnent des résultats délicats à interpréter :

- La méthode des grands cercles, si elle constitue parfois un recours intéressant pour déterminer la direction moyenne pour un site, peut s'avérer totalement inefficace. Ainsi, le site I, dont tous les échantillons ont été traités par cette méthode, a été complètement abandonné du fait de la mauvaise intersection des plans de réaimantation définis sur chaque échantillon (Fig. 32).

- On a vu que la technique de désaimantation thermique pouvait être inefficace pour la séparation de deux composantes portées par des porteurs magnétiques identiques, aussi le comportement univectoriel de certaines aimantations, telle que celle présentée en Figure 25, doit-il être confirmé par d'autres méthodes.

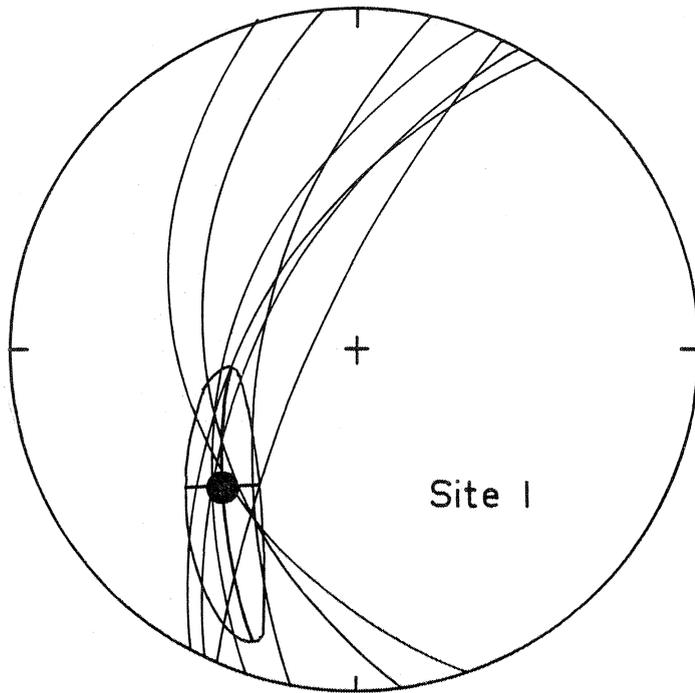


Fig. 32 - Direction d'aimantation moyenne In Situ du site I, déterminée par l'intersection des grands cercles. Le parallélisme de ceux-ci rend ces données inutilisables.

b - Désaimantations chimiques.

Des attaques chimiques par HCl ont été effectuées sur 30 spécimens des sites B, C, D, E, F et G. Les résultats de cette technique ont tous été excellents et ont permis d'isoler une composante finale stable pour tous les échantillons traités.

Du point de vue des intensités, les échantillons de tous les sites montrent le même type de comportement (Fig. 33) : décroissance linéaire en fonction du temps ; il n'est donc pas possible de mettre en évidence des minéraux de solubilité différente.

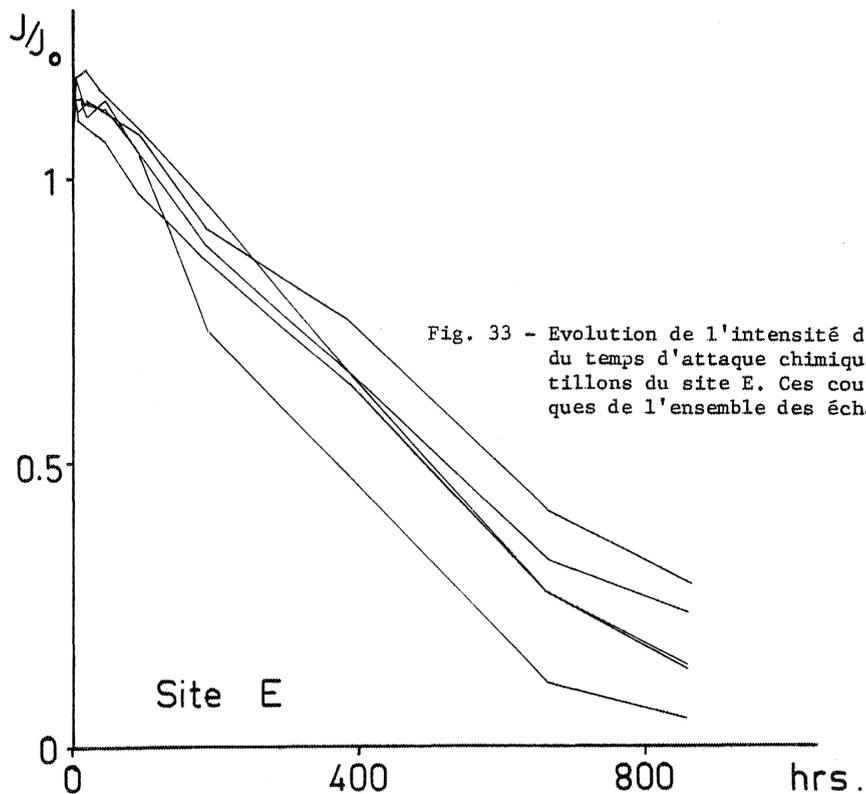


Fig. 33 - Evolution de l'intensité d'aimantation en fonction du temps d'attaque chimique (hrs) pour les échantillons du site E. Ces courbes sont caractéristiques de l'ensemble des échantillons traités.

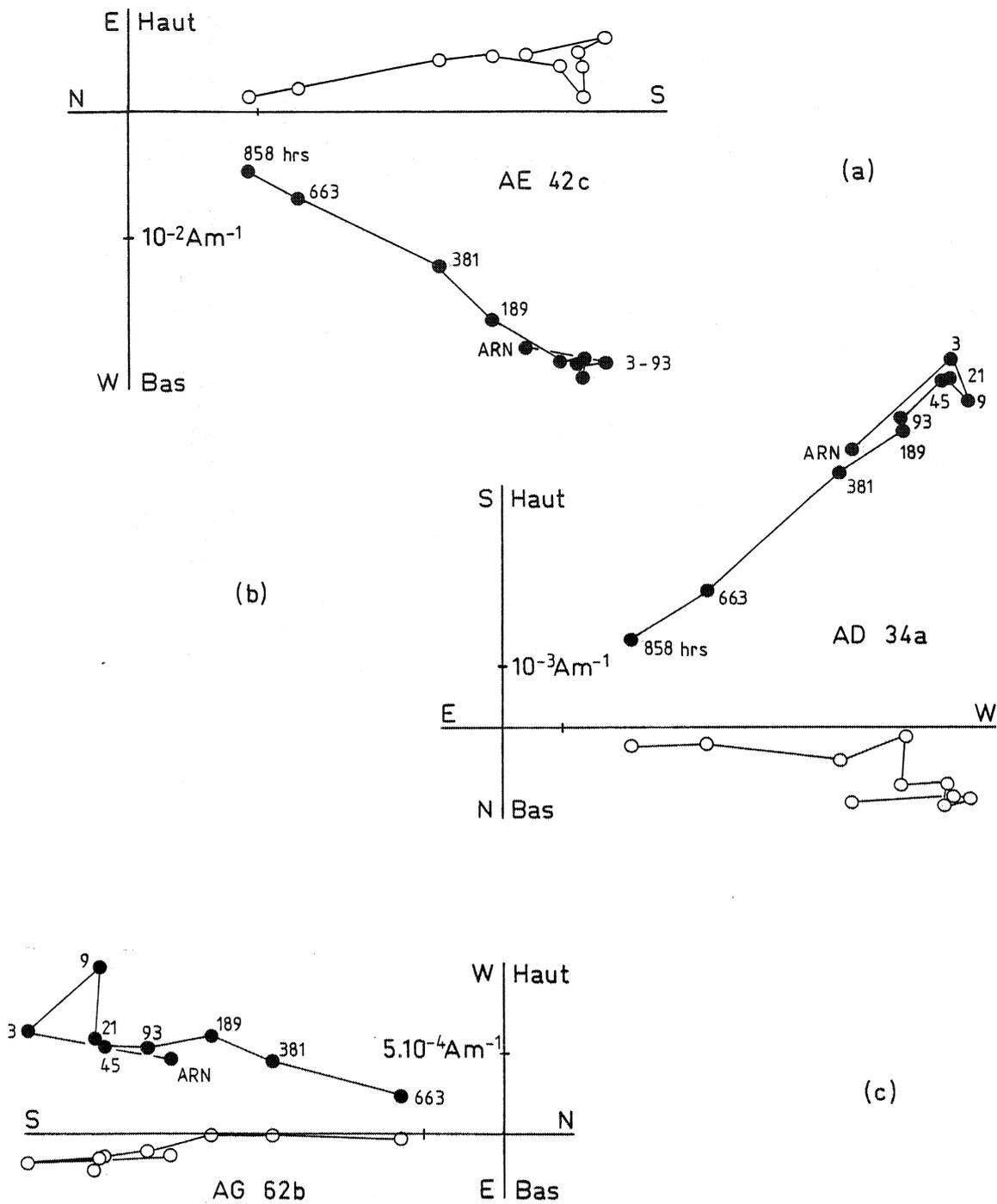


Fig. 34 - Desaimantations chimiques. Diagrammes de Zijderveld (1967).

La figure 34 montre quelques exemples de courbes de désaimantation chimiques en diagrammes de Zijderveld (1967). Quand cela a été possible, les 2 spécimens (ou plus) d'une même carotte ont été traités l'un thermiquement l'autre chimiquement. Les exemples illustrés figure 34 correspondent, sauf (c), à ce cas.

- L'échantillon AE 42c (Figure 34a) montre une composante finale stable dont l'orientation correspond bien à l'unique composante mise en évidence thermiquement sur l'échantillon AE 42b (Figure 25a, p38).

42 b (thermique) : D = 204 I = -4 (In Situ)
42 c (chimique) : D = 207 I = -4

- De même, dans le cas où l'on met en évidence deux composantes d'aimantation que l'on arrive à séparer par désaimantation thermique (éch. 34b - Fig. 26 p.39), la désaimantation chimique permet d'isoler la direction caractéristique stable avec autant, sinon plus, de précision. Pour l'échantillon 34 par exemple (Fig. 34b) on obtient :

34 b (thermique) : D = 230 I = 4 (In Situ)
34 a (chimique) : D = 238 I = 4

Par contre, l'attaque chimique ne permet généralement pas d'isoler la composante secondaire ; la destruction plus ou moins simultanée des deux composantes en début de désaimantation est sans doute responsable des zigzags fréquemment observés en début de courbe (Fig. 34b).

Enfin, les problèmes de modifications minéralogiques en cours de chauffe qui ont pu affecter la totalité des échantillons de certains sites (I, G) font de la désaimantation chimique une technique précieuse pour déterminer des directions d'aimantation sur ces sites. Pour le site G par exemple, (Fig. 34c) les données de désaimantation chimiques complètent utilement les rares directions qui ont pu être isolées thermiquement.

c - Synthèse.

Plusieurs types de résultats ont donc été obtenus :

- des composantes simples par désaimantation thermique et ou chimique . Une statistique de Fisher de ces directions par site donne la direction d'aimantation caractéristique du site qui sera discutée.

- lorsque deux composantes sont séparées, une bonne corrélation est généralement observée entre la composante la plus dure thermiquement et la plus dure chimiquement. C'est cette direction considérée comme primaire qui a été retenue.

- la méthode des grands cercles, permet au mieux, de déterminer une direction moyenne pour le site, lorsque l'on n'arrive pas à séparer les composantes portées par un même échantillon.

- enfin pour un même site on peut avoir les deux types de détermination d'une moyenne : intersection de grands cercles + directions individuelles. On verra plus loin comment est estimée la direction moyenne de l'aimantation du site avec l'ensemble de ces données.

3. Résultats.

Les sites sont regroupés par type de résultats tels qu'ils sont exposés ci-dessus. Les directions moyennes In Situ par site et leurs paramètres statistiques sont donnés tableau V p. 51, les directions par échantillon en annexe, tableau 2.

- Sites A et I : seules des désaimantations thermiques ont été effectuées qui n'ont pu donner lieu qu'à des déterminations de grands cercles. Comme on l'a vu figure 32, p.44 le site I présente une très mauvaise intersection de ces grands cercles, et ce site a dû être abandonné pour la suite du travail.

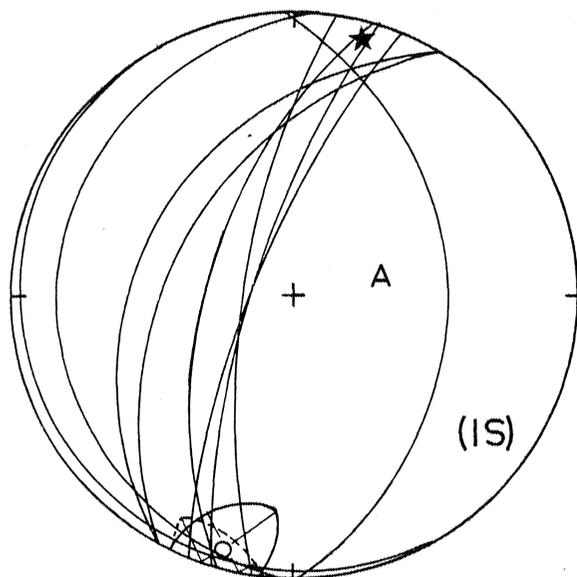


Fig. 35. Site A : direction moyenne d'aimantation du site obtenue par la méthode des grands cercles pour des échantillons désaimantés thermiquement. Etoile : intersection calculée dans l'hémisphère inférieur (Inclinaison positive) ; la direction d'aimantation est à 180° , d'inclinaison négative. Ellipse, partie pointillée : hémisphère inférieur.

Pour le site A (Fig. 35) on obtient une intersection qui, quoique n'étant pas d'excellente qualité, correspond assez bien à une direction permienne.

- Sites B et D (Fig. 36). Pour ces deux sites, en plus de la détermination d'une moyenne pour le site par intersection de grands cercles, j'ai obtenu quelques directions individuelles par échantillon en désaimantation chimique (Site B : Fig 36a), et par désaimantations chimique et thermique (site D : Fig. 36b). Malgré une assez forte dispersion intrasite interprétée comme due à la déformation interne, il existe une assez bonne corrélation entre ces diverses populations.

Pour ces deux sites le problème se pose de déterminer une estimation moyenne unique de la direction d'aimantation du site. On dispose en effet d'une direction moyenne obtenue par l'intersection des grands cercles et d'une direction obtenue par statistique de Fisher sur des directions d'aimantation caractéristique individuelles chacune avec leurs paramètres de qualité (Fig. 37). Comme il s'agit là de deux méthodes d'estimation d'une direction unique

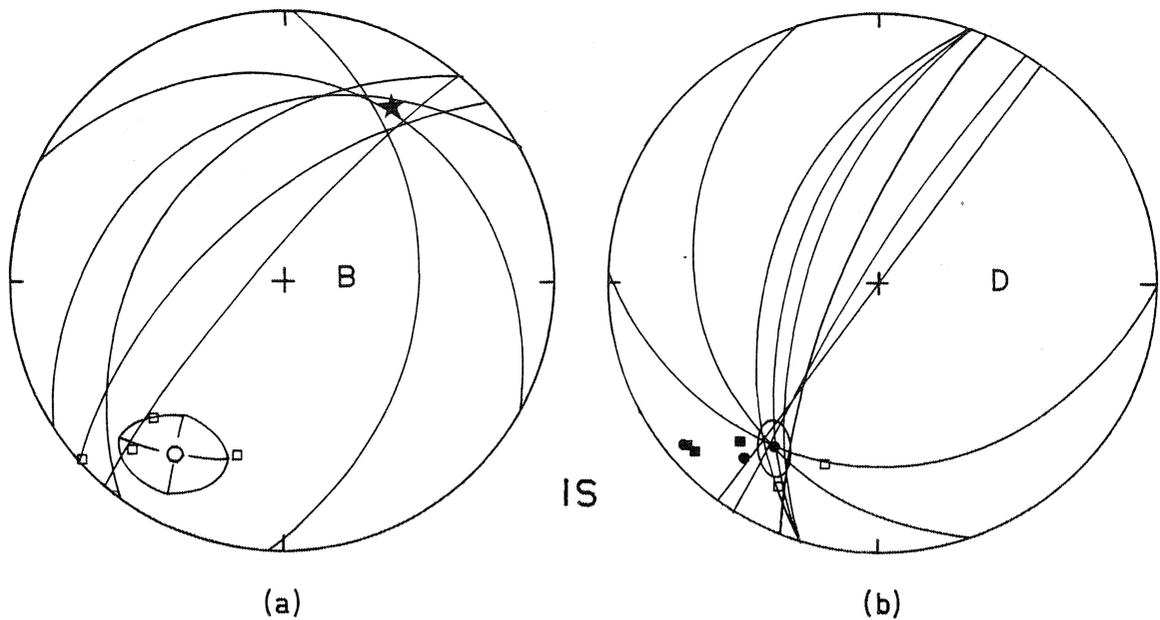


Fig. 36 - Sites B (a) et D (b). Double mode de détermination de la direction moyenne du site ; intersection de grands cercles + directions individuelles en chimique (■) et/ou en thermique (●), étoile (a) : cf Fig. 35.

la moyenne retenue pour le site sera calculée par moyenne de ces deux moyennes et un "cercle de confiance" qualitatif sera estimé comme contenant les deux moyennes calculées sur échantillons. Il peut paraître contestable de donner le même "poids" à l'intersection des grands cercles et à la moyenne des directions individuelles bien déterminées, mais d'une part c'est le seul moyen d'utiliser toutes les données, et d'autre part on verra que dans le résultat final les deux moyennes de chaque site sont réellement très proches l'une de l'autre.

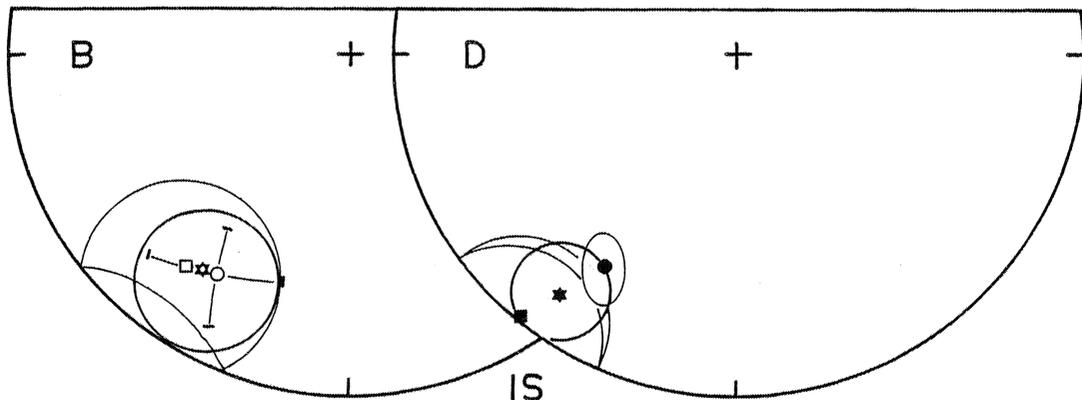


Fig. 37 - Détermination de la direction d'aimantation moyenne (★) des sites B et D à partir des moyennes obtenues par intersection de grands cercles (●) et par statistique de Fisher (■).

- Sites C. E. F. G. (Fig. 38). Sur ces sites des directions d'aimantation stables ont pu être déterminées sur les échantillons traités soit thermiquement soit chimiquement et les populations obtenues par ces deux méthodes s'avèrent identiques à l'échelle du site.

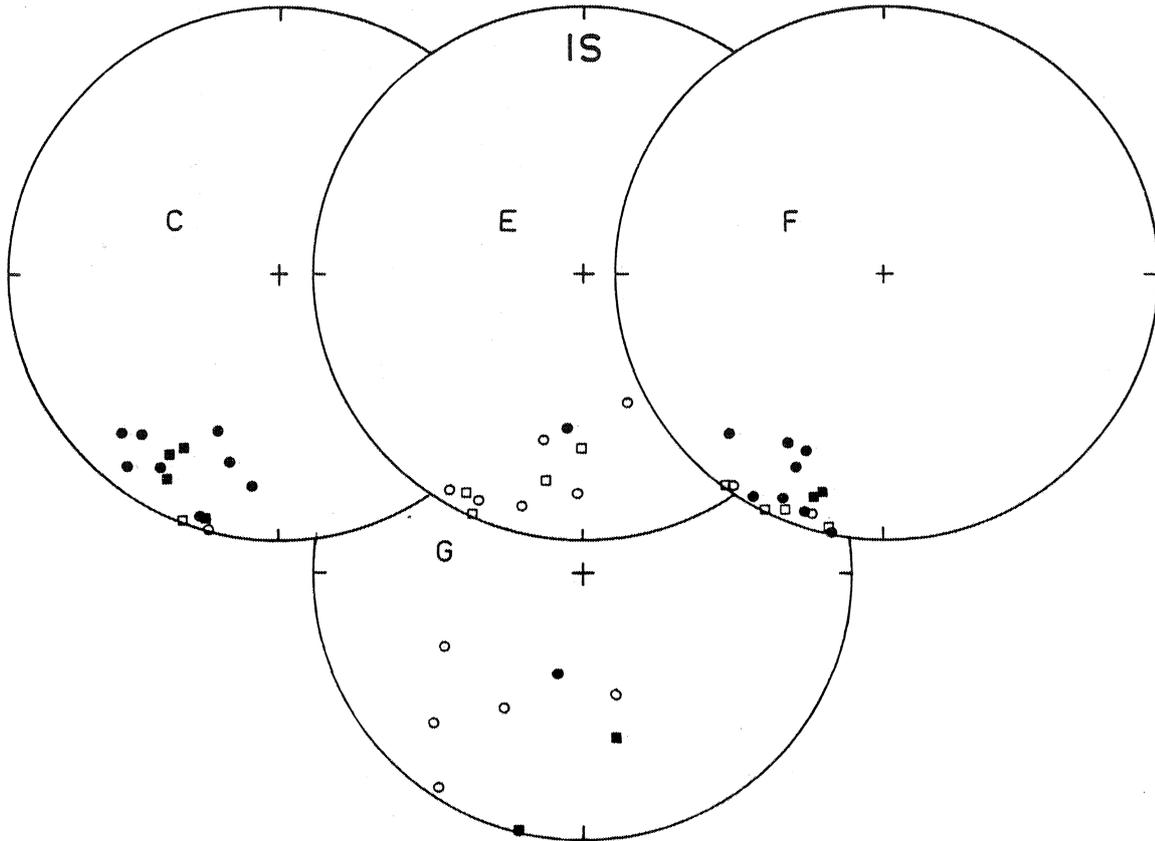


Fig. 38 - Directions d'aimantation caractéristique après nettoyage chimique (■) et thermique (●) pour les sites C,E,F et G

On peut noter une forte dispersion de ces directions dans les sites E et G. En particulier le site G montre une distribution quasi-aléatoire ($K=4.5$, Tableau V) bien que les 8 échantillons retenus soient les plus sûrs du point de vue interprétation, sur les 14 traités (problèmes de réaimantation en cours de chauffe principalement).

- Site J (Fig. 39). Seules des désaimantations thermiques ont été effectuées sur les échantillons de ce site, qui ont montré une composante unique bien déterminée. Ici aussi, les directions obtenues, proches de la direction permienne de ces séries, montrent une dispersion non négligeable.

Les directions moyennes In Situ et après simple correction de pendage ainsi déterminées sur chaque site sont résumées dans le tableau V.

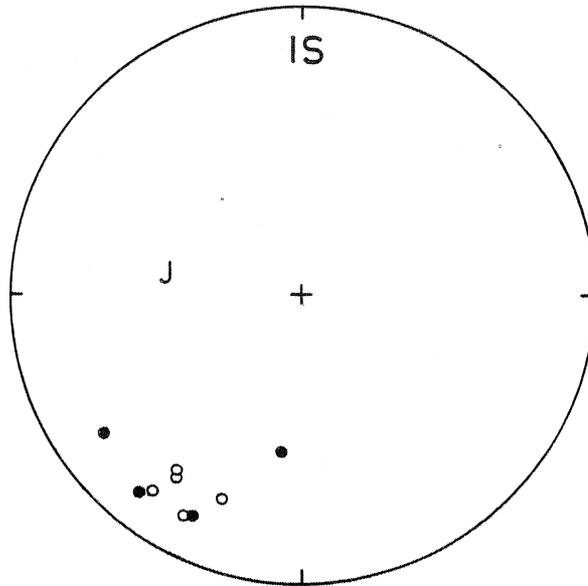


Fig. 39 - Site J : directions d'aimantation caractéristique après nettoyage uniquement thermique.

illustrées figure 40, ces données appellent deux remarques :

- Il existe une assez forte dispersion intrasite pour la majorité des sites étudiés (sauf F) reflétée par l'angle d'ouverture important des cercles de confiance (Fig. 40b, d). Cette dispersion n'est pas affectée par la correction de pendage dans la mesure où l'orientation du plan de stratification, S_0 , est unique à l'échelle du site.

- Bien que la direction axiale moyenne des pli soit WNW-ESE, la correction de pendage n'introduit pas d'amélioration de la distribution des moyennes (Tableau V ; Fig. 40a, c) : on a donc là un test de plis typiquement non concluant. On peut par ailleurs noter que si la qualité de la distribution intersite peut paraître correcte, autant avant ($k = 45$) qu'après ($k = 24.5$) correction de pendage, il n'en reste pas moins que chaque moyenne de site est elle-même de mauvaise qualité.

SITE	TYPE ⁽¹⁾ et TRAITEMENT ⁽²⁾		DIRECTIONS MOYENNES IS		PARAMETRES ⁽³⁾ STATISTIQUES		DIRECTIONS MOYENNES CP	
			D	I			D	I
A	9 Th	GC	195.0	- 4.0	p = 15.2	r = 9.2	- 194.0	- 6.5
B	7 Th 4 Ch	GC F	211.0 216.5 (213.5	-16.0 -14.0 -15.0)	p = 15.0 k = 21 (-	r = 11.0 $\alpha_{95} = 20.5$ $\alpha_{95} \sim 13.0$	212.5	-12.5
C	9 Th+5 Ch	F	205.0	10.0	k = 39	$\alpha_{95} = 6.5$	205.0	- 8.5
D	8 Th 5 Ch+2 Th	GC F	212.5 218.0 (215.5	18.0 1.5 10.0)	p = 8 k = 22 (-	r = 4.5 $\alpha_{95} = 13.2$ $\alpha_{95} \sim 10.0$	216.5	-18.5
E	8 Th+4 Ch	F	193.5	- 9.0	k = 15.5	$\alpha_{95} = 11.5$	208.5	-29.5
F	10 Th+6 Ch	F	204.0	5.0	k = 50.0	$\alpha_{95} = 5.3$	206.5	-29.0
G	6 Th+2 Ch	F	202.5	- 7.0	k = 4.5	$\alpha_{95} = 29.5$	202.0	11.0
J	9 Th	F	211.5	- 1.0	k = 14.5	$\alpha_{95} = 14.0$	222.0	-29.5
(I	7 Th	GC	223.5	31.5	p = 34.5	r = 9.0)	-	
	Moyenne tous sites n = 8		205.0	- 1.5	k = 45	$\alpha_{95} = 8.5$	208.0	-15.5
							k = 24.5	$\alpha_{95} = 11.5$

TABLEAU V : Directions d'aimantation moyennes In Situ (IS) et corrigées du pendage (CP) des sites étudiés. Le site I est donné à titre indicatif et ne sera plus utilisé par la suite.

(1) : nombre d'échantillons utilisés après désaimantation ; Th : thermique ; Ch : chimique

(2) : GC : Grands Cercles ; F : statistique de Fisher.

(3) p, r : 1/2 angles d'ouverture de l'ellipse définie par Westphal (198C), l'orientation de ces axes étant fonction des vecteurs propres du tenseur d'orientation de la population ; k, α_{95} : paramètres de qualité de la distribution fishérienne.

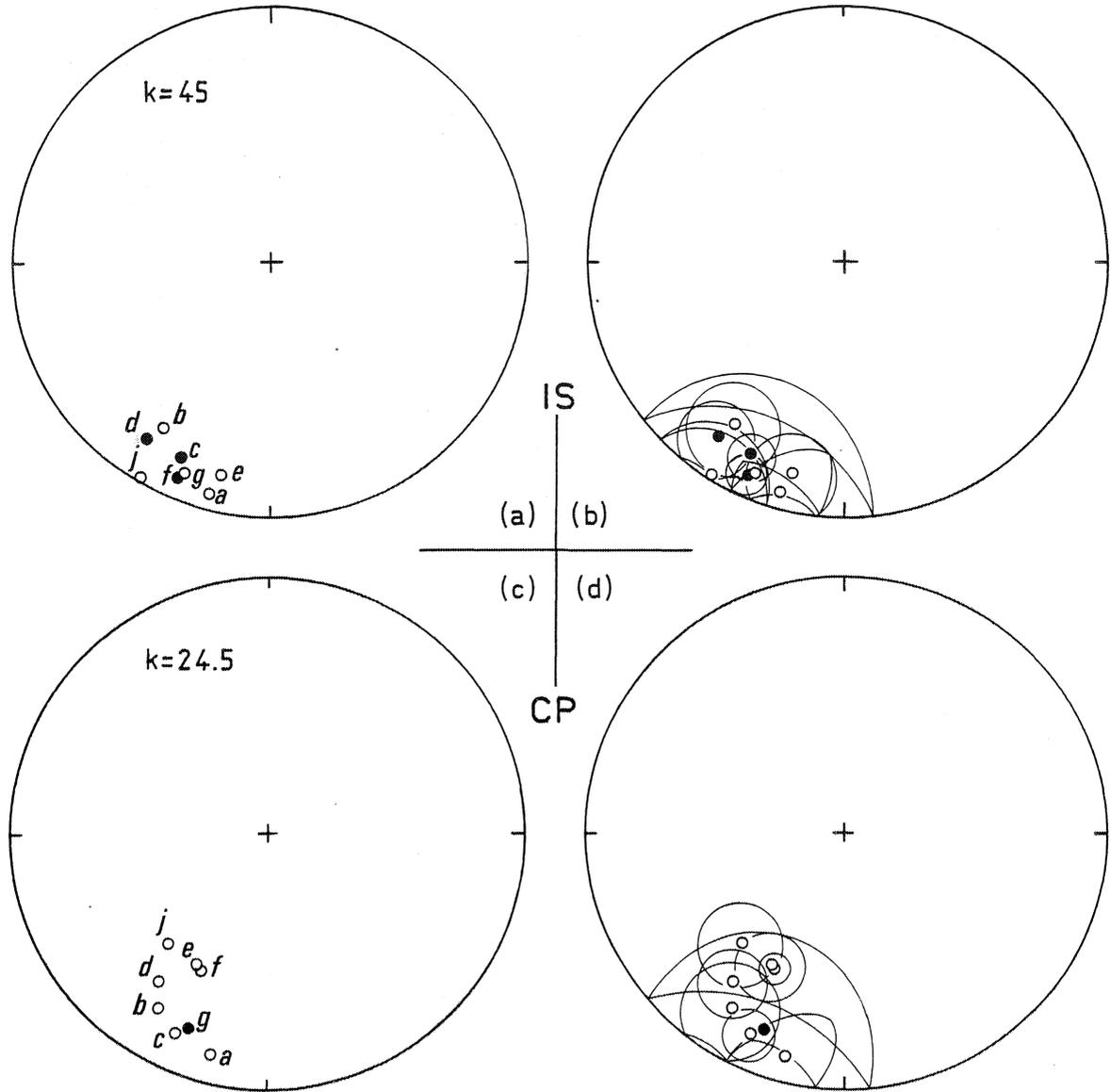


Fig. 40 - Directions moyennes des 8 sites avec et sans cercles de confiance
(a) (b) : In Situ (c) (d) après correction de pendage.

Les données ainsi acquises n'améliorent donc pas la distribution des directions dont la dispersion avait été observée en ARN. Il est ainsi confirmé que la déformation interne affectant ces séries est probablement à l'origine de la forte dispersion des données.

V - DEFORMATION INVERSE

1. Interprétation de la dispersion intrasite

Avant l'étude de la dispersion intersite des moyennes, qui sera abordée plus loin, il convient d'analyser plus en profondeur l'importante dispersion des données à l'intérieur d'un même site.

Les données structurales montrent que dans les sites déformés des Vallées de la Tinée et de la Roya, la schistosité est subverticale et de direction \sim WNW-ESE, c'est à dire que l'axe de raccourcissement Z est subhorizontal et de direction N-S à NE-SW (Tableau III). On a donc là coïncidence entre l'axe de raccourcissement fini Z et la direction initiale moyenne de

l'aimantation de ces séries. Ce fait remarquable, déjà noté par Henry (1973) et Van den Ende (1977), peut avoir eu pour conséquence d'augmenter la dispersion initiale d'une population de vecteurs sans en dévier la direction moyenne de manière significative. Afin d'aller plus loin dans cette analyse, un cas analogue simplifié a été modélisé.

- Modèle d'évolution du paramètre k d'une distribution fishérienne en déformation co-axiale :

Après avoir choisi quatre populations arbitraires de vecteurs possédant chacune un nombre de données (N) et un regroupement propres (apprécié par le paramètre k de Fisher), je leur ai appliqué un raccourcissement uniaxial d'intensité R (Watterson, 1968) croissante, l'axe de raccourcissement étant exactement parallèle à la direction moyenne de la population considérée. A chaque étape, la direction moyenne des vecteurs déformés passivement et le paramètre k sont recalculés. Ce modèle simple peut être résumé par :

- populations de départ arbitraire. Dans le cas présent on a

* N = 8	$k_0 = 125$
* N = 6	$k_0 = 70$
* N = 14	$k_0 = 39$
* N = 12	$k_0 = 14.5$

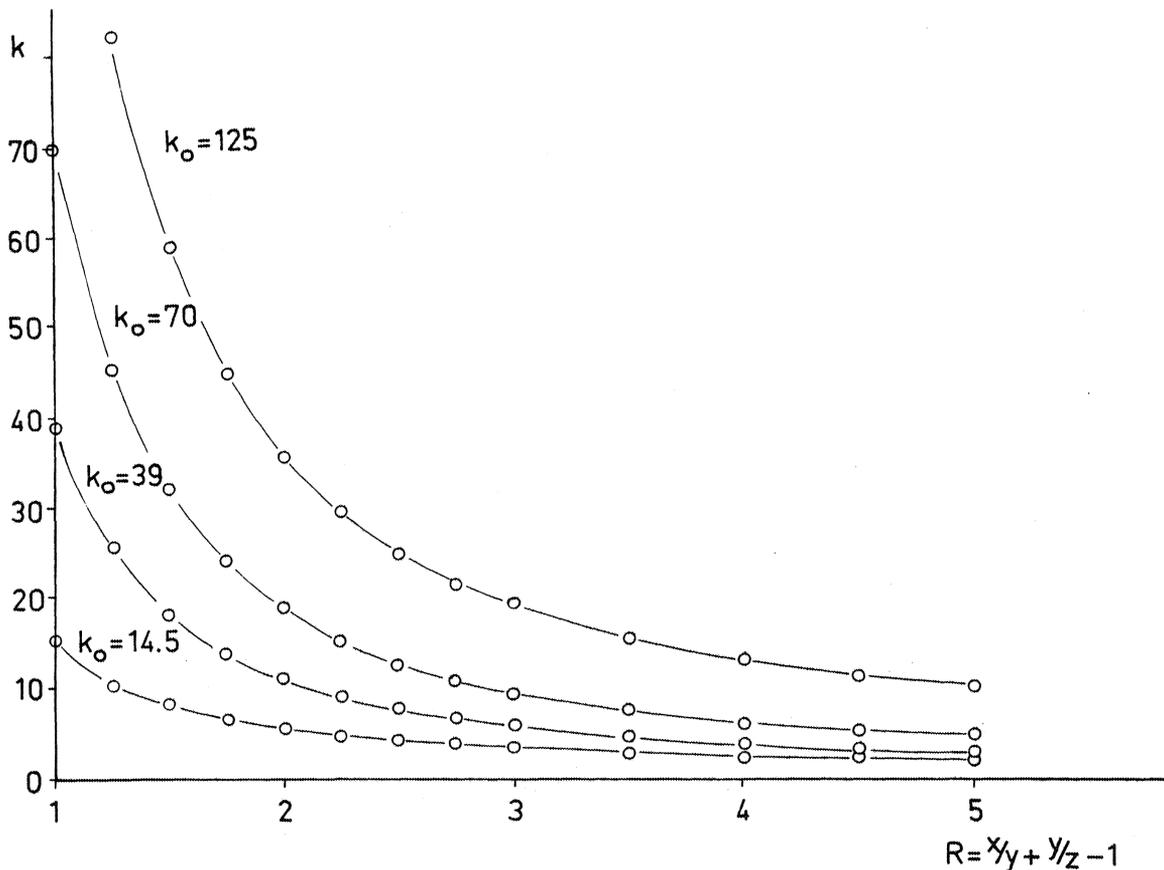


Fig. 41 - Courbes expérimentales d'évolution de k (Fisher) en fonction de l'intensité de déformation R.

- déformation coaxiale en raccourcissement uniaxial c'est à dire $\lambda_1 = \lambda_2 > \lambda_3$.
Le taux de déformation est apprécié par le paramètre d'intensité R (Watterson, 1968)
 $R = \lambda_1/\lambda_2 + \lambda_2/\lambda_3 - 1$

- axe de raccourcissement parallèle à la direction moyenne de la population de vecteurs initiale.

- Les vecteurs se comportent comme des lignes passives.

Les résultats de ce modèle montrent que la direction moyenne de chaque population reste parallèle à l'axe Z durant la déformation ; par ailleurs l'évolution du paramètre k en fonction du taux de déformation (R) est illustré figure 41.

L'observation la plus importante que l'on tire de ces courbes est que le cas théorique d'une déformation coaxiale passive provoque une chute rapide du paramètre k. En d'autres termes, la dispersion des données peut-être considérée comme importante pour des taux de déformation relativement modestes. Ainsi on passe pour une de ces courbes de $k = 70$ avant déformation à $k < 10$ pour $R = 3$ (Fig. 41).

- Comparaison des données avec le modèle

Si l'on reporte les données des sites B à J dans un diagramme du même type $k = f(R)$ (Fig. 42), on observe une assez bonne corrélation entre celles-ci et les courbes expérimentales.

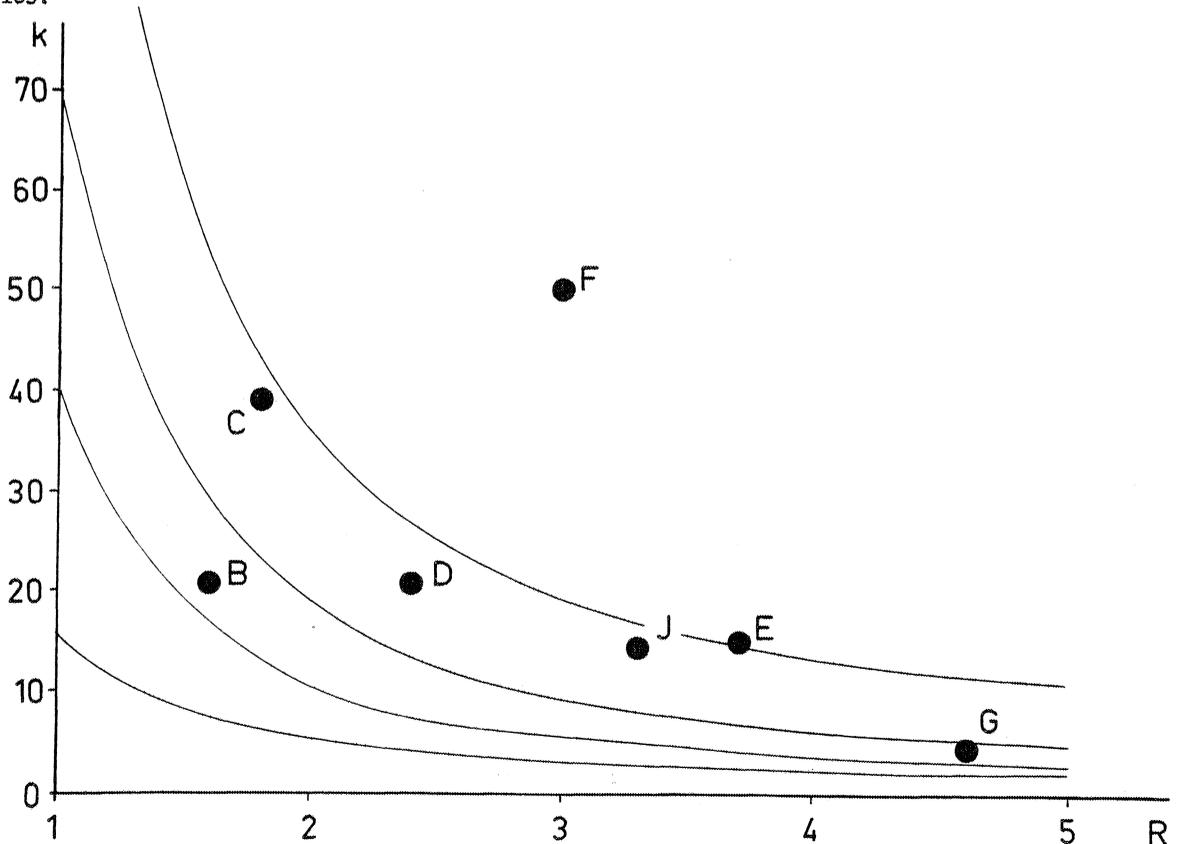


Fig. 42 - Points représentatifs des sites B à J dans un diagramme $k = f(R)$. les courbes sont celles de la figure 41.

On ne peut évidemment pas déduire le comportement passif de l'aimantation uniquement à partir d'un tel diagramme mais il est justifié d'interpréter qualitativement l'importance de la dispersion intrasite comme étant provoquée par une déformation interne d'axe de raccourcissement proche de la direction moyenne d'aimantation.

- Conclusion

La déformation inverse a donc été effectuée, quand cela était possible, sur la direction caractéristique de chaque échantillon du site. Dans les cas particuliers des sites B et D, elle a été faite d'une part sur les directions moyennes calculées d'après l'intersection des grands cercles, d'autre part sur chaque direction individuelle qui a pu être isolée. La direction moyenne finale du site est ensuite estimée de la même manière que précédemment.

2. Effet de la déformation inverse sur la dispersion intrasite.

C'est à l'échelle du site que les résultats obtenus sont les plus spectaculaires, du fait même de la direction particulière des axes de la déformation par rapport aux directions d'aimantation.

Les données moyennes de chaque site avant et après déformation inverse, mais sans correction de pendage sont exposées tableau VI. A ce stade, il ne convient pas d'interpréter les directions moyennes en tant que telles, mais c'est l'évolution des paramètres statistiques de qualité des distributions qui est à noter.

SITE	N	In Situ				Après déformation inverse				k_{DD}/k_{IS}	F	TEST
		D	I	k	α_{95}	D	I	k	α_{95}			
A	9	195	- 4	(p=15.0r= 9.0)	196	- 8	(p=15.0r=9.0)	/	/	/		
B	7	211.0	-16.0	(p=15.0 r=11.0)	213.0	-16.0	(p=15 r=11.0)					/
	4	216.5	-14.0	21.5 20.5	216.5	-14.0	36.5 15.5	1.70	4.28	-		
C	14	205.0	10.0	39 10.0	195.0	11.0	67.5 4.9	1.73	1.92	-		
D	8	212.5	18.0	(p= 8 r= 4.5)	203.0	23.0	(p= 8 r= 4.5)	-	-	/		
	7	218.0	1.5	22 13.2	206.0	14.5	82 6.7	4.45	2.69	+		
E	12	193.5	- 9.0	15.5 11.5	181.0	15.5	78 4.9	5.03	2.05	+		
F	16	204.0	5.0	50 5.3	195.0	2.5	351 2.0	7.02	1.84	+		
G	8	202.5	- 7.0	4.5 29.5	205.5	8.0	44 8.5	9.78	2.45	+		
J	9	211.5	- 1.0	14.5 14.0	198.0	24.5	44.7 7.8	3.08	2.34	+		

TABLEAU VI : Directions d'aimantation moyennes par site, In Situ et après déformation inverse sans correction de pendage. Les 3 dernières colonnes donnent les valeurs pour le test $k_1 > k_2$ (voir texte) ; F : valeur de la table Fisher-Snedecor au point 5% pour le nombre de données correspondant. Sites B et D : détermination de la direction moyenne du site comme précédemment

In Situ : -B : D = 213.5 I = -15.0 $\alpha \sim 13.0$
 -D : D = 215.5 I = 9.7 $\alpha \sim 10.0$

Déformé -B : D = 214.5 I = -15.0 $\alpha \sim 13.0$
 -D : D = 204.5 I = 19.0 $\alpha \sim 5.0$

Dans ce tableau sont également reportés les paramètres du test statistique de $k_1 > k_2$ et le résultat (positif ou négatif) de ce test : pour $k_1 > k_2$, si $k_1 / k_2 > F(2(N_2-1), 2(N_1-1))$ où $F(1_2, 1_1)$ est la valeur de la table de Fisher-Snedecor au point 5% pour les degrés de liberté 1_2 et 1_1 , alors k_1 est statistiquement supérieur à k_2 (Mc Ehligny, 1973).

L'ensemble de ces données est illustré figure 43 où sont représentées, par site, les directions moyennes et leurs cercles de confiance avant et après déformation inverse.

Là encore, les sites B et D posent quelques problèmes : les directions moyennes pour chacun de ces sites (Fig. 43) sont les moyennes déterminées comme il a été exposé plus haut; le test $k_1 \neq k_2$ (Tableau VI) s'avère négatif sur le site B ce qui peut être dû soit au faible nombre d'échantillons des populations testées, soit à la faible intensité de déformation ; enfin, il faut noter que pour ces sites, les $1/2$ angles d'ouverture (p et r) de l'ellipse d'intersection des grands cercles ne sont pas modifiés, aucun argument ne me permettant de le faire.

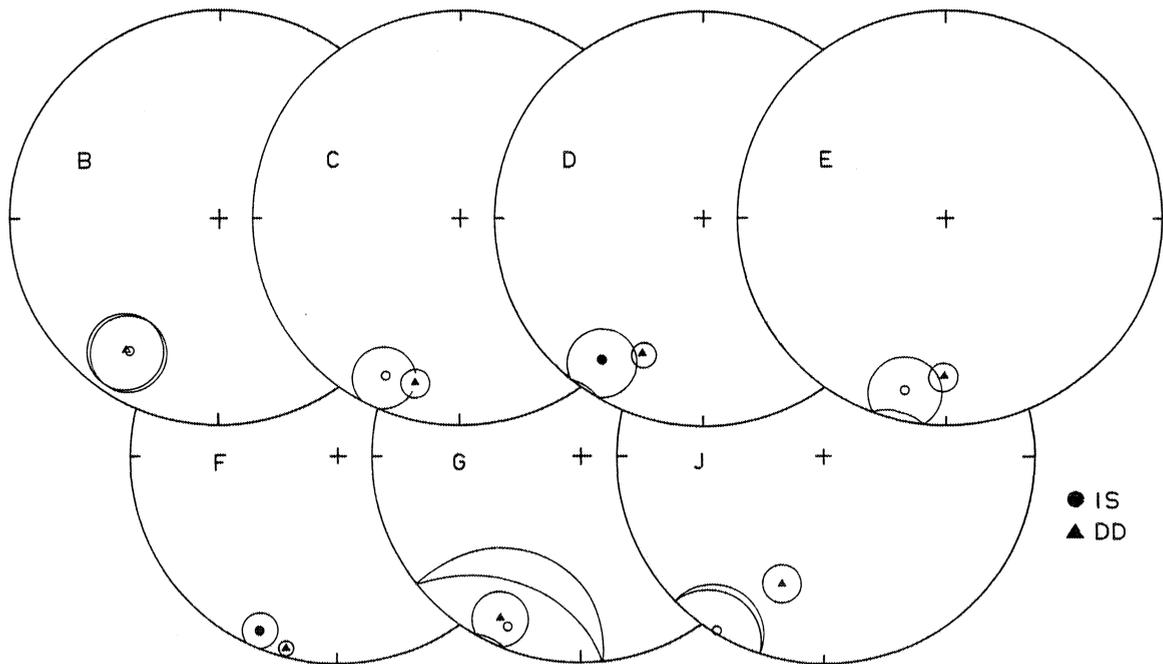


Fig. 43 - Moyennes site par site des directions avant (ronds) et après (triangles) déformation inverse sans correction de pendage.

Pour tous les autres sites excepté C, on observe un regroupement statistiquement significatif (Tableau VI) de la distribution intrasite qui est reflétée par la réduction parfois spectaculaire des cercles de confiance (Fig. 43).

La déformation inverse effectuée sur chaque direction d'aimantation caractéristique d'un site me permet d'obtenir un meilleur groupement intrasite et donc une meilleure qualité des directions moyennes d'aimantation à interpréter, qui possèdent une dispersion, après traitement, typique de ce genre de formation.

3. Rotation rigide inverse : évolution de la distribution intersite.

La dernière étape du traitement appliqué à ces mesures consiste donc à ramener à l'horizontale le plan de stratification "dédéformé". A partir des données de stratification ainsi corrigées (Tableau IV ; p 35), la remise à l'horizontale de ce plan a été effectuée de la

manière classique par rotation d'un angle égal au pendage autour de l'horizontale du plan. Les directions moyennes d'aimantation ainsi obtenues sont reportées Tableau VII et figure 44.

SITE	D	I	α_{95}
A	194.0	-11.0	(p=15.2 r=9.2)
B	213.0	-12.0	13.0
C	194.0	- 8.0	4.9
D	204.0	- 9.0	5.0
E	180.0	-11.0	4.9
F	196.0	-16.0	2.0
G	204.0	- 1.0	8.5
J	196.0	-16.0	7.8

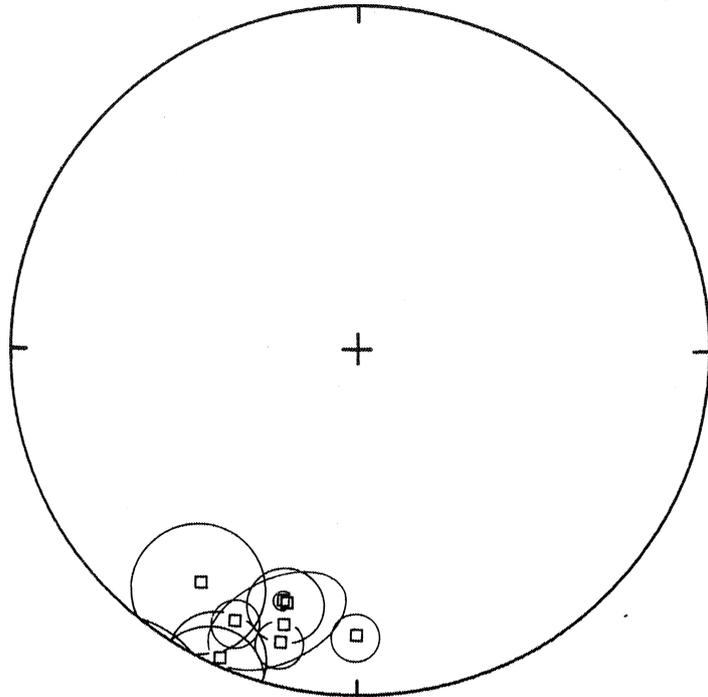


Fig. 44 - Directions moyennes d'aimantation après déformation inverse et correction de pendage de la stratification dédéformée.

TABLEAU VII : Direction d'aimantation caractéristique moyenne de chaque site après déformation inverse et correction de pendage. L'angle d'ouverture α_{95} du cercle de confiance est celui obtenu après déformation interne inverse (Tableau VI).

Comparées aux directions moyennes In Situ (Fig. 45a) et après simple correction de pendage (Fig. 45b), ces directions moyennes après déformation inverse et correction du pendage dédéformé montrent (Fig. 45c) une valeur d'inclinaison négative (-10° à -15°) proche de l'inclinaison moyenne déterminée par Van den Ende (1977) sur le Dôme de Barrot (étoile sur la figure 45c).

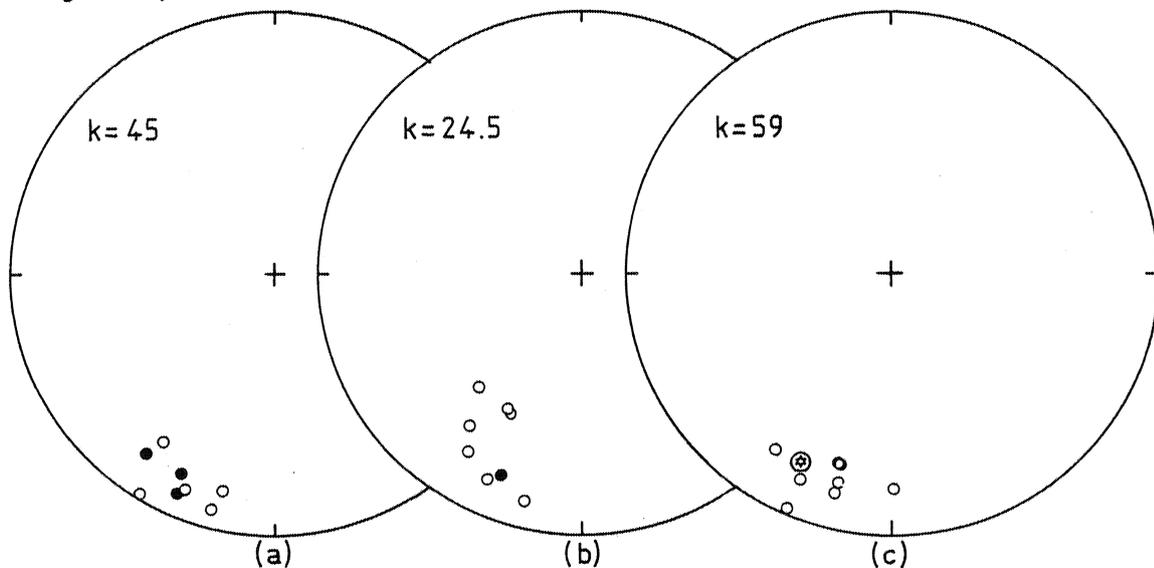


Fig. 45 - Directions moyennes aux différents stades sans leurs cercles de confiance. (a) In Situ (b) après simple correction de pendage (c) : après déformation inverse et correction de pendage de la stratification dédéformée ; étoile fig(c) : direction permienne pour le Dôme de Barrot (Van den Ende 1977)

Malgré une dispersion légère des déclinaisons, celles-ci restent relativement bien groupées autour d'une moyenne également proche de cette direction de référence.

Les moyennes d'ensemble de la série étudiée, aux différentes étapes sont :

(N = 8)

In Situ	$D_m = 205.0$	$I_m = -1.5$	$k = 45$	$\alpha_{95} = 8.5$
Après correction de pendage	$D_m = 208.0$	$I_m = -15.5$	$k = 24$	$\alpha_{95} = 11.5$
Après déformation Inverse et CP	$D_m = 198.0$	$I_m = -10.5$	$k = 59$	$\alpha_{95} = 7.5$

Ces moyennes sont reportées figure 46 et l'on peut estimer qualitativement un meilleur groupement des directions après déformation interne et rotation rigide inverse (46c) qu'après simple correction de pendage (46b). Ceci est confirmé par le test $k_1 > k_2$ positif pour ces 8 données ($k_{DD}/k_{CP} = 2.46$, $F(14, 14) = 2.46$), et on peut donc considérer que ces groupements sont significativement différents du point de vue statistique.

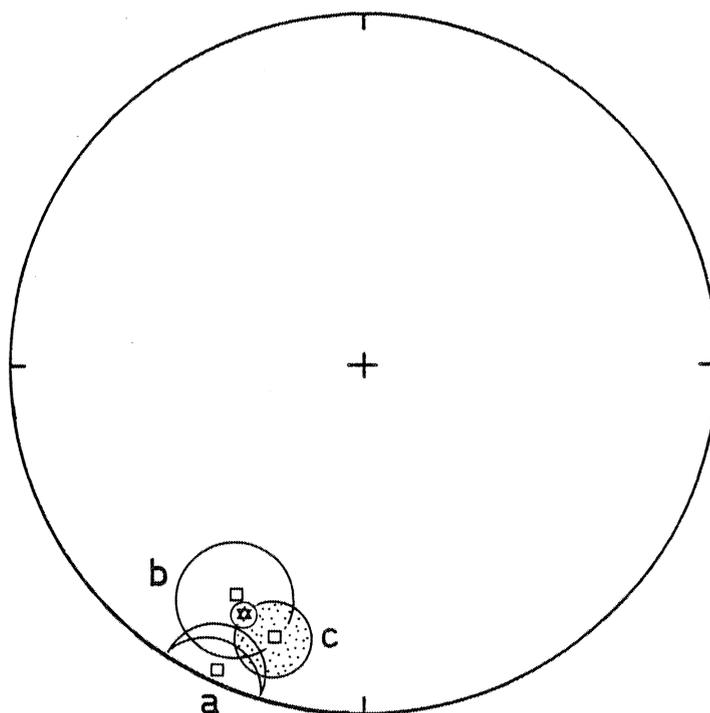


Fig. 46 - Directions moyennes aux différents stades de l'ensemble de la série étudiée. a : In Situ ; b : après simple correction de pendage ; c : après déformation inverse et correction de pendage de la stratification déformée. Etoile : cf figure 45.

De plus, il ne faut pas oublier que les données qui ont servi à calculer la moyenne finale (après déformation interne et rotation rigide inverses) ont une qualité de groupement intrasite nettement supérieure aux groupements In Situ et après correction de pendage.

VI - CONCLUSION

Les principaux résultats obtenus dans cette étude peuvent être résumés ainsi :

- L'effet de la déformation interne sur l'orientation du vecteur aimantation est démontré. De plus, la direction particulière de l'axe de raccourcissement moyen dans l'ensemble des sites déformés, subparallèle à la direction d'aimantation antétectonique, peut être considérée comme responsable de la forte dispersion observée des directions, autour d'une moyenne qui, elle, ne subit que peu de déviation.

- Il est possible de tenir compte des effets de la déformation interne : après quantification de celle-ci, il a été possible de recalculer la direction d'aimantation anté-tectonique de ces séries à l'aide de tenseur de déformation inverse.

- On peut dire que le comportement du vecteur aimantation s'apparente ici au comportement d'un vecteur passif soumis à une déformation interne ; cette conclusion ne peut évidemment pas être généralisée et l'étude d'autres cas similaires s'impose.

CHAPITRE II - LE PLI

I - PRESENTATION - SITES.

Dans le cadre de l'étude des séries rouges permienes des Alpes Maritimes, la charnière et les flancs d'un anticlinal ont fait l'objet d'un échantillonnage spécial. Dans la vallée de la Vionène, adjacente à celle de la Tinée (Fig. 14b, p25), les séries rouges apparaissent sous le Trias, en bandes cartographiquement parallèles aux axes anticlinaux des plis régionaux à axe subhorizontal. La route D.28 entre St-Sauveur de Tinée et Roubion coupe l'un de ces anticlinaux perpendiculairement à son axe, à la partie sommitale de la série juste sous les quartzites du Trias (étoile sur la carte 14b). Les caractères généraux de la déformation dans ce pli sont ceux des sites les plus déformés de la coupe de la Tinée (G, I) : schistosité bien développée avec une linéation d'étirement subverticale, les taches de réduction montrant une forme aplatie dans la schistosité avec l'axe X parallèle à la linéation d'allongement minérale.

Six sites ont été répartis le long des 50 m de coupe (Fig. 47) :

- 2 sites (P1, P4) sur le flanc sud
- 1 site (P3) sur le flanc nord
- 3 sites (P2, P5, P6) au niveau de la charnière

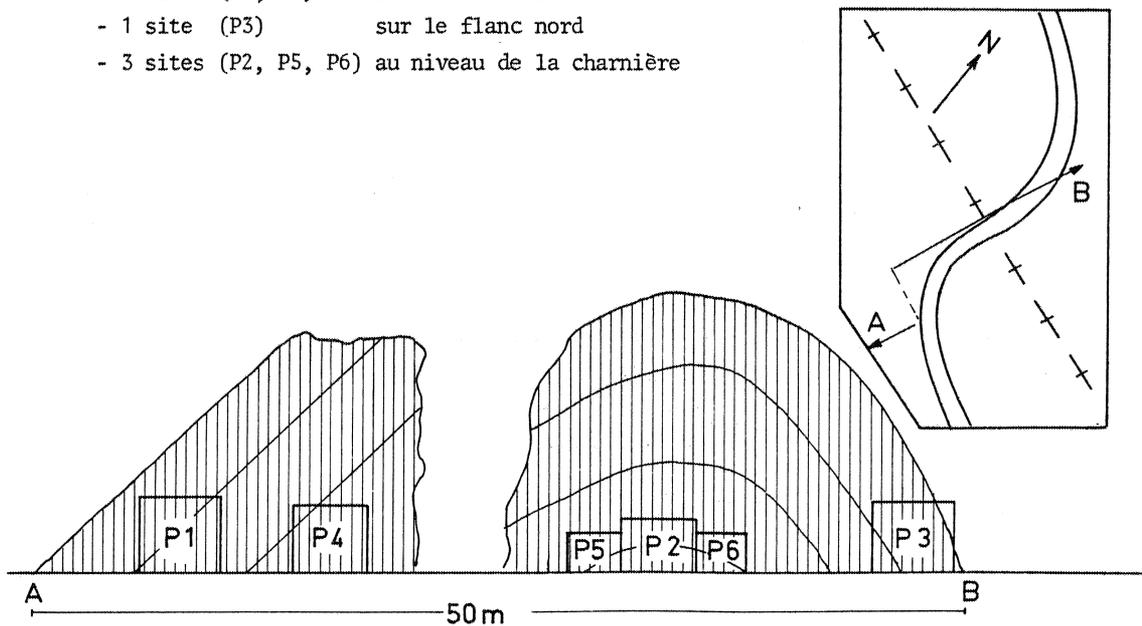


Fig. 47 - Schéma du pli montrant la position structurale des 6 sites.
Encadré : plan schématique de la coupe le long de la route.

La taille des sites, toujours fonction des critères d'homogénéité des éléments structuraux, est de l'ordre de 3m x 3m pour les sites 1 à 4, et $\sim 1m^2$ pour P5 et P6. En fait, les éléments de la déformation (direction et valeur des axes) ont été considérés comme homogènes à une plus grande échelle ($\sim 10m \times 10m$). La taille plus réduite des sites d'échantillonnage paléomagnétique correspond à l'échelle à laquelle direction et pendage du plan de stratification peuvent être considérés comme constants (en particulier pour les sites de la charnière).

50 carottes ont été forées et orientées sur le terrain.

II - ANALYSE QUANTITATIVE DE LA DEFORMATION

Quatre ensembles de mesures structurales ont été effectués, 3 pour les sites P1-3-4, et 1 seul pour les 3 sites de la charnière P2-5-6. En effet, dans cette zone les directions et valeurs des axes sont identiques et seule varie l'orientation du plan de stratification. L'ellipsoïde de déformation interne obtenu pour le site P2 est donc identique pour les sites P5 et P6.

1. Mesures et résultats

Les mesures de taches de réduction ont été effectuées dans les plans XY et XZ qui sont les plans les mieux exposés sur le terrain. L'axe X étant parallèle à la linéation d'étirement minérale subverticale, l'axe Y reste proche de l'intersection S_1/S_0 (Fig. 48).

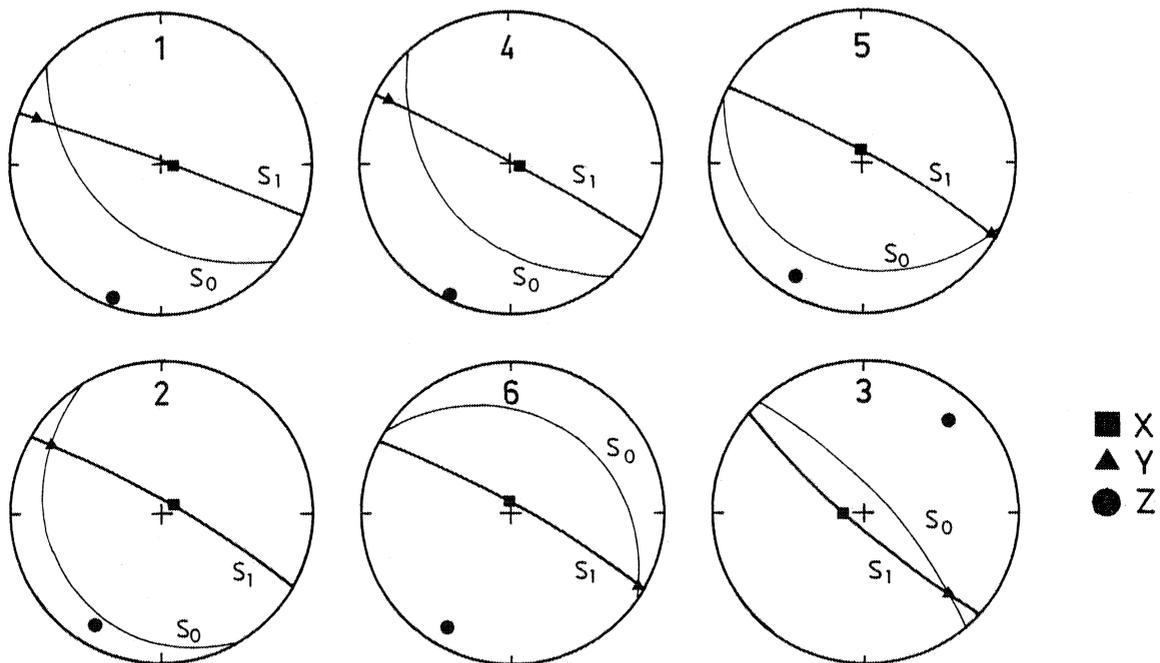


Fig. 48 - Directions structurales moyennes des six sites classés du Sud vers le Nord (voir coupe). S_0 : stratification ; S_1 : schistosité ; X, Y, Z : axes principaux de la déformation.

Le nombre de mesures de taches par plan et par site est mentionné sur chacun des diagrammes de la figure 49. Les taches mesurées dans le plan XY montrent de faibles fluctuations d'angle du grand axe (X) symétriques autour de la linéation d'étirement. Les rapports λ_1/λ_2

déterminés sur ces diagrammes Rf/ϕ sont assez faibles et similaires d'un site à l'autre. Dans le plan XZ il n'existe pas de fluctuations d'angle des ellipses et la moyenne arithmétique des rapports λ_1/λ_2 mesurés donne des rapports moyens élevés, 4.4 à 6.4, plus faibles à la charnière qu'aux flancs du pli.

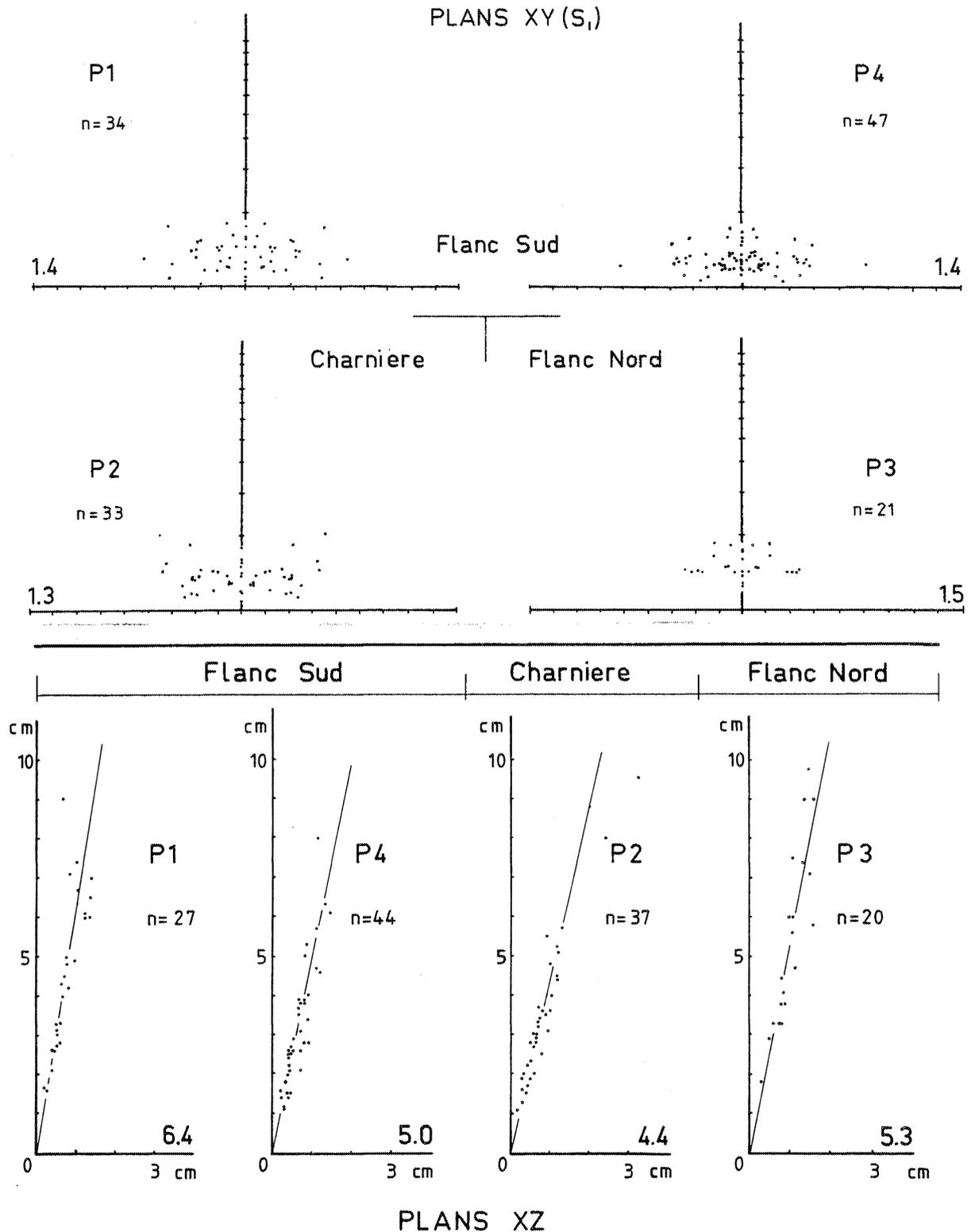


Fig. 49 - Diagrammes Rf/ϕ et grand axe/petit axe des mesures de taches de réduction effectuées dans les plans XY et XZ. n : nombre de mesures ; le rapport moyen est indiqué en bas de chaque diagramme.

2. Synthèse

Les éléments du tenseur de déformation, valeurs propres et directions principales ainsi déterminées sont exposées tableaux I et II.

Site	λ_1/λ_2 λ_2/λ_3 λ_1/λ_3			λ_1 ($\lambda_1\lambda_2\lambda_3=1$) λ_2 λ_3			K	R
	P1	1.4	4.6	6.4	2.072	1.480		
P4	1.4	3.6	5.0	1.894	1.388	0.380	0.26	4.0
P5								
P2	1.3	3.4	4.4	1.789	1.361	0.410	0.21	3.7
P6								
P3	1.5	3.5	5.3	2.002	1.310	0.381	0.32	4.0

TABLEAU I : Rapports axiaux moyens, valeurs des axes et paramètres de la déformation ; $K = \ln(\lambda_1/\lambda_2)/\ln(\lambda_2/\lambda_3)$: paramètre de forme ; $R = \lambda_1/\lambda_2 + \lambda_2/\lambda_3 - 1$ = paramètre d'intensité.

Site	S_0		S_1		X		Z	
	D	P	D	P	D	I	D	I
P1	131.0	39.0	291.0	87.0	89.0	82.0	201.0	3.0 (*)
P4	138.0	39.0	299.0	87.0	91	84.0	209.0	3.0 (*)
P5	116.0	20.0	300.0	82.0	20.0	82.0	210.0	8.0
P2	149.0	15.0	300.0	82.0	72.0	79.0	210.0	8.0
P6	304.0	23.0	300.0	82.0	17.0	82.0	210.0	8.0
P3	317.0	72.0	131.0	80.0	272.0	74.5	41.0	10.0 (*)

TABLEAU II : Directions structurales moyennes et plans de stratification des six sites. Z est toujours le pôle de S_1 , X la linéation d'étirement dans S_1 . (*) Pour les sites P1 P3 et P4 S_0 est déterminée graphiquement de la manière exposée pour les sites les plus déformés de la Vallée de la Tinée.

Dans un diagramme de Flinn (Fig. 50) les mesures sont groupées dans le champ de l'aplatissement, entre les courbes d'intensité $R = 3.5$ et $R = 5$

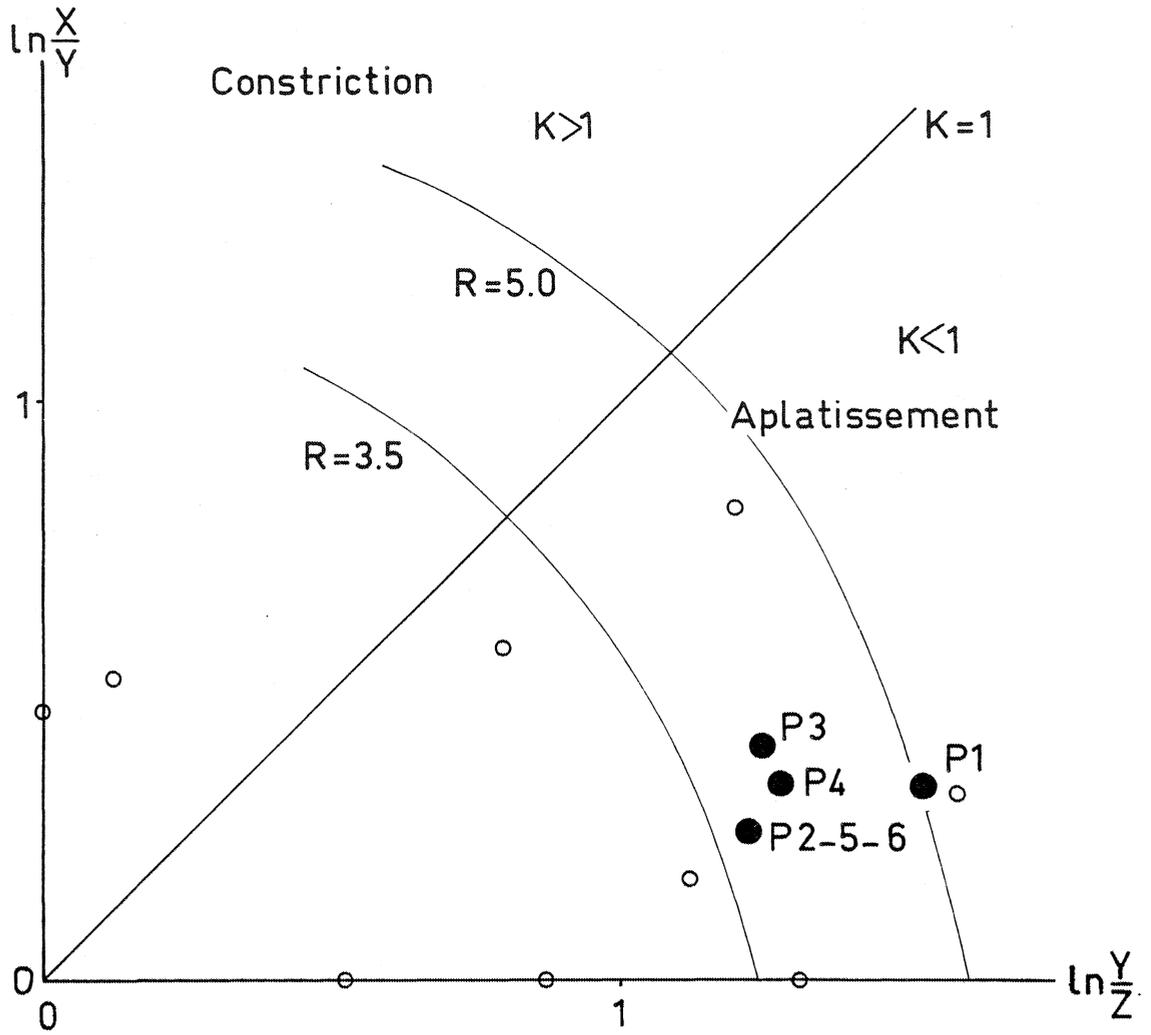


Fig. 50 - Diagramme de Flinn logarithmique. Courbes R : paramètre d'intensité. Points creux : sites de l'étude précédente (Dôme de Barrot, Vallées de la Tinée et de la Roya).

Les blocs diagrammes schématiques de la figure 51 illustrent les relations entre stratification, schistosité et axes de la déformation pour chacun des 6 sites.

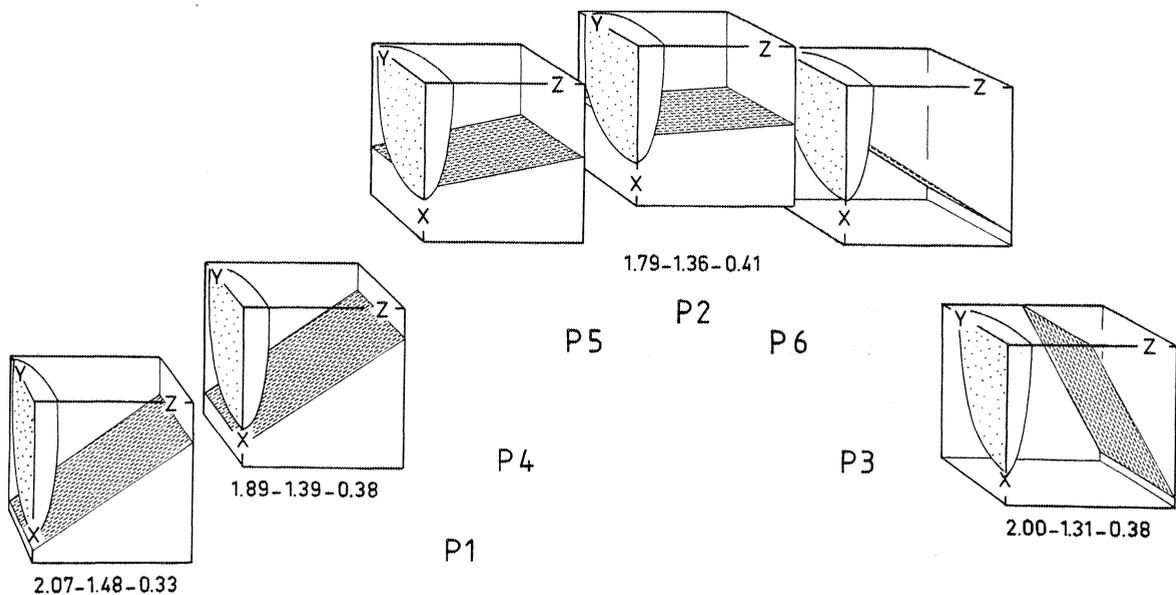


Fig. 51 - Blocs diagrammes schématiques illustrant les rapports angulaires axes de la déformation/stratification (hachuré). Les valeurs λ_1 , λ_2 et λ_3 sont données sous chaque bloc-diagramme.

On peut remarquer l'homogénéité des intensités de la déformation et des directions des axes structuraux.

3. Estimation de la rotation rigide

De même que pour les sites présentés en chapitre I, le plan de stratification S_0 est assimilé à un plan passif durant la déformation. De ce fait, la dernière étape du traitement, consistant à remettre S_0 à l'horizontale, sera effectuée à partir des données de direction et pendage du plan de stratification calculé par déformation inverse du plan mesuré.

Ces données sont les suivantes (Tableau III).

SITES	P1	P2	P3	P4	P5	P6
S_0 Mesurée D/P	131/39	149/15	317/72	138/39	116/20	304/23
S_0 Déformée D/P	166/15	158/11	333/31	167/16	112/11	35/ 2

TABLEAU III : Direction (D)/Pendage (P) des plans de stratification S_0 avant et après déformation inverse.

III - ETUDE PALEOMAGNETIQUE

1. A. R. N.

Les 95 spécimens tirés de ce pli ont été soumis à un test de viscosité. Comparé aux résultats obtenus sur les autres sites de ces séries rouges (Chap. I), le trainage s'avère ici plus important (Fig. 52 b), 28% des échantillons présentant un coefficient de viscosité supérieur à 20%, avec un maximum (48% des échantillons) entre 10 et 20%.

Une différence existe aussi du point de vue des intensités, en moyenne plus faibles ici d'un ordre de 10 (Fig. 52 a).

Les directions d'A.R.N. se montrent très dispersées autant In Situ ($k = 3.3$; Fig. 52 c) qu'après correction de pendage ($k = 3.1$; Fig. 52 d) ; cependant le test de distribution aléatoire (Irving, 1964 p. 63) est négatif et, malgré les très faibles valeurs de k , ces données sont considérées comme utilisables pour un travail paléomagnétique.

Comme pour les sites précédemment étudiés, on ne constate pas ici de tendance importante vers un champ actuel ou récent, et l'on peut également supposer que la déformation interne peut être responsable de cette dispersion.

Il est possible d'aller plus loin dans cette analyse si l'on prend en considération la dispersion des groupements intrasites de ces directions d'A.R.N. dans les sites P1 P4 et P3.

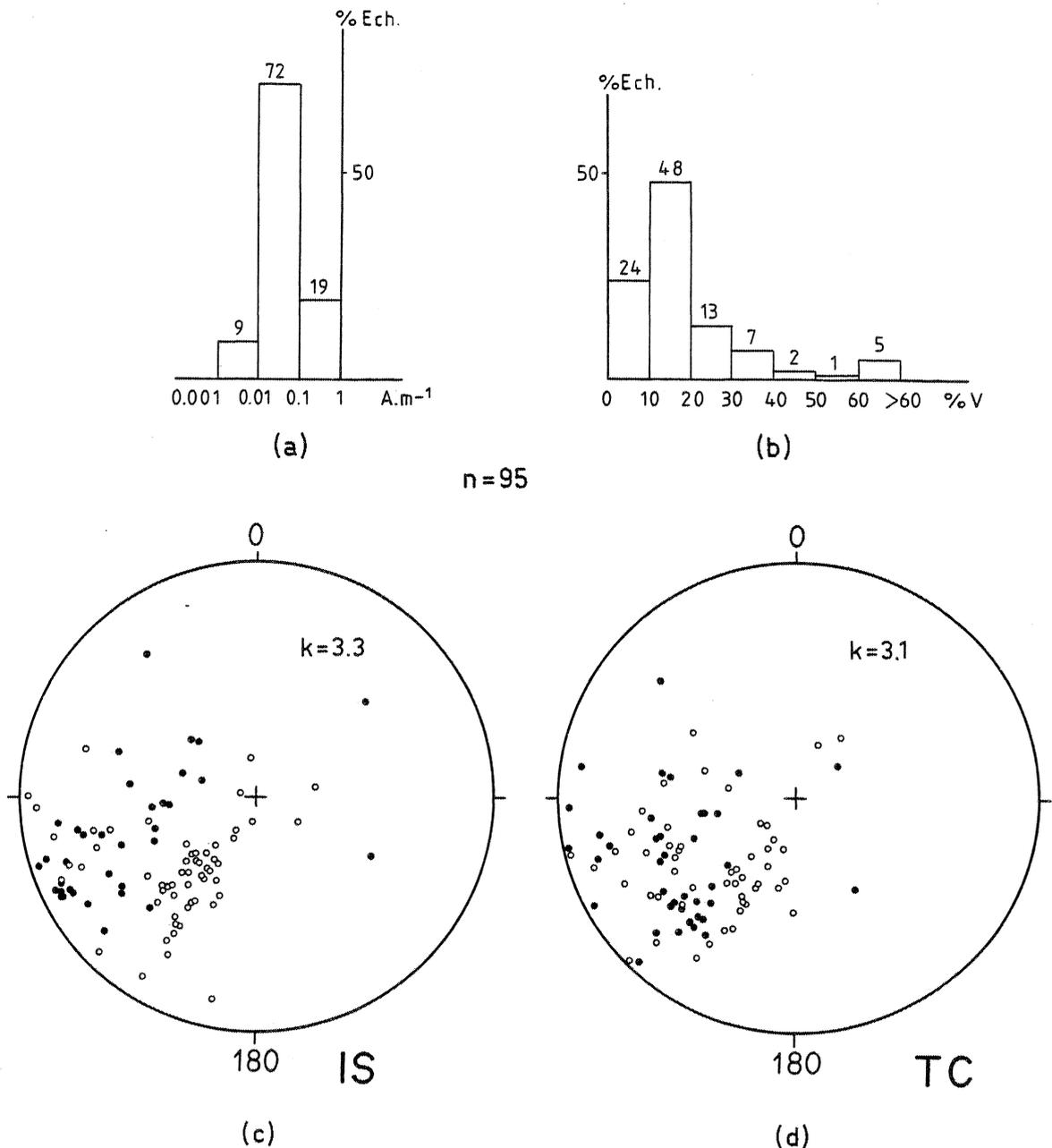


Fig. 52 - A.R.N. (a) histogramme des intensités (b) histogramme des pourcentages de viscosité (c) directions In Situ (d) directions après correction de pendage. n : nombre de données.

Ces 3 sites, situés dans les flancs du pli représentent les conditions extrêmes des variations angulaires stratification-schistosité au travers du pli : pour une inclinaison négative vers le S W de l'aimantation antétectonique, les flancs S W (P1, P4) du pli présenteront un angle aimantation-axe de raccourcissement faible, et, au contraire cet angle sera élevé dans le flanc N W (P3 - Fig. 53b). La distribution des données (Fig. 53a) correspond bien à ce que l'on peut attendre du comportement d'une population de vecteurs passifs : dispersion quand Z est proche de la direction moyenne (P1, 4), groupement de la population lorsque cet angle est élevé (P3).

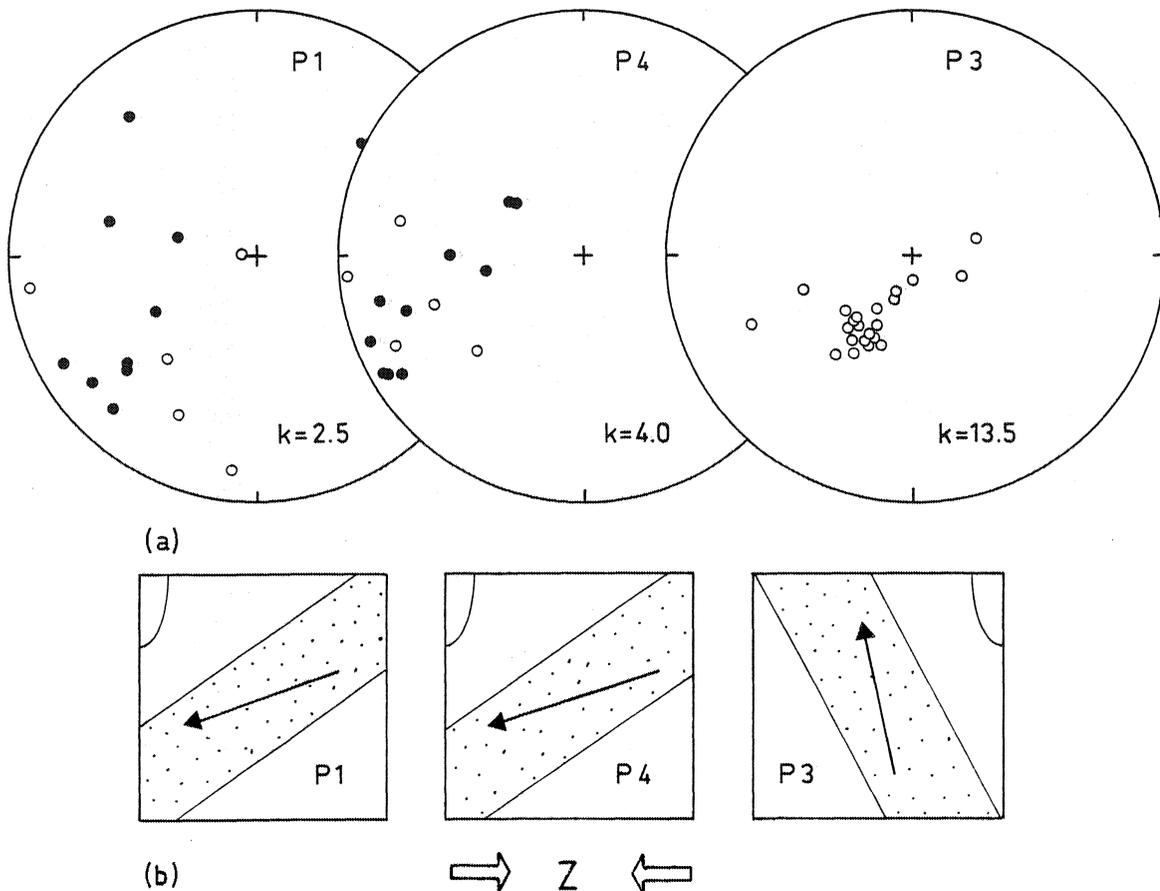


Fig. 53 - ARN In Situ (a) directions pour les sites P1 P4 et P3
 (b) coupe schématique illustrant les relations direction moyenne d'aimantation/direction de raccourcissement. Pointillé : stratification.

Cette observation reste bien sûr qualitative et ne tient pas compte de paramètres importants tels que la dispersion initiale des populations qui peut être différente d'un site à l'autre ou encore d'éventuelles réaimantations affectant l'orientation initiale du vecteur aimantation. Pour ce dernier point en particulier, il est nécessaire d'entreprendre l'analyse de l'aimantation naturelle afin d'en isoler la composante caractéristique.

2. Désaimantations chimiques

Suite aux problèmes rencontrés lors des désaimantations thermiques des échantillons de l'étude précédente, et après avoir constaté l'efficacité des désaimantations chimiques pour isoler l'aimantation caractéristique de ces séries rouges, seule cette dernière technique a été utilisée pour l'étude de l'aimantation des échantillons de ce pli.

Les 56 spécimens traités ont permis, dans la majorité des cas (53/56), la détermination d'une composante stable, soit unique (Fig. 54a), soit après élimination d'une composante douce (Fig. 54b). Dans le cas de l'échantillon 108a présenté ici, on peut remarquer la déclinaison Nord et l'inclinaison positive de cette composante secondaire, qui met en évidence un trainage non négligeable dans le champ actuel, à rapprocher de la valeur élevée du coefficient de viscosité de ce spécimen (23%).

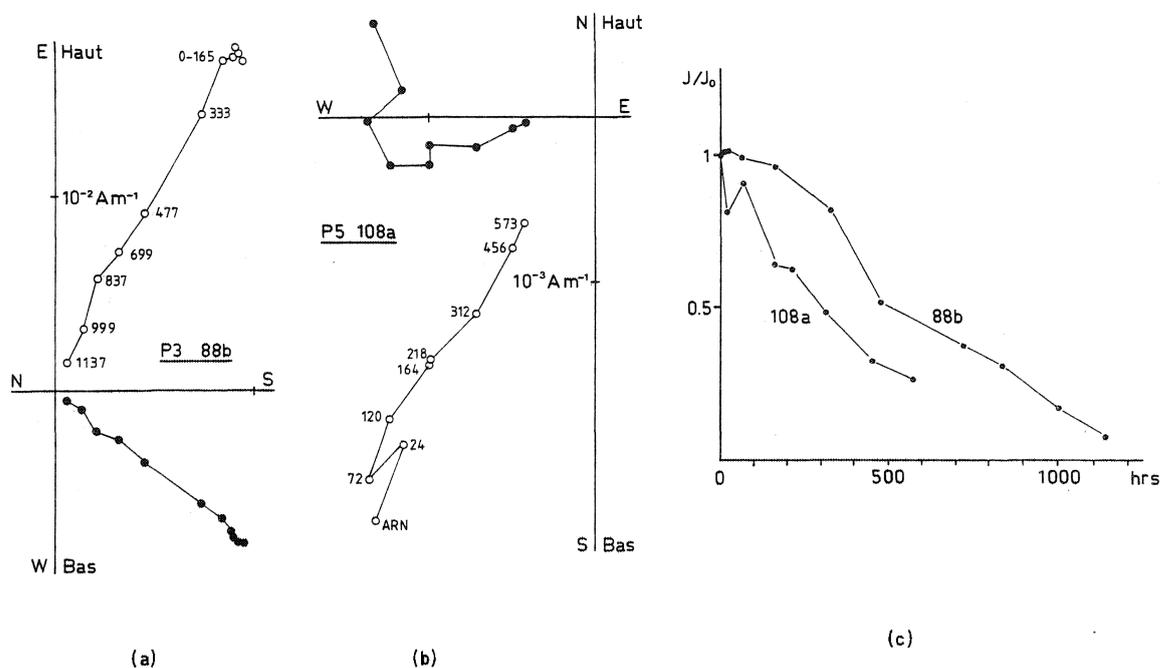


Fig. 54 - Désaimantations chimiques. (a) et (b) : courbes de désaimantation en projection orthogonale de Zijderveld (1967). Les chiffres indiquent le temps total d'attaque (ou lessivage) à chaque étape. (c) : évolution de l'intensité normalisée en fonction du temps d'attaque chimique.

Les courbes d'intensité en fonction du temps d'attaque à l'acide (Fig. 54c) montrent une décroissance linéaire de celle-ci et ne mettent donc pas en évidence l'existence de deux types de minéraux magnétiques de solubilités différentes.

Des acquisitions progressives d'ARI ont été effectuées sur deux couples d'échantillons attaqués et non-attaqués. Les courbes obtenues et les spectres de coercivité correspondants sont représentés Figure 55. Plusieurs observations peuvent être déduites de ces courbes :

- Les échantillons non attaqués montrent des coercivités très élevées, la saturation n'étant pas atteinte à 1,25 T. Ces fortes valeurs sont typiques de l'hématite pigment présente dans ces roches (Dunlop, 1972 ; Biquand, 1974 ; Perroud, 1980).

- Après attaque chimique on constate la présence de porteurs magnétiques de coercivité inférieure à 0,15 T, surtout sensible pour l'échantillon P1 117 (Fig. 55b). Si l'on construit les spectres de coercivité correspondant aux courbes de la figure 55b pour cette gamme de champs continus de 0 à 0.15 T (Fig. 56) on constate :

- D'une part, la très faible acquisition d'ARI des échantillons frais pour ces valeurs de champ, ce qui est conforme au fait que le porteur magnétique dominant est constitué par de l'hématite pigment.

- D'autre part les échantillons attaqués montrent une plus forte acquisition (en % de l'ARI acquise à 1.25 T) avec un maximum entre 0.01 et 0.05 T. Ces très faibles valeurs permettent de supposer la présence de magnétite plutôt que de spécularite, cette dernière ayant des coercivités minimales légèrement plus élevées (de l'ordre de 0.1, 0.2 T) (Dunlop, 1972 ;

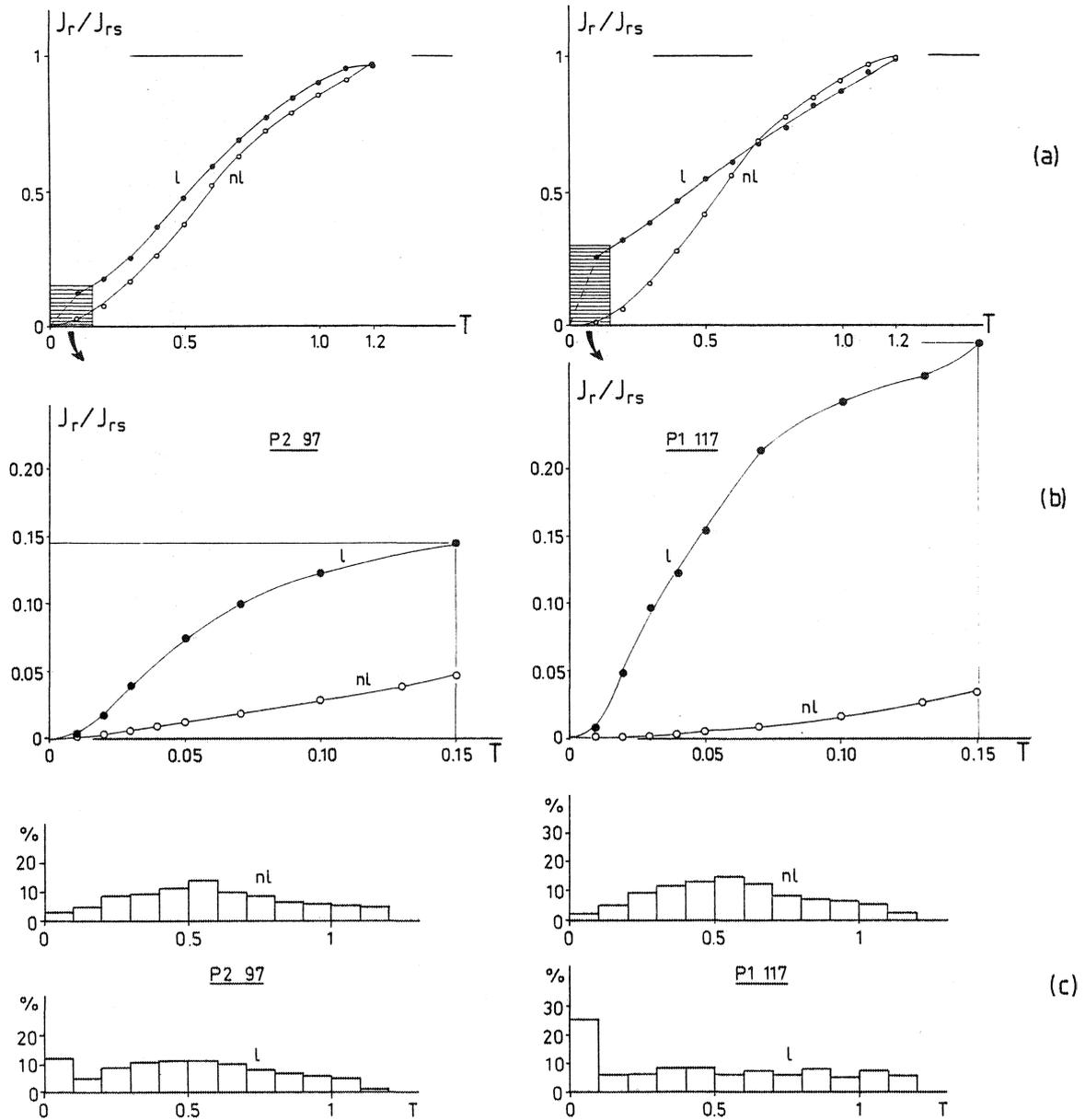


Fig. 55 - Acquisition d'ARI (a) : courbe d'acquisition normalisée en fonction du champ de 0 à 1,25 T. Zone hachurée acquisition d'ARI de 0 à 0,15T détaillée en (b). (c) spectre de coercivité correspondant aux courbes(a).

Biquand, 1974). Cependant, l'aimantation acquise à 0.1 T par les échantillons 97 et 117 attaqués à l'HCl ne représentent que 12,5 et 25%, respectivement, de l'aimantation acquise à 1.25 T (Fig. 55c). De plus cette aimantation acquise à 1.25 T par les échantillons attaqués est égale à 11 et 0,5% (pour 97 et 117 respectivement) de l'aimantation des échantillons frais (Fig. 55 c ; Tableau IV).

N°	Attaqué ₁ (Am ⁻¹)	Frais ₁ (Am ⁻¹)	%
97	1	8.9	11.2%
117	0.1	19	0.5%

Tableau IV :
Intensité des ARI
acquises à 1.25 T

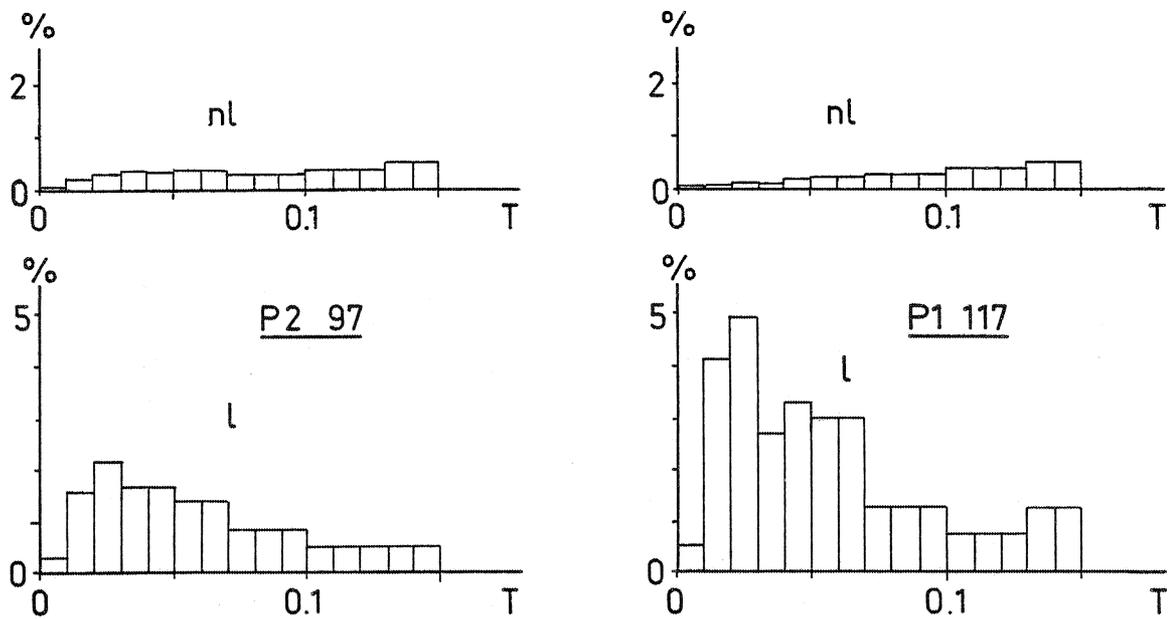


Fig. 56 - Spectres de coercivité correspondants aux courbes de la Figure 55 (b), pour des champs de 0 à 0.15 T.

De ceci on peut tirer deux conclusions :

- Les minéraux magnétiques de coercivité inférieure à 0.1 T n'apportent probablement qu'une contribution négligeable à la rémanence totale de ces roches.

- L'aimantation analysée par désaimantation chimique est principalement portée par de l'hématite pigment, et est donc d'origine chimique (ARC)

3. Résultats et interprétation

Les directions caractéristiques In Situ obtenues par désaimantations chimiques sont reportées site par site sur la figure 57. On peut remarquer la forte dispersion des données (Tableau V) en général, semblable aux données d'ARN

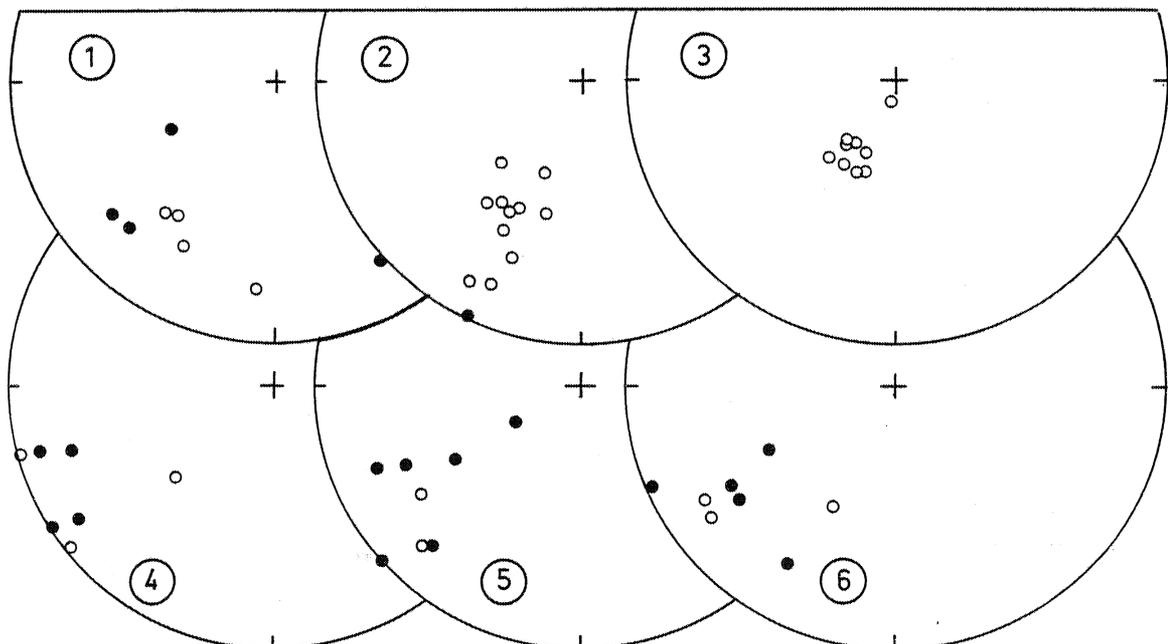


Fig. 57 - Direction d'aimantation In Situ des échantillons traités chimiquement.

Le meilleur groupement du site P3 est également visible et l'interprétation qualitative de cette particularité, notée pour les directions d'ARN reste valable.

SITE	N	IS		CP		K	α_{95}
		D	I	D	I		
P1	8	210	0	207	-40	4	30°
P2	12	207.5	-26.5	202	-39	25	9°
P3	9	210	-57.5	217.5	13	50	7.5°
P4	7	242	-2	246	-39	17.5	15°
P5	8	235	13	234	-5	10	18.5°
P6	8	232	4	234	26	10	18.5°
Moyenne N = 6		D=224.0 I=-11.0 k= 7.5 α_{95} =26		D=224.0 I=-15.0 k= 6 α_{95} = 29.5			

TABLEAU V : Directions moyennes In Situ (IS) après correction de pendage (CP) et paramètres statistiquement de groupement.

Après correction de pendage (qui bien entendu ne modifie pas la dispersion intra-site), l'évolution de la distribution des moyennes par site appelle deux remarques (Fig.58, Tableau V).

- Il n'y a pas d'amélioration significative de la dispersion des moyennes (k passe de 7.5, In Situ, à 6 après correction de pendage).

- Les directions moyennes des sites des flancs du pli, P1, P4 et P3, "se croisent" au cours du déplissement, ce qui pourrait correspondre au cas théorique d'une aimantation syntectonique (voir première partie, Chapitre 1).

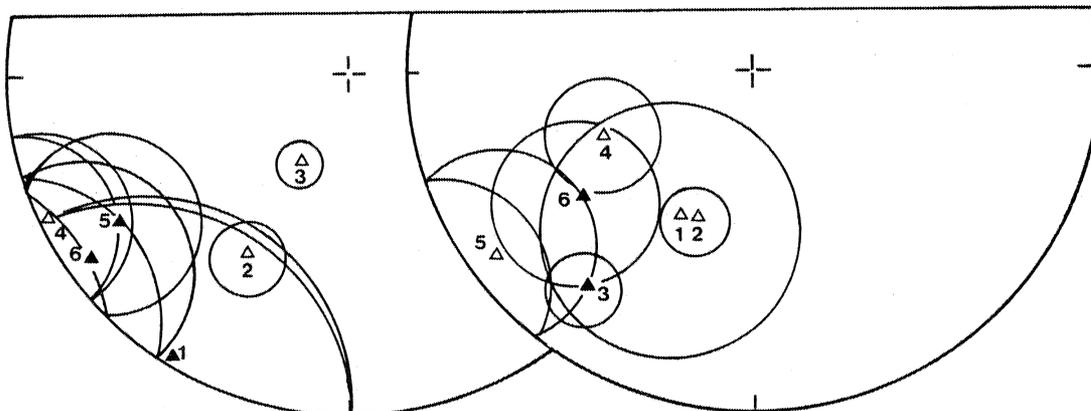


Fig. 58 - Directions moyennes des sites P1 à 6 après nettoyage
(a) : In Situ, (b) : après correction de pendage.

Cependant, dans un tel cas, la direction de champ réelle doit montrer une situation intermédiaire entre les positions extrêmes sur ces trajectoires. On sait par ailleurs que la phase majeure de déformation est d'âge récent, Oligo-Miocène et que le champ magnétique correspondant possède une forte inclinaison positive vers le Nord, ne se situant absolument pas sur la trajectoire décrite par les directions présentées ici au cours du déplissement. Cette hypothèse est donc écartée.

Il est par conséquent permis d'attribuer la responsabilité de ces dispersions intrasites et intersites à la déformation interne, hypothèse alternative proposée par Perroud (1983) pour ce type de situation.

IV - DEFORMATION INVERSE DES VECTEURS AIMANTATION

1. Effet sur la dispersion intrasite

Le calcul des directions déformées à l'aide du tenseur de déformation interne inverse, effectué sur chacune des directions d'aimantation nettoyées provoque un regroupement significatif de celles-ci, pour tous les sites. Les directions moyennes et leurs paramètres statistiques sont données tableau VI. Comme il a été noté au chapitre I, il s'agit ici d'une étape intermédiaire du traitement (avant correction de pendage) et les directions moyennes obtenues ne sont pas à interpréter à ce stade.

SITE	N	IS		DD				KDD/ K _{IS}	F	TEST
		K	α_{95}	D	I	K	α_{95}			
P1	8	4	30	206	3	125	5	31.25	2.48	+
P2	12	25	9	209	- 2	193	3	7.72	2.05	+
P3	9	50	7.5	220	-23	115	5	2.30	2.29	+
P4	7	17	15	217	2.5	174	4.5	10.23	2.69	+
P5	8	10	18.5	218	10	96	5.7	9.60	2.48	+
P6	8	10	18.5	217	7	107	5.5	10.70	2.48	+

TABEAU VI : Paramètres statistiques des moyennes In Situ (IS) et directions moyennes + paramètres statistiques après déformation inverse sans correction de pendage (DD). F : valeur de la table Fisher-Snedecor au point 5% pour les degrés de liberté (2(N - 1), 2(N - 1)).

L'ensemble de ces données est illustré site par site figure 59. Outre le caractère statistiquement positif du regroupement des populations induit par la déformation inverse, on peut faire une observation qualitative d'importance : dans les sites P1, P5 et P6 où les populations de départ (IS) présentent des dispersions importantes ($K < 10$), la déformation inverse ne provoque qu'une faible déviation angulaire des moyennes ($< 17^\circ$, valeur maximale site P5) ; au contraire, les trois autres sites P2, P3 et P4, où les dispersions initiales sont moins importantes ($K > 17$), montrent une forte déviation angulaire des moyennes au cours de la déformation inverse ($> 23^\circ$, valeur minimale site P4). Sans tenir compte ni de l'intensité de la déformation, ni de la dispersion initiale des données, difficile à estimer, cela revient à

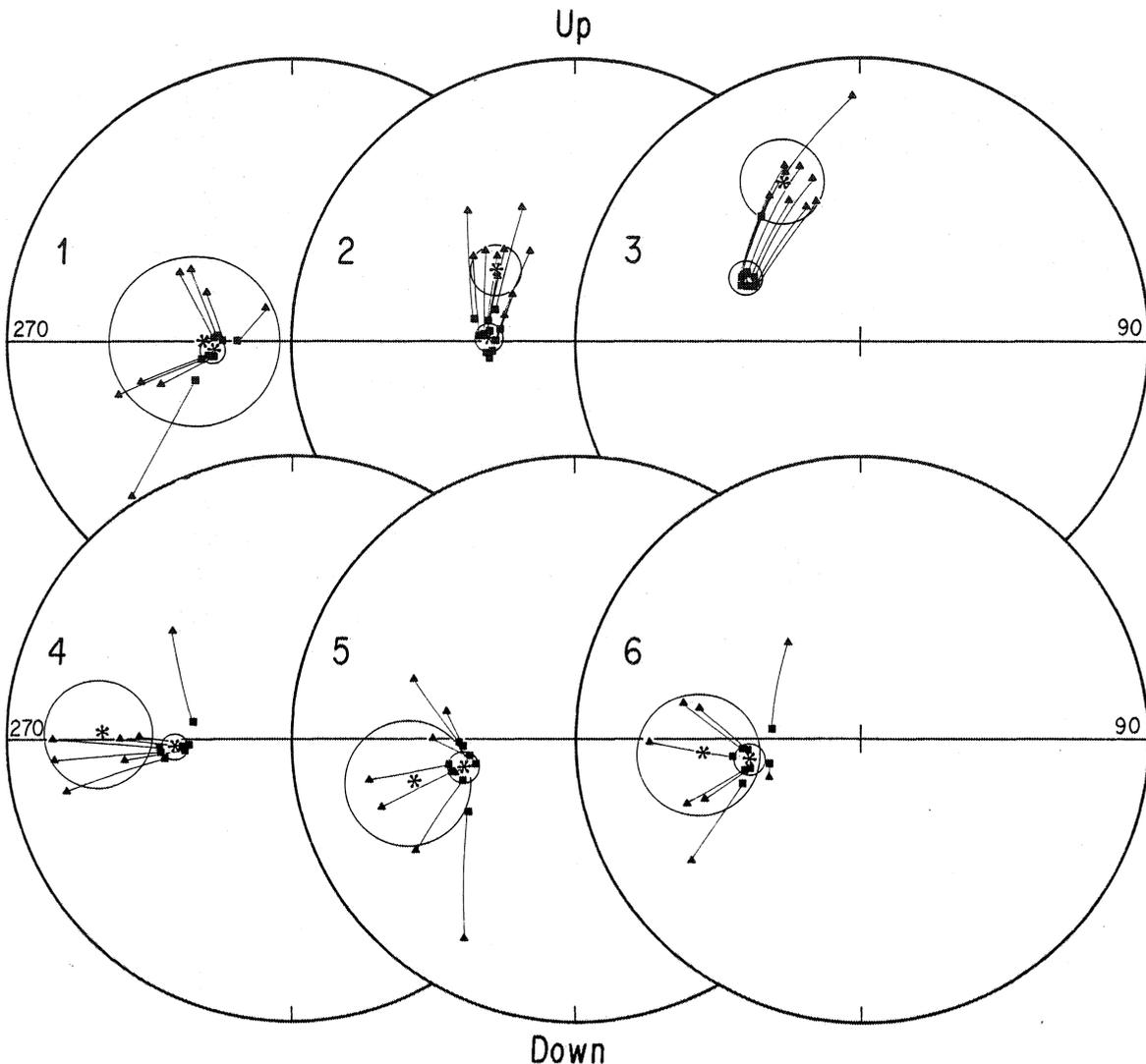


Fig. 59 - Projections verticales illustrant l'évolution provoquée par la déformation inverse des directions d'aimantation. Triangles : directions In Situ ; Carrés : après déformation inverse ; étoiles : moyenne de chaque population avec le cercle de confiance à 95%.

dire que : plus l'axe de raccourcissement est proche de la direction moyenne plus la dispersion provoquée par la déformation interne est importante; et plus l'angle entre l'axe de raccourcissement et la direction moyenne est élevé moins la dispersion provoquée est importante.

Cette remarque, qui rejoint celle qui avait été faite au sujet des directions d'ARN, montre que les distributions des directions observées à l'état déformé sont qualitativement compatibles avec un comportement passif d'une population de vecteurs au cours de la déformation.

2. Rotation rigide inverse.

La correction de pendage à partir du plan de stratification déformé (Tableau III p. 65) constitue la dernière étape de la déformation inverse, qui doit nous permettre de retrouver la direction moyenne de l'aimantation antétectonique dans l'hypothèse d'un comportement passif de celle-ci pendant la déformation. Les directions moyennes obtenues par site sont reportées tableau VII et représentées figure 60.

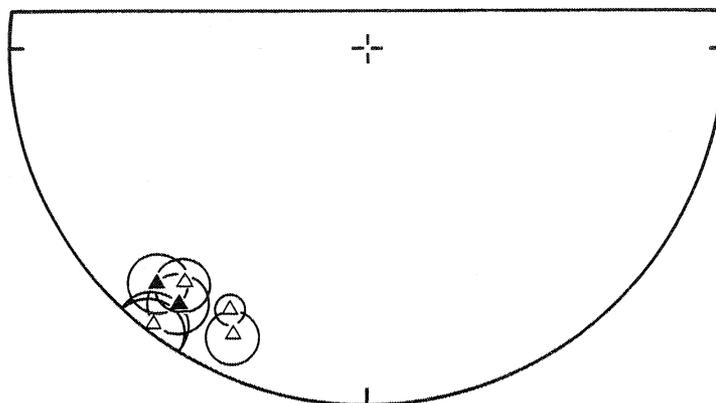


Fig. 60 - Directions moyennes des sites P1 à P6 après déformation inverse et correction de pendage de la stratification dédéformée.

La distribution de ces moyennes montre le bon groupement de celles-ci, comparées aux distributions In Situ et après correction de pendage (Fig. 61) ; ce groupement peut être considéré comme satisfaisant.

La direction moyenne retenue pour l'ensemble du pli, calculée à partir des 6 moyennes par site (Tableau VII, Fig. 62) est :

$$n = 6 \quad D = 214.5 \quad I = -2.5 \quad k = 65.5 \quad \alpha_{95} = 8^\circ$$

SITE	D	I	α_{95}
P1	205.5	- 7.0	5°
P2	208.0	-11.0	3°
P3	221.5	6.0	5°
P4	217.0	- 9.5	4.5°
P5	218.0	- 0.5	5.7°
P6	217.0	7.0	5.5°

TABLEAU VII : Directions d'aimantation caractéristique moyennes de chaque site après déformation inverse et correction de pendage de la stratification dédéformée. Le 1/2 angle d'ouverture est celui obtenu après déformation inverse (Tab. VI).

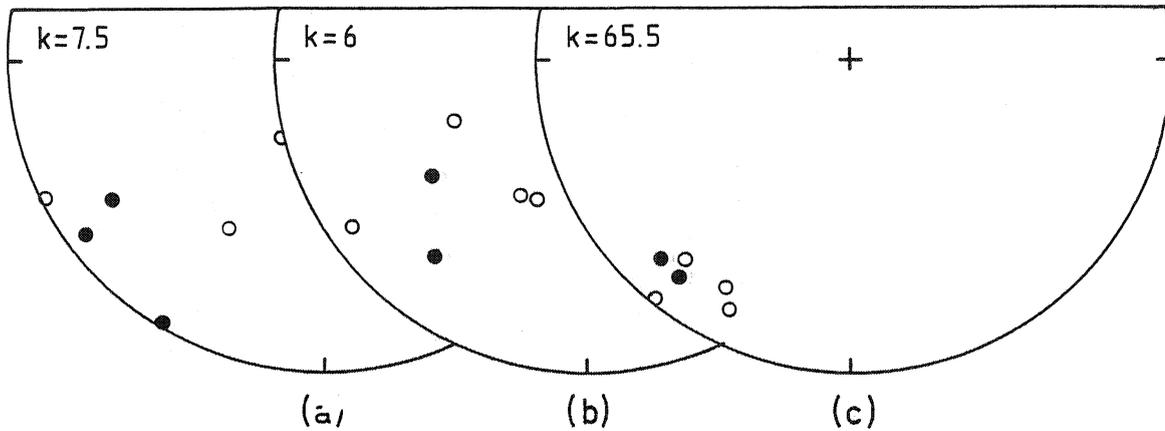


Fig. 61 - Distribution des moyennes des sites P1 à P6, sans leurs cercles de confiance (a) In Situ (b) après correction de pendage (c) après déformation inverse et correction de pendage de la stratification dédéformée.

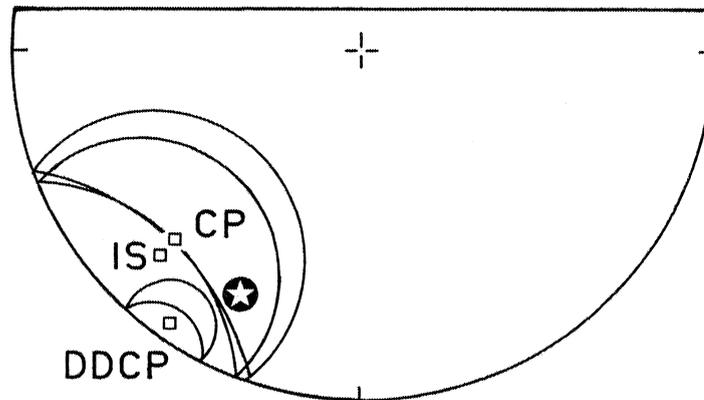


Fig. 62 - Moyennes des 6 moyennes du pli aux différents stades.
Etoile : Dôme de Barrot (Van den Ende, 1977).

La comparaison des paramètres k pour les distributions In Situ (Tableau V) et après déformation inverse et correction de pendage de la stratification dédéformée montre que le regroupement est statistiquement significatif.

In Situ	$n = 6$	$k_2 = 7.5$
DDCP	$n = 6$	$k_1 = 65.5$
	$k_1/k_2 = 8.72$	$F(10, 10) = 2.98 \rightarrow k_1 > k_2$

Il en va de même si l'on compare la distribution obtenue ici, à celle qui est déterminée par la simple correction de pendage ($k = 6$; Tableau V).

3. Comparaison avec quelques directions permiennees

A partir de 7 pôles retenus comme les plus fiables par Van der Voo et al. (1983) pour le Permien supérieur de l'Europe stable (248 à 223 MA), les directions d'aimantation correspondant à ces 7 pôles ont été calculées pour la position moyenne des affleurements de séries rouges des Alpes Maritimes ($\sim 44,1^\circ \text{ N} ; 7,1^\circ \text{ E}$).

Les directions ainsi obtenues (Tableau 7 en annexe) sont représentées figure 63 (a) ainsi que les directions moyennes déterminées dans cette étude, pour le pli, d'une part et pour les autres sites (Dôme de Barrot et Vallées de la Tinée et de la Roya) d'autre part. On peut constater la bonne intégration de ces deux directions à la population de référence.

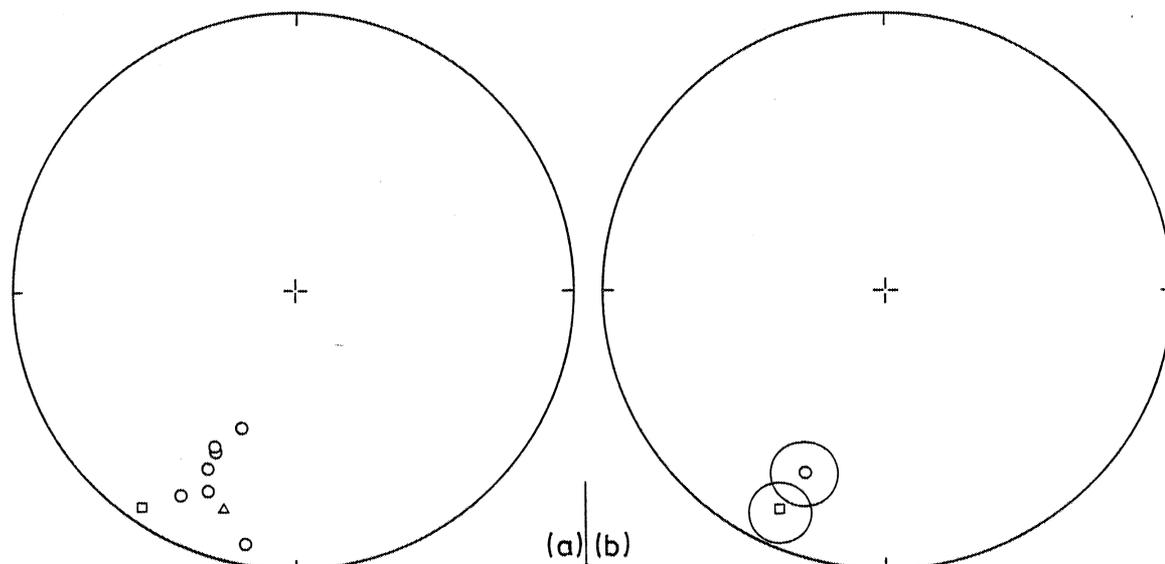


Fig. 63 : (a) cercles : directions recalculées d'après la position des 7 pôles permien publiés par Van der Voo et al. (1983) pour l'Europe stable ; triangle : direction moyenne obtenue dans cette étude pour l'ensemble des sites du gradient ($n = 8$) ; carré : pli ($n = 6$). (b) cercle : moyenne des sept directions de référence ; carré : moyenne des directions obtenues sur les 14 sites (gradient + pli) de cette étude.

Cette homogénéité a été vérifiée à l'aide du test de comparaison des moyennes (Watson, 1956) appliqué à la moyenne globale des 14 sites des Alpes Maritimes étudiés ici et à la moyenne des 7 directions permiennees déterminées d'après les paléopôles publiés par Van der Voo et al. 1983) (Fig. 63b).

Ce test est le suivant :

Après avoir déterminé l'identité des précisions des moyennes de S populations ($k_1 = k_2 = \dots = k_S$) et ayant construit les cercles de confiance et constaté qu'il se coupent

$$\text{si } \frac{2 (\sum N_i - S) \sum R_i - R}{2 (S - 1) \sum N_i - R_i} < F (2 (S - 1), 2 (\sum N_i - S))$$

où N_i est le nombre de directions individuelles de la population i , R_i le vecteur résultant de la même population, R le vecteur résultant de toutes les directions individuelles et F la valeur de la table Fisher-Snédecor au point 5% pour les degrés de liberté $2 (S - 1)$ et $2 (\sum N_i - S)$, alors les populations sont identiques.

Pour la comparaison de deux directions moyennes cette expression se réduit à ($S = 2$):

$$(N - 2) \frac{R_1 + R_2 - R}{N - R_1 - R_2} < F(2, 2(N - 2))$$

On a les données suivantes :

Référence	$N_1 = 7$	$K_1 = 47.5$	$R_1 = 6.8736$	$D = 203.5$	$I = -18.5$
Alpes Maritimes	$N_2 = 14$	$K_2 = 33.6$	$R_2 = 13.6140$	$D = 205.0$	$I = -7.0$
TOTAL	$N = 21$	$K = 33.1$	$R = 20.3950$	$D = 204.5$	$I = -11.0$

- Test $K_1 = K_2$

$$K_1 / K_2 = 47.5 / 33.6 = 1.41$$

$$F(2(N_2 - 1), 2(N_1 - 1)) = F(26, 12) = 2.15$$

$$K_1 / K_2 < F \rightarrow K_1 = K_2$$

- Identité des populations

$$(N - 2) \frac{R_1 + R_2 - R}{N - R_1 - R_2} = 3.43$$

$$F(2, 2(N-2)) = F(2, 38) = 3.30$$

Les deux directions moyennes ne sont donc pas statistiquement différentes

- Conclusion

Ces tests montrent que la direction moyenne de l'ensemble des sites étudiés dans les séries rouges permienes des Alpes Maritimes (Etude générale Chapitre I + pli) n'est pas significativement différente des directions déduites des 7 pôles permienes considérés comme les plus sûrs (Van der Voo et al., 1983).

V - INFLUENCE D'UNE COMPOSANTE DE PERTE DE VOLUME SUR L'EVOLUTION DE LA DISPERSION INTRASITE

Dans tout ce qui précède, le tenseur de déformation utilisé a été déterminé en supposant un changement de volume nul au cours de la déformation. Cela revient à dire que les rapports axiaux des taches de réduction mesurées sur le terrain ont été considérés comme représentant les rapports des valeurs propres du tenseur de déformation interne λ_1/λ_2 , λ_2/λ_3 et λ_1/λ_3 avec $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$.

D'un point de vue théorique, un changement de volume anisotrope conduit à un changement de forme de l'objet (Ramsay et Wood, 1973) et peut donc être assimilé à une déformation interne (strain). De ce fait, le tenseur de déformation déduit des mesures de taches constitue bien le tenseur de déformation totale. Cependant, seule la part isovolumique de cette déformation provoque la rotation *réelle* de marqueurs passifs même si à certaines échelles une rotation *apparente* liée au changement de volume peut s'y superposer (Fig. 64).

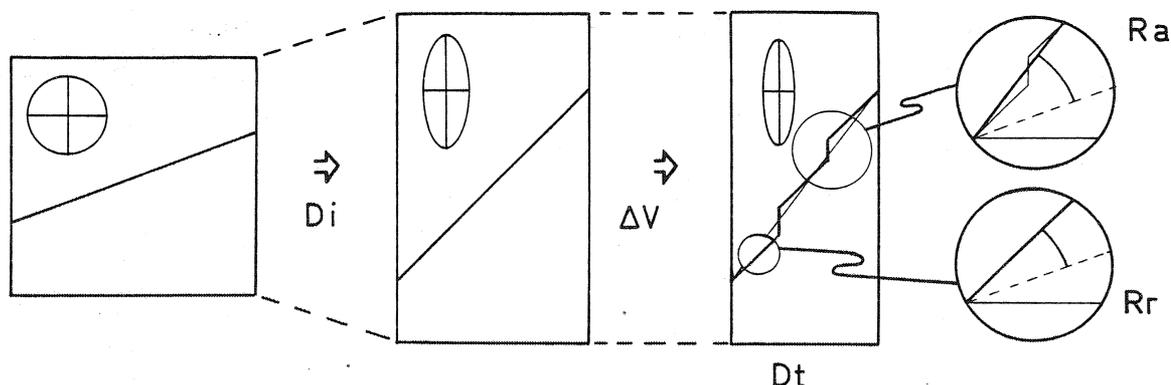


Fig. 64 - Illustration schématique des problèmes posés par la superposition d'une perte de volume anisotrope à une déformation isovolumique. Di : déformation isovolumique ; ΔV : changement de volume ; Dt : déformation totale ; R_a : rotation apparente ; R_r : rotation réelle.

On peut donc penser que si la désorientation des vecteurs aimantation au cours de la déformation est liée à la rotation passive des minéraux d'hématite, le fait de négliger une composante de perte de volume conduit à une surestimation de cette rotation. Il est par conséquent intéressant d'essayer d'évaluer le biais introduit sur le résultat final après déformation inverse par cette approximation.

Dans ce qui suit, les directions d'aimantation ont été recalculées en supposant que l'ellipsoïde de déformation totale déterminé par les taches de réduction résulte de la superposition d'une perte de volume dans la direction λ_3 à l'ellipsoïde de déformation interne isovolumique. Dans le système d'axe de la déformation on a

$$\begin{pmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1+\Delta \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} i_1 & 0 & 0 \\ 0 & i_2 & 0 \\ 0 & 0 & i_3 \end{pmatrix}$$

Déformation totale Changement de volume Déformation isovolumique

où λ_1 , λ_2 et λ_3 sont les valeurs principales de l'ellipsoïde mesurées sur le terrain.

En considérant une perte de volume maximale de 25% suivant Z ($\Delta = -0.25$) on détermine:

$$\begin{aligned} i_1 &= \lambda_1 \\ i_2 &= \lambda_2 \\ i_3 &= \lambda_3 / (1 + \Delta) \end{aligned}$$

avec $i_1 i_2 i_3 = 1$ et $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 + \Delta$

Le coefficient de perte de volume (-0.25) a été choisi d'après l'estimation faite par Graham (1978a) d'une perte de volume incrémentale de 3% par 10% de raccourcissement. Une perte de volume totale de 25% constitue donc probablement un maximum.

Les résultats obtenus en effectuant la déformation inverse sans correction de pendage en tenant compte de cette perte de volume sont donnés ci-après et comparés avec les résultats sans perte de volume (Tableau VIII ; Fig. 55).

SITE	N	$\Delta V = 0$ (*)			$\Delta V = -0.25$			Test $k_1 = k_2$		
		D	I	k	D	I	k	k_1/k_2	F	Test
P1	8	206	3.0	125	207.5	3.0	72	1.72	2.48	$k_1 = k_2$
P2	12	209	-2.0	193	208.5	-4.5	119	1.62	2.05	"
P3	9	220	-23.0	115	224	-26.0	73	1.45	2.23	"
P4	7	217	2.5	174	223.0	2.0	101	1.72	2.69	"
P5	8	218	10.0	96	220.5	10.5	58	1.65	2.48	"
P6	8	217	7.0	107	219.0	6.5	64	1.67	2.48	"
		(*) d'après le tableau VI								

TABLEAU VIII : Déformation inverse sans correction de pendage, sans ($\Delta V = 0$) et avec ($\Delta V = -0.25$) perte de volume dans la direction Z. Données et résultats du test $k_1 = k_2$.

Ces résultats montrent que les populations sont statistiquement identiques tant du point de vue de leur distribution ($k_1 = k_2$) que de celui de leurs directions (Fig. 65). On peut donc conclure que dans l'exemple étudié ici, le fait de négliger une éventuelle perte de volume au cours de la déformation n'introduit pas de biais significatif sur les résultats obtenus après déformation inverse.

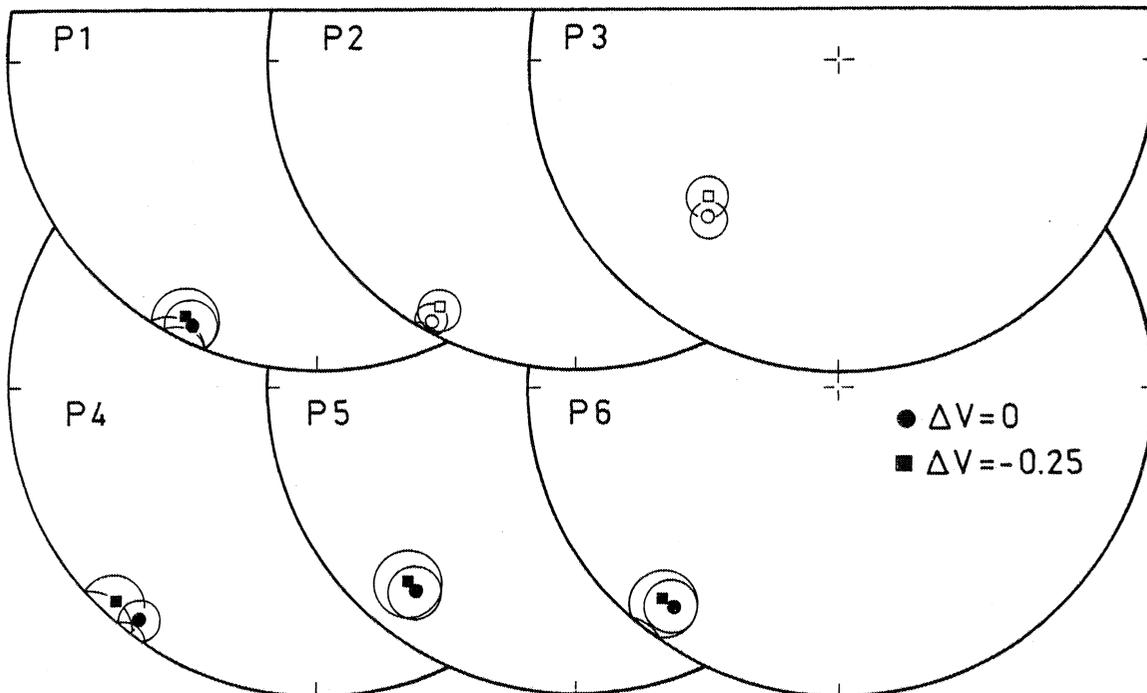


Fig. 65 - Directions moyennes des sites P1 à P6 avec (carrés) et sans (ronds) changement de volume dans la direction Z.

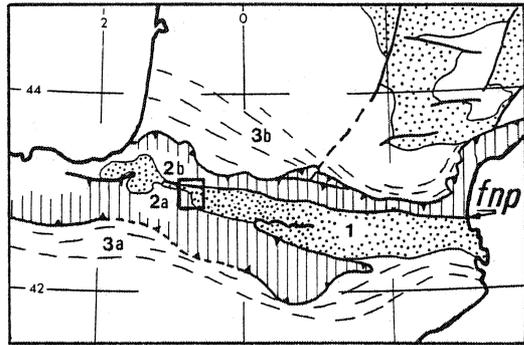
VI - CONCLUSION

L'étude de ce pli confirme les résultats obtenus sur l'ensemble des sites échantillonnés dans ces séries rouges.

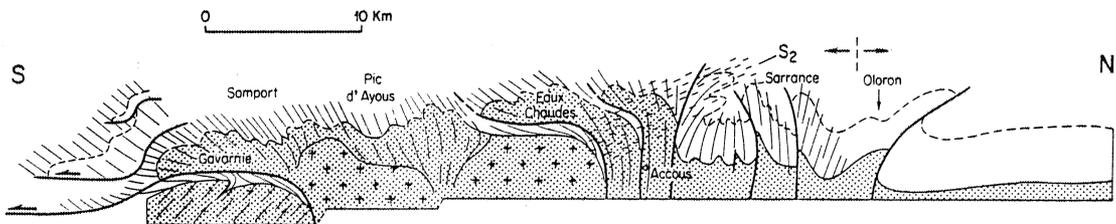
L'analyse qualitative des directions caractéristiques déterminées par désaimantation chimique montre qu'il existe de bonnes corrélations entre dispersion de ces directions et position relative des axes de la déformation dans chaque site. Ceci nous a conduit à tenter la déformation inverse sur chacune de ces directions individuelles, ce qui a permis de retrouver des directions moyennes par site de bonne qualité et une direction moyenne d'ensemble tout à fait compatible avec les directions d'aimantations moyennes connues pour le Permien Supérieur.

Bien qu'une perte de volume suivant Z puisse conduire à une surestimation de l'intensité de la déformation enregistrée par la rotation de marqueurs passifs, la modélisation d'une telle perte de volume montre que, même pour une valeur aussi élevée que 25%, le résultat final n'est pas significativement affecté. Ceci permet de plus de supposer que même si le vecteur aimantation ne se conduit pas strictement comme un marqueur passif, la méthode consistant à effectuer la déformation inverse reste correcte aux erreurs de détermination près et permet de déterminer, au moins dans ces séries, une direction d'aimantation antétectonique fiable.

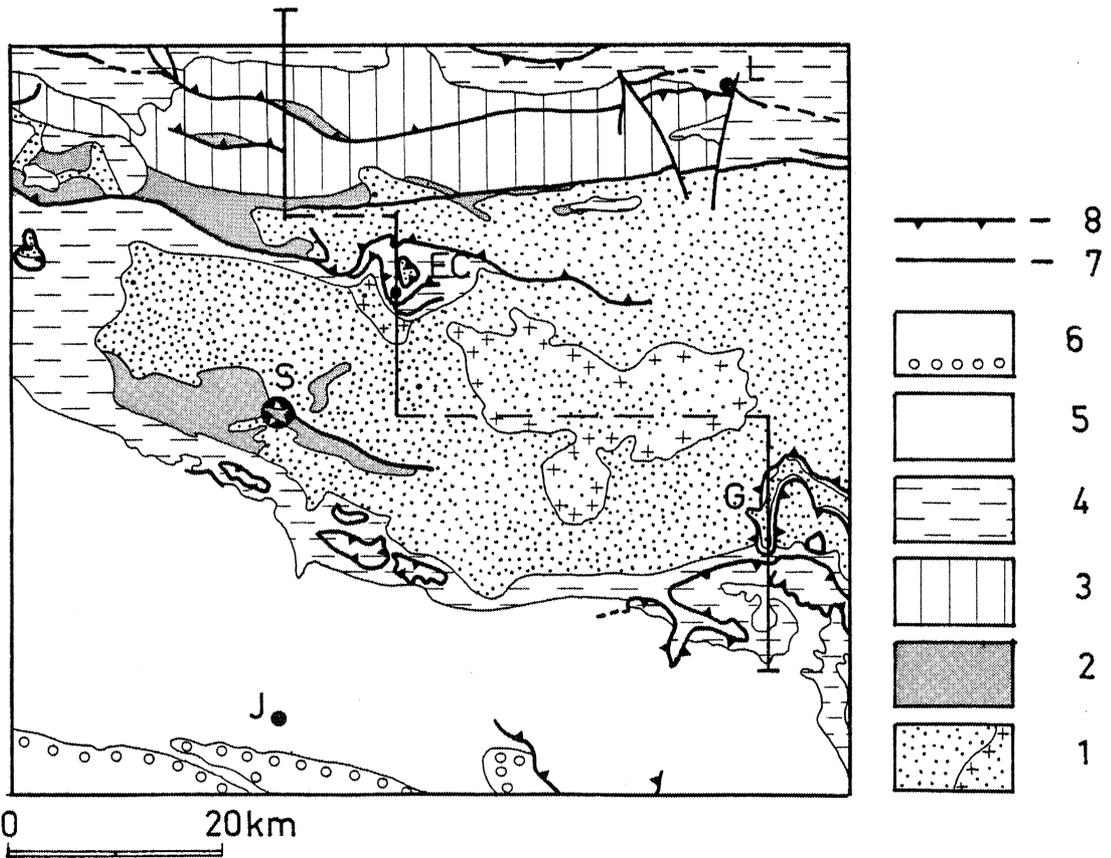
(a)



(b)



(c)



CHAPITRE III - LES SERIES ROUGES PERMO-TRIASIQUES AU COL DU SOMPORT (PYRÉNÉES OCCIDENTALES)

I - CONTEXTE GEOLOGIQUE ET PALEOMAGNETIQUE.

Situées à la bordure Sud de la zone primaire axiale (Fig. 66a), les séries rouges permo-triasiques autochtones du Somport montrent un déversement Sud caractéristique de la structure générale des séries du versant Sud des Pyrénées. Ce déversement Sud, plus marqué au Nord par le chevauchement des Eaux Chaudes (Fig. 66b, c) des terrains hercyniens sur le Crétacé (Choukroune, 1976a) constitue l'équivalent latéral amorti de l'enracinement de la nappe de Gavarnie et des têtes plongeantes des Nogueras (Seguret, 1972). Au Somport, la phase majeure synschisteuse pyrénéenne est à l'origine de la structuration monophasée de ces séries, essentiellement caractérisées par des plis asymétriques présentant une schistosité de plan axial à pendage Nord faible à intermédiaire. Sa position, au Sud du système Faille Nord-Pyrénéenne qui constitue la limite des plaques Ibérie et Europe lors de l'ouverture du Golfe de Gascogne au Crétacé (Choukroune et al., 1973) marque l'appartenance de cet affleurement à la plaque espagnole.

Ces évidences structurales sont appuyées par les données paléomagnétiques : les résultats de Schwarz (1963) obtenus quelques kilomètres au sud sur les Andésites permienes du Rio Aragon Subordan donnent une direction SE ($D = 152^\circ$ $I = -22.5^\circ$) caractéristique des directions permienes et permo-triasiques de la plaque Ibérie (Zijderveld et Van der Voo, 1971 ; Van der Voo et Boessenkool, 1973)

II - SITES D'ECHANTILLONNAGE

6 sites ont été choisis le long de la N 134 en descendant du col du Somport vers Urdos sur environ 500 m de coupe. Les caractères généraux des positions structurales de ces sites sont les suivants (schéma, fig. 67) du Sud vers le Nord :

- 3 sites, A B et C, sont situés sur un flanc court, subvertical de ces plis asymétriques. Le site B est constitué d'un banc de grès rouge d'environ 1m d'épaisseur, les deux autres sont situés dans les schistes fins.

- Les 3 autres sites D, E et F, occupent des positions structurales identiques dans un flanc long à faible pendage Nord. Ces trois sites sont également constitués de schistes fins.

Fig. 66 - (a) Les grandes zones structurales de la chaîne Pyrénéenne (d'après Choukroune, 1976b) ; 1 : zone primaire axiale 2a(b) : zone sud (nord) pyrénéenne ; 3a (b) : avant-pays plissé sud (nord) ; fnp : faille nord-pyrénéenne.
 (b) Coupe Oléron-Gavarnie (d'après Choukroune, 1976). Grisé : matériel hercynien.
 (c) carte géologique (d'après carte structurale au 1/500 000 - ELF-ERAP).
 L : Lourdes ; EC : Eaux-Chaudes ; S : Somport ; G : Gavarnie ; J : Jaca. 1 : Matériel hercynien avec granite dans la zone axiale ; 2 : Permo-Trias ; 3 : Secondaire anté-Cenomanien ; 4 : Crétacé moyen et supérieur ; 5 : Eocène ; 6 : Oligocène ; 7 : failles subverticales ; 8 : failles inverses et bases de nappes.

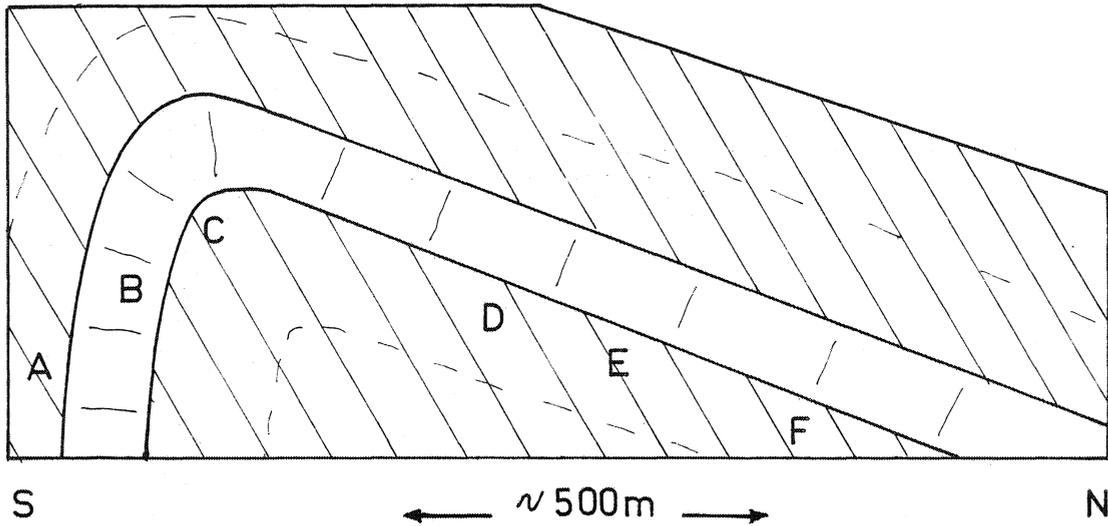


Fig. 67 - Positions structurales des sites échantillonnés au Somport.

66 carottes ont été forées et orientées sur le terrain.

III - ANALYSE QUANTITATIVE DE LA DEFORMATION FINIE

1. Caractères généraux

Les séries rouges étudiées ici sont constituées d'alternances de pélites fines et de bancs gréseux. La schistosité très pénétrative et bien développée dans les bancs pélitiques subit une importante réfraction au passage des bancs gréseux où elle se présente sous la forme d'une schistosité de fracture peu pénétrative qui n'affecte pas la fabrique sédimentaire de ces bancs. Ceci est confirmé par l'orientation des taches de réduction et galets, dont l'axe d'allongement reste parallèle au plan de stratification S_0 ; cependant, ceci n'est vrai qu'au coeur des bancs gréseux.

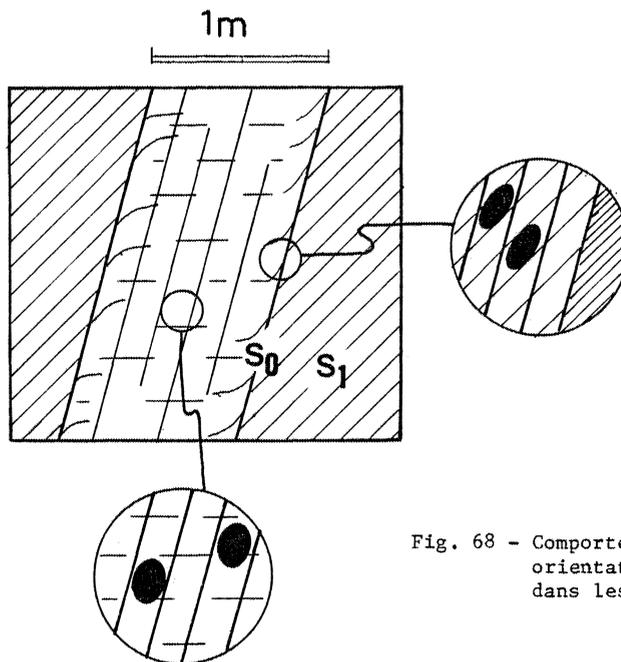


Fig. 68 - Comportement de la schistosité et orientation des marqueurs elliptiques dans les bancs gréseux.

En effet, la réfraction de la schistosité et le passage schistosité de flux/schistosité de fracture représente un gradient inverse de déformation vers le centre des bancs compétents, et les bordures de ceux-ci présentent des fabriques intermédiaires (Fig. 68). Compte tenu de ces observations, les échantillons du site B ont été prélevés au centre d'un de ces bancs et ne présentent pas de structures pénétratives liées au plissement d'ensemble de ces séries.

Les marqueurs utilisés ici pour la détermination du tenseur de déformation interne de chaque site sont des taches de réduction et des galets de quartz. Ces marqueurs ne sont présents qu'en quantité beaucoup moins importante que dans les Alpes, et comme on le verra, sont d'assez petite taille, rarement supérieure à 3 cm.

2. Mesures - Résultats

Rapport axiaux

Les mesures de rapports axiaux des taches de réduction ou des galets elliptiques et la détermination des rapports moyens n'ont généralement pas posé de problèmes.

On peut cependant faire quelques remarques sur ces mesures (Tableau I, Fig. 69) :

- Pour le site B, où il a déjà été noté l'absence de déformation interne d'origine tectonique, les mesures effectuées dans tous les plans disponibles subperpendiculaires à S_0 montrent une bonne homogénéité et confirment le caractère sédimentaire de la fabrique avec un ellipsoïde "en galette", de révolution autour de Z. Pour ce même site on peut également remarquer l'homogénéité des mesures effectuées sur les taches de réduction et sur les galets (Fig. 69)

SITE	λ_1 / λ_2	λ_2 / λ_3	λ_1 / λ_3	K	r
A	1.3	1.6	(2.1)	0.558	1.9
B	(1)	(2.1)	2.1	0	2.1
C	1.6	(1.7)	2.8	0.886	2.3
D	1.5	(2.1)	3.1	0.546	2.6
E	(1.2)	3.5	4.2	0.145	3.7
F	1.5	3.0	(4.5)	0.369	3.5

TABLEAU I - Rapports axiaux moyens et paramètres de forme et d'intensité de l'ellipsoïde de déformation de chaque site. Les chiffres entre parenthèses sont les rapports non mesurés, mais calculés d'après les mesures dans les deux autres plans.

$$K (\text{paramètre de forme}) = \ln (\lambda_1 / \lambda_2) / \ln (\lambda_2 / \lambda_3)$$

$$r (\text{intensité}) = \lambda_1 / \lambda_2 + \lambda_2 / \lambda_3 - 1$$

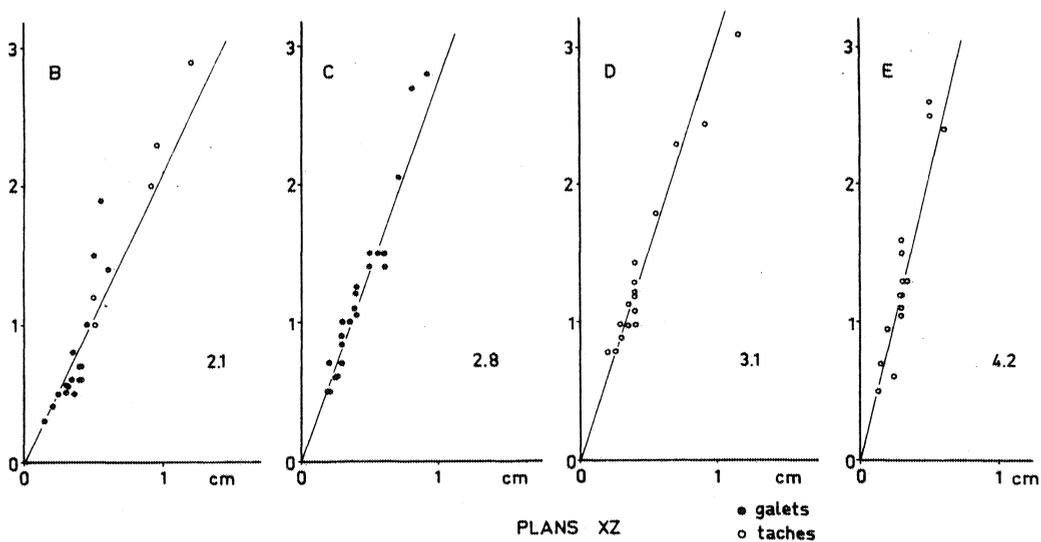
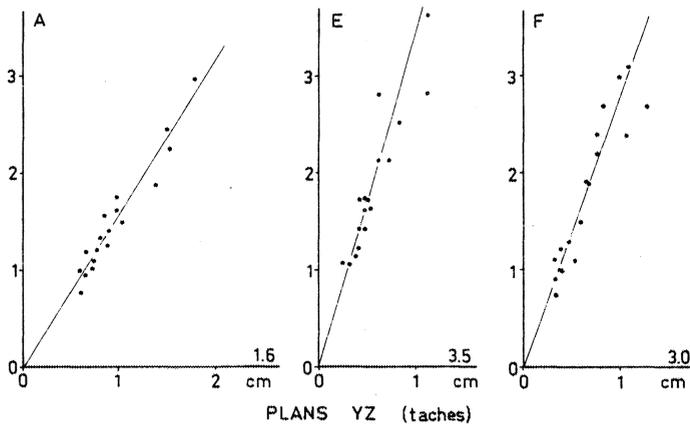
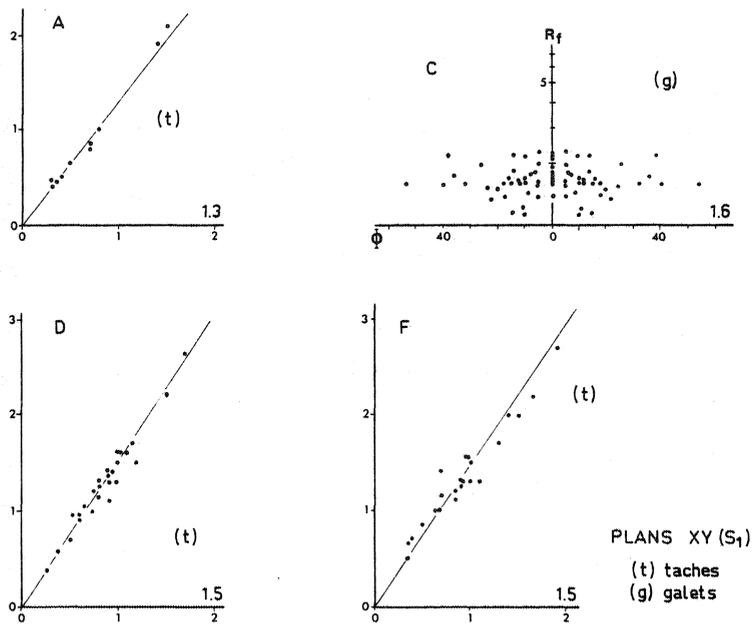


Fig. 69 - Diagrammes R_f/ϕ et Grand Axe/Petit Axe des mesures de marqueurs elliptiques (taches de réduction et galets) dans les trois plans de déformation finie. Les rapports moyens sont indiqués dans chaque diagramme.

- Le site C est le seul pour lequel la détermination du rapport moyen λ_1/λ_2 a nécessité l'emploi d'un diagramme Rf/ϕ (Fig. 69). Pour les autres sites les mesures dans le plan XY montrent de faibles fluctuations d'angle d'allongement des ellipses autour de la linéation d'étirement contenue dans S_1 et le rapport moyen a été déterminé par simple moyenne arithmétique des mesures grand axe/petit axe, pour des angles $\phi < 10^\circ$.

- Pour les autres plans de déformation, XZ et YZ, l'axe d'allongement des taches ou des galets reste parallèle à la trace de S_1 et les rapports λ_1/λ_3 et λ_2/λ_3 ont également été estimés par la moyenne arithmétique des mesures.

Reportées dans le diagramme de Flinn logarithmique (Fig. 70), ces mesures sont groupées dans le champ de l'aplatissement et de la déformation plane (site C), avec une intensité moyenne, inférieure à 3.7 (site E)

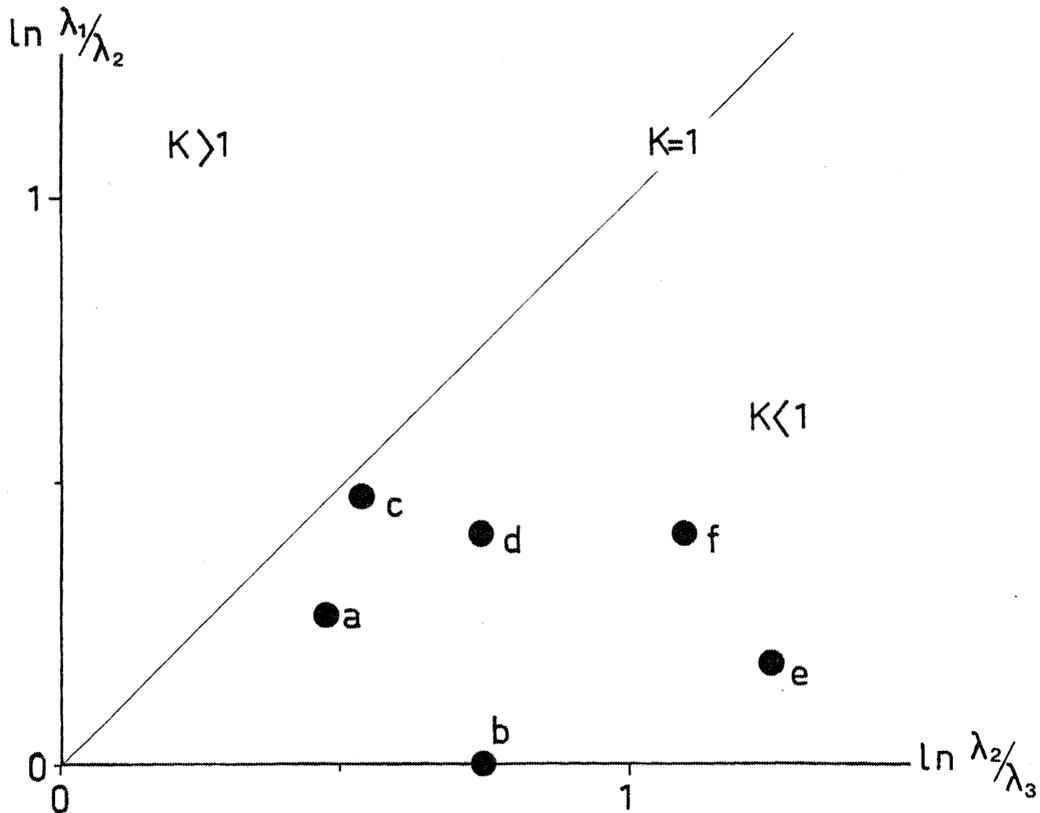


Fig. 70 - Diagramme de Flinn logarithmique.

Directions principales de la déformation finie.

Les directions structurales moyennes mesurées sur le terrain sont reportées Tableau II et illustrées Fig. 71. L'axe Z de l'ellipsoïde de déformation finie est le pôle de la schistosité, sauf dans le cas du site B (pôle de la stratification). Pour ce même site B, le plan de schistosité de fracture est reporté ; on peut noter que son pendage est plus faible que les plans S_1 des autres sites, ce qui illustre la réfraction de celle-ci notée précédemment.

SITE	S_0		S_1		X		Z	
	Direction	Pendage	Direction	Pendage	Déclinaison	Inclinaison	Déclinaison	Inclinaison
A	160.0	65.0	287.0	66.0	17.0	66.0	197.0	24.0
B	297.5	88.0	(277.5	49.5)	-	-	207.5	2.0
C	166.5	40.0	292.5	70.0	22.5	70.0	202.5	20.0
D	254.0	19.0	274.5	51.5	4.5	51.5	184.5	38.5
E	274.0	28.0	282.0	62.0	12.0	62.0	192.0	28.0
F	278.5	25.0	277.0	52.0	7.0	52.0	187.0	38.0

TABLEAU II - Directions structurales moyennes pour chaque site. Plans (S_0 , S_1) : Direction - Pendage; axes (X, Z) : Déclinaison Inclinaison.

L'axe X est défini par la linéation d'étirement contenue dans S_1 , suivant la ligne de plus grande pente de ce plan. On peut enfin remarquer la similitude de l'ensemble de ces directions pour les sites A et C (flanc court à fort pendage) d'une part, et pour les sites D; E et F (flanc long à faible pendage), d'autre part.

Du point de vue de la géométrie du plissement, en plus du caractère assymétrique avec déversement sud déjà souligné, on peut remarquer la répartition des pôles de S_0 sur un petit cercle (Fig. 72). Ceci traduit le caractère conique assez marqué du pli étudié dont il faudra éventuellement tenir compte lors des calculs de déplissement comme source possible d'erreur sur les déclinaisons. Le meilleur petit cercle (Mardia et Gadsden, 1977 ; Perroud, 1980) passant par les pôles donne un axe de ce cône de $D = 140.5$ $I = 10.0$.

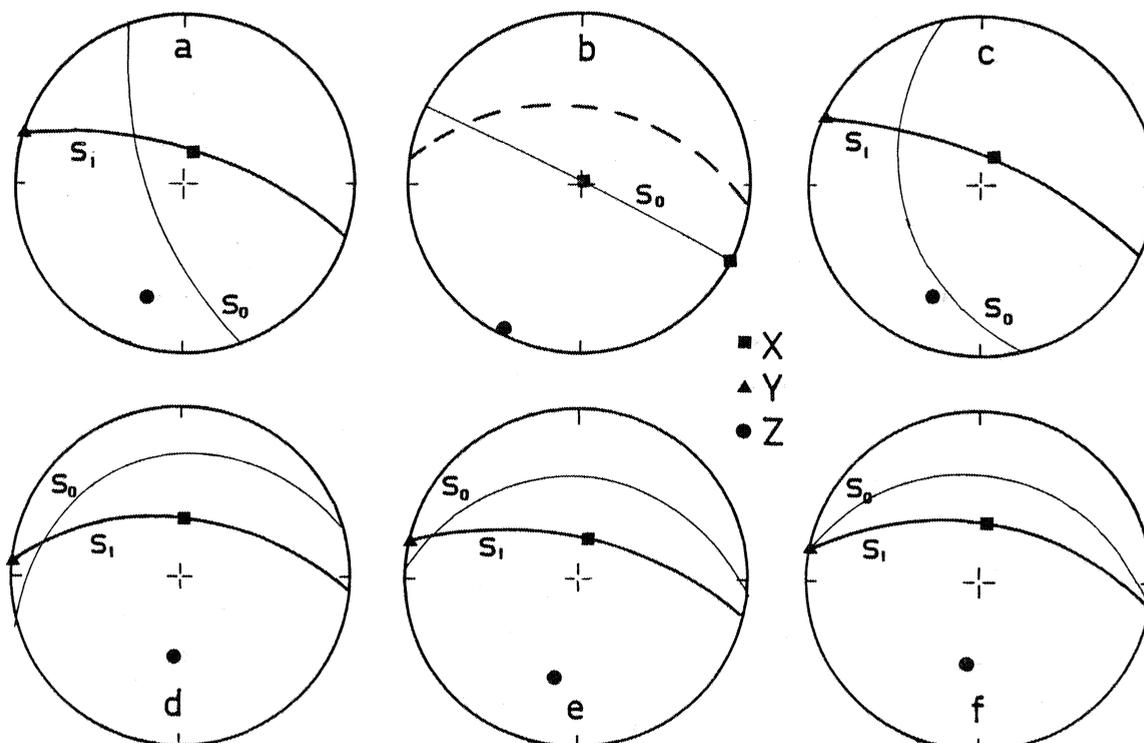


Fig. 71 : Projections stéréographiques des directions structurales moyennes pour chaque site. S_0 : Stratification ; S_1 : schistosité. Pointillé site B : plan de schistosité de fracture.

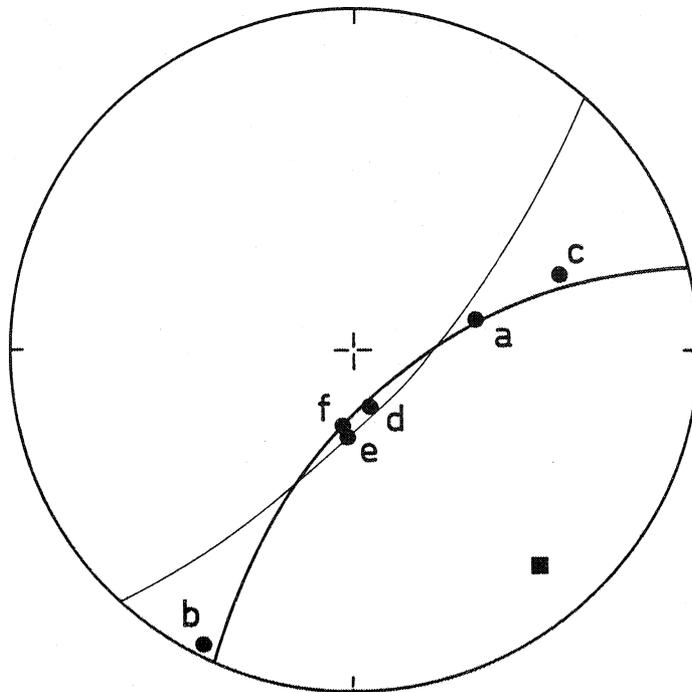


Fig. 72. - Pôles moyens de stratification des sites A à F. Trait fin ; meilleur plan obtenu par la méthode des grands cercles ($Q > 3,10^{-3}$)
 Trait fort : meilleur petit cercle définissant le cône d'axe (carré) $D = 140.0$ $I = 10.0$

IV - ETUDE PALEOMAGNETIQUE.

1. A R N

Les 127 échantillons de cette étude ont été soumis à un test de viscosité courte période. L'histogramme des coefficients de viscosité (Fig. 73b) est comparable à ceux des études précédentes avec une viscosité inférieure à 20% pour plus de 90% des échantillons. Par contre les intensités (Fig. 73a) sont beaucoup plus faibles, généralement comprises entre 10^{-2} et 10^{-3} A/m.

Les directions présentent une forte dispersion autant In Situ (Fig. 73c) qu'après correction de pendage (Fig. 73d). Pour les directions In Situ on peut remarquer l'allongement du nuage de points vers une direction Nord fortement inclinée vers le bas caractéristique d'un champ récent. Cette tendance disparaît après correction de pendage. Il est donc probable que des réaimantations post-tectoniques sont, au moins pour partie, responsable de cette dispersion.

L'analyse de la rémanence naturelle de ces échantillons au moyen des techniques de désaimantation a donc été entreprise pour tester cette hypothèse et tenter de retrouver la composante anté-tectonique.

L'analyse paléomagnétique a fait apparaître des différences de comportement marquées entre le site B constitué de grès fins ne présentant pas de déformation interne, d'une part, et l'ensemble des sites échantillonnés dans les schistes, d'autre part. En effet, si ces derniers donnent des résultats souvent délicats à interpréter, ce n'est pas le cas du site B dont les échantillons présentent un comportement simple. Pour cette raison l'analyse paléomagnétique du site B sera décrite séparément.

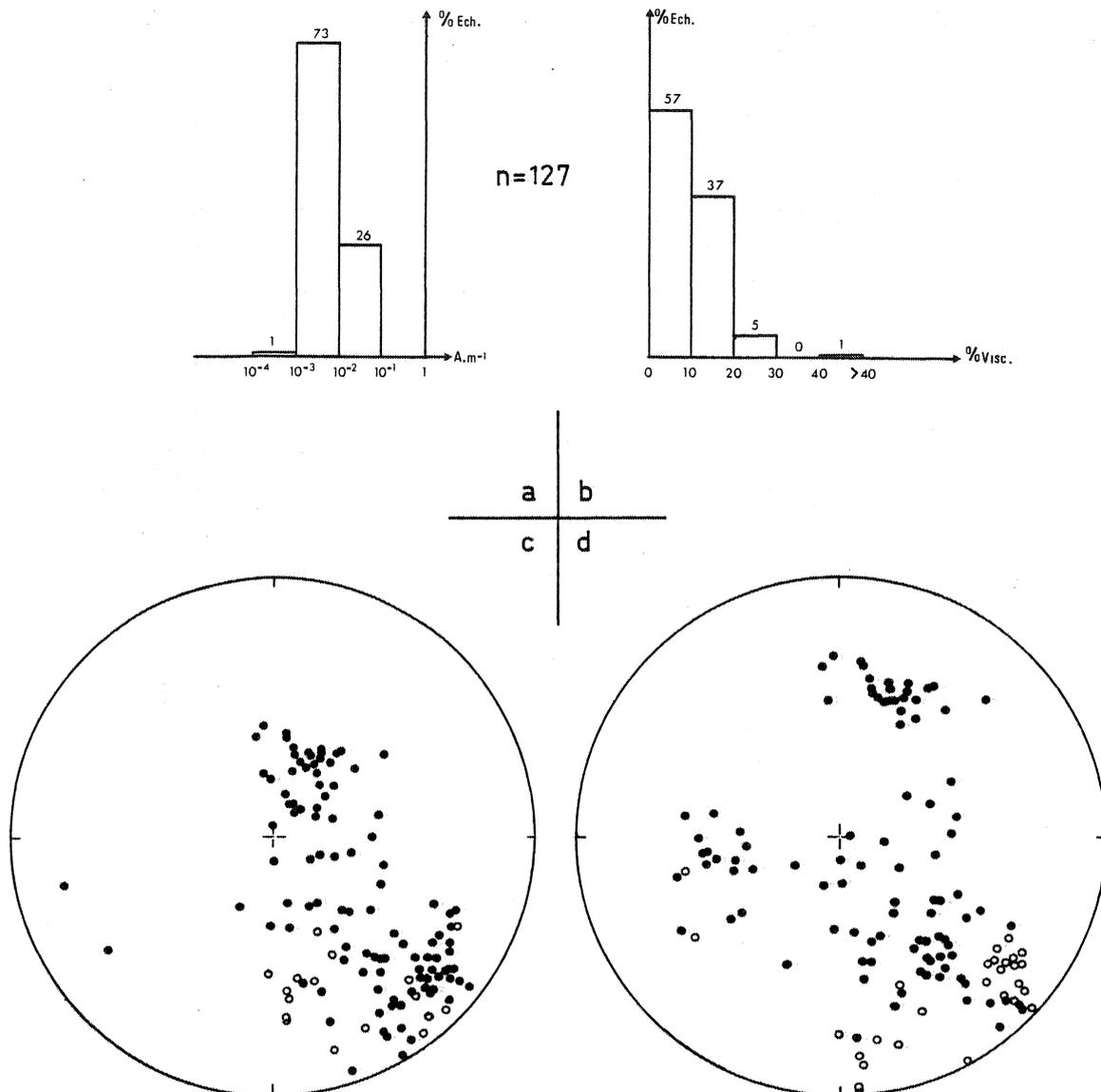


Fig. 73 - ARN (a) : histogramme des intensités d'aimantation ;
 (b) : histogramme des pourcentages de viscosité ;
 (c) : directions de l'ARN In Situ ; (d) : après correction de pendage.

2. Le site B.

a. Désaimantations comportement magnétique.

Les désaimantations entreprises sur les échantillons de ce site montrent un comportement univectoriel de l'aimantation. Ceci se traduit, en diagramme orthogonal de Zijderveld, par l'allure linéaire des courbes de désaimantation (Fig. 74) avec une décroissance régulière vers l'origine, et ceci aussi bien en désaimantation thermique qu'en désaimantation chimique.

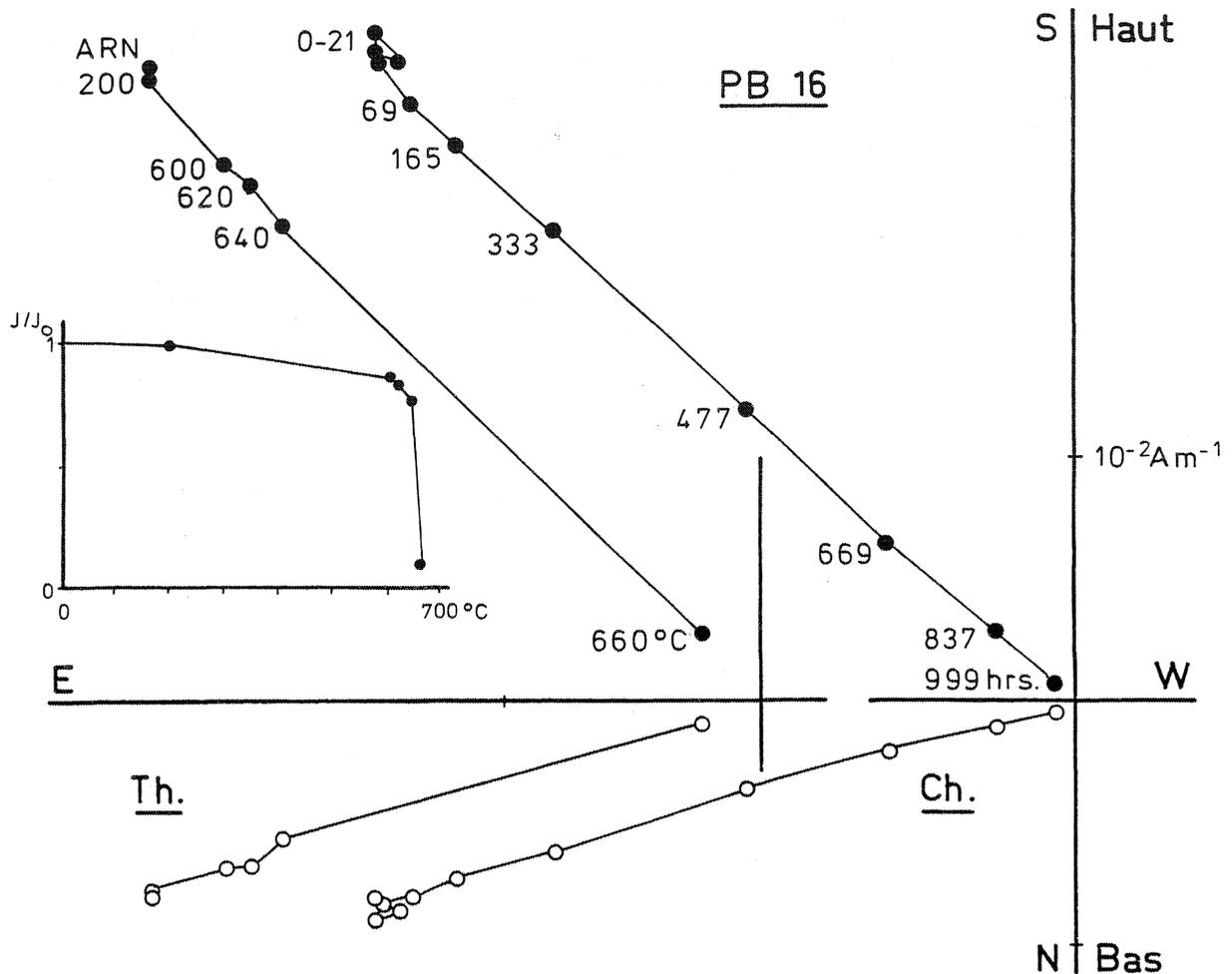


Fig. 74 - Courbes de désaimantation en diagramme de Zijderveld (1967) de deux spécimens de l'échantillon PB 16. Th : thermique (températures indiquées en °C) ; Ch : chimique (temps cumulés de lessivage indiqués en heures). Diagramme de l'évolution de l'intensité normalisée en fonction de la température.

Les courbes d'évolution de l'intensité normalisée en fonction de la température (Fig. 74) montrent une température de déblocage très élevée, entre 640 et 660°C, proche du point de Curie de l'hématite.

Des acquisitions d'ARI ont été effectuées sur un couple de spécimens d'une même carotte lessivé et non lessivé à l'HCl. Alors que le spécimen non attaqué montre une courbe d'acquisition normalisée (Fig. 75a) et un spectre de coercivité (Fig. 75c) typique des séries rouges avec un maximum d'acquisition aux alentours de 0.3 - 0.6 T, l'attaque chimique met en évidence une phase de coercivité inférieure à 0.1 T. La phase dissoute par l'acide, de coercivité élevée est constituée d'hématite pigment et porte plus de 95% de l'aimantation acquise à 1.25 T (Fig. 75b). En conséquence, les minéraux de coercivité inférieure à 0.1 T mis en évidence par lessivage ne participent probablement pas de manière significative à la rémanence totale de l'échantillon. Ceci est confirmé par le fait que soumis à un champs alternatif de 1000 Oersteds, l'intensité de la rémanence de ce type d'échantillon ne présente strictement aucune décroissance.

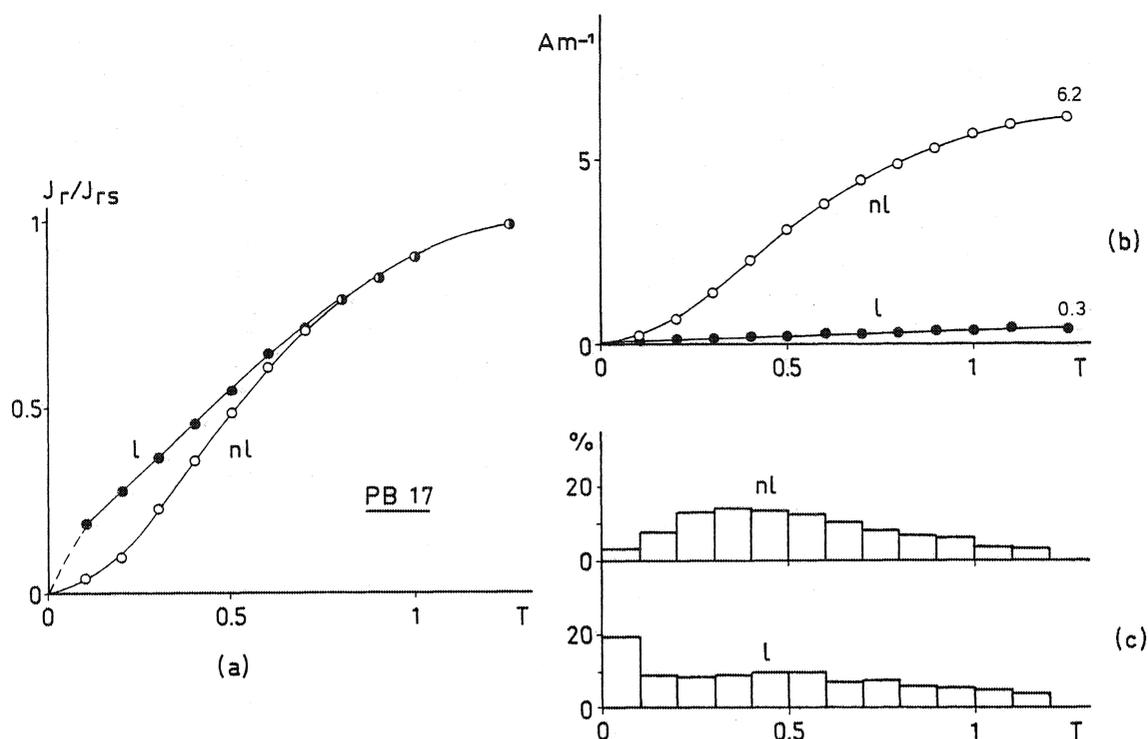


Fig. 75 - Acquisition d'ARI d'un specimen lessivé (l) et non lessivé (nl) de l'échantillon PB 17. (a) : Intensité normalisée ; (b) : intensité absolue, les chiffres en fin de courbes donnent cette intensité en A/m pour un champs de $1.25 T$; (c) Spectres de coercivité.

b. Résultats

Les directions obtenues sur ce site sont bien groupées ; d'autre part, les populations obtenues par désaimantations thermiques et chimiques ne sont pas différenciables (Fig. 76a). La direction moyenne In Situ est :

$$D = 125.5 \quad I = 13.0 \quad k = 118 \quad \alpha_{95} = 4.5 \quad (n = 10)$$

Deux types de correction de pendage ont été effectués sur cette direction :

* D'une part, la correction de pendage classique, par rotation autour de l'horizontale de S_0 , d'un angle égal au pendage du plan. La direction d'aimantation ainsi corrigée est (CP1 sur la Figure 76b) :

$$D = 130.5 \quad I = -8.0$$

* D'autre part, la correction de pendage a été faite en tenant compte de la forme conique du pli déterminée sur cet affleurement. L'algorithme utilisé est le suivant : le plan défini par l'axe du cône et la normale à S_0 au lieu considéré est ramené à la verticale par rotation autour de l'axe du cône ; puis le pôle de S_0 est ramené à la verticale par rotation autour d'un axe horizontal perpendiculaire à l'axe du cône. Il est à noter que la correction de pendage classique s'inscrit comme un cas particulier de cet algorithme où :

- l'angle d'ouverture du cône est de 0° (pli cylindrique) et dans ce cas l'angle entre l'axe et le pôle de S_0 est de 90° .

- l'axe de ce "cône" est horizontal.

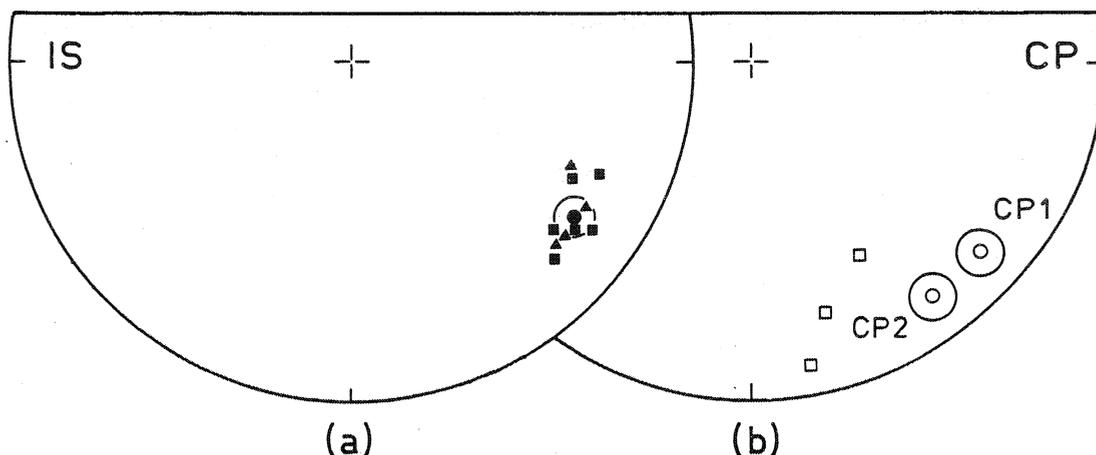


Fig. 76 - Site B - Directions d'aimantation caractéristique après désaimantation (a) In Situ ; triangles : désaimantations thermiques ; carrés : désaimantations chimiques ; rond : moyenne avec son cercle de confiance. (b) : Après correction de pendage CP1 : classique, CP2 : pli conique ; carrés : directions permo triassiques ibériques d'après les pôles publiés par Zijdeveld et Van der Voo (1971) (Voir tableau en annexe)

La direction moyenne du site B après cette correction de pendage est (CP2 sur la Figure 76b) :

$$D = 143.0 \quad I = -8.0$$

La comparaison des directions obtenues par ces deux méthodes mène à deux remarques :

- La différence de déclinaison, de $12,5^\circ$, est significative, compte tenu de l'ouverture du cercle de confiance.

- Cette procédure conduit à diminuer l'écart en déclinaison entre la direction moyenne du site B et les direction recalculées pour le lieu du Somport (42.8 N , 0.5 W) d'après les trois pôles permo-triasiques de la plaque Ibérie compilés par Zijdeveld et Van der Voo (1971) (Fig. 76b).

Ces remarques ne constituent cependant pas une réelle validation de cet algorithme de déplissement dans la mesure où l'on ne travaille que sur un seul site. L'existence de données réparties sur l'ensemble du pli est en effet nécessaire pour que des tests statistiques puissent être effectués, à la manière du test de déplissement de Graham (1949).

c. Discussion

L'analyse paléomagnétique des échantillons de ce site permet de mettre en évidence une composante d'aimantation unique, principalement portée par de l'hématite pigment et donc d'origine chimique (ARC).

Après correction de pendage, en tenant compte de la forme conique du pli, on obtient une direction compatible avec les directions permo-triasiques de la plaque Ibérie. Bien que la déclinaison déterminée sur ce site soit inférieure à celles des trois directions de référence, on peut considérer ce résultat comme satisfaisant compte tenu que, d'une part, cette étude ne porte que sur un seul site et, d'autre part, il s'agit d'une série régionalement très déformée où des composantes de rotations dans le plan horizontal peuvent ne pas être retrouvées.

3. Les autres sites

a. Désaimantations - comportement magnétique.

Désaimantations thermiques.

20 spécimens (4 par site) ont été soumis à des désaimantations thermiques par paliers. Tous ces spécimens ont subi des modifications minéralogiques en cours de chauffe provoquant l'acquisition d'une aimantation parasite à partir de 550-600°C, d'intensité supérieure à l'intensité de départ. Deux exemples-typiques de ce comportement sont illustrés Figure 77.

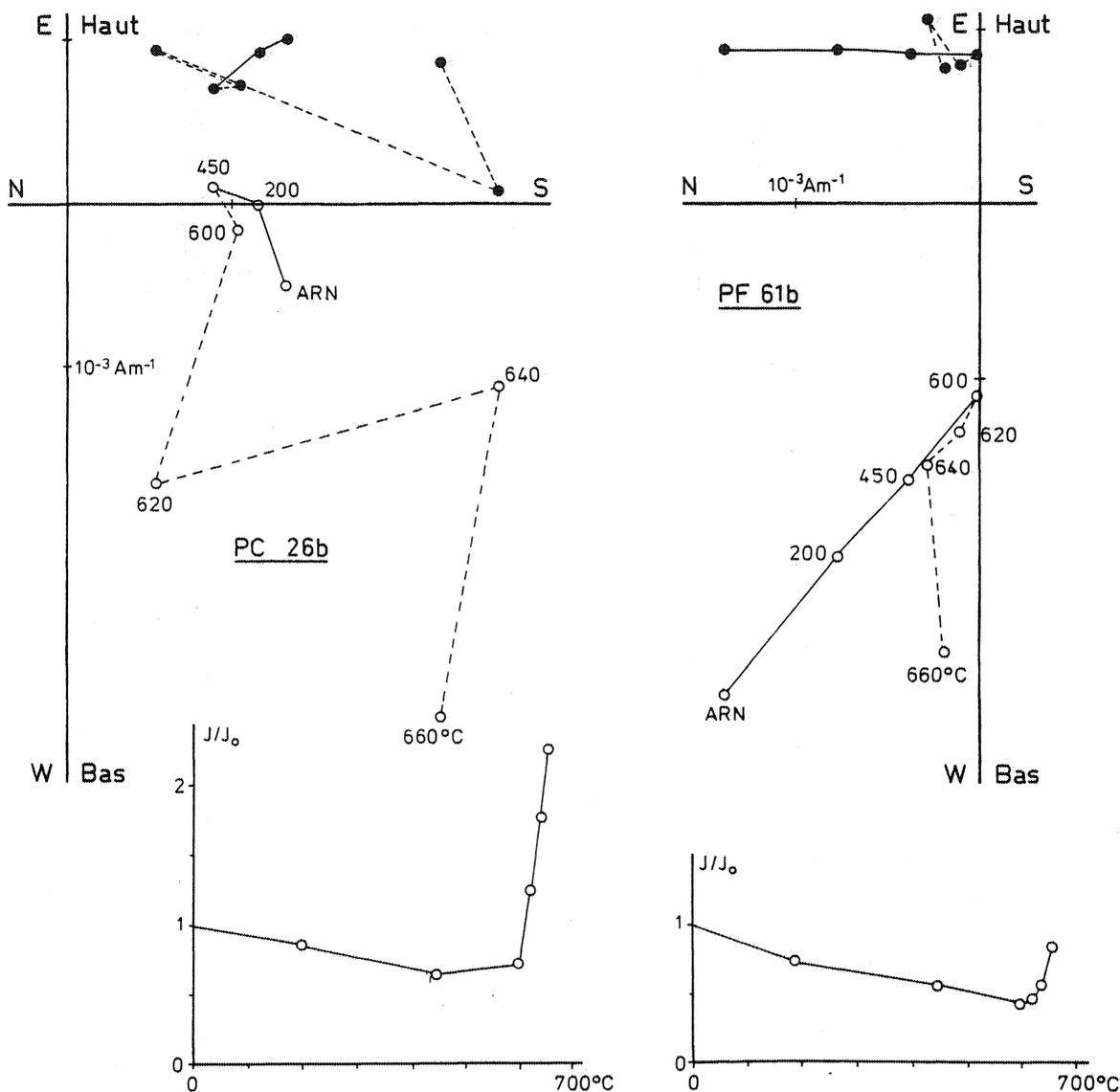


Fig. 77 - Désaimantations thermiques : diagrammes de Zijderveld et $J/J_0 = f(T^\circ)$
En pointillé partie non exploitable des courbes.

Des acquisitions d'ARI effectuées sur ces deux échantillons, après chauffage à 660°C, donnent des résultats similaires à ce qui a été décrit pour les échantillons des Alpes de comportement identique à la chauffe (Fig. 78): mise en évidence d'une phase de coercivité inférieure à 0.1 T, probablement magnétite, absente dans les échantillons frais (courbe type en trait fin sur la figure 78).

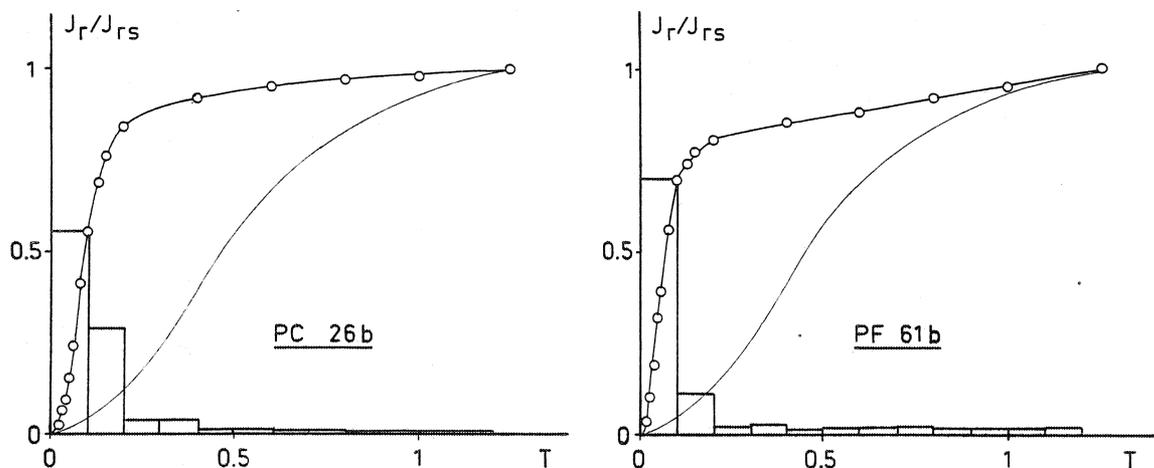


Fig. 78 - Acquisition d'ARI des échantillons de la Fig. 77 (chauffés à 660°C) : courbes intensité normalisée en fonction du champ (en Teslas) et spectre de coercivité. En trait fin : courbe caractéristique d'un échantillon frais (d'après fig. 81 éch. 44 nl)

De plus, il n'est généralement pas possible de déterminer une composante stable aux températures inférieures, la résultante mesurée à chaque étape montrant une évolution constante jusqu'à ce que se produisent les modifications décrites ci-dessus.

Désaimantations chimiques

Les désaimantations chimiques effectuées sur ces schistes n'ont pas permis, dans la majorité des cas, d'isoler une composante d'aimantation caractéristique stable. Les trois exemples de la Figure 79 illustrent le comportement typique de l'aimantation de ces échantillons, qui montre une évolution constante en déclinaison et inclinaison, jusqu'à des intensités à la limite de sensibilité du magnétomètre. Il est donc probable que l'on a au moins deux composantes d'aimantation portées par un même type de minéraux magnétiques et que l'attaque par l'acide est impuissante à séparer.

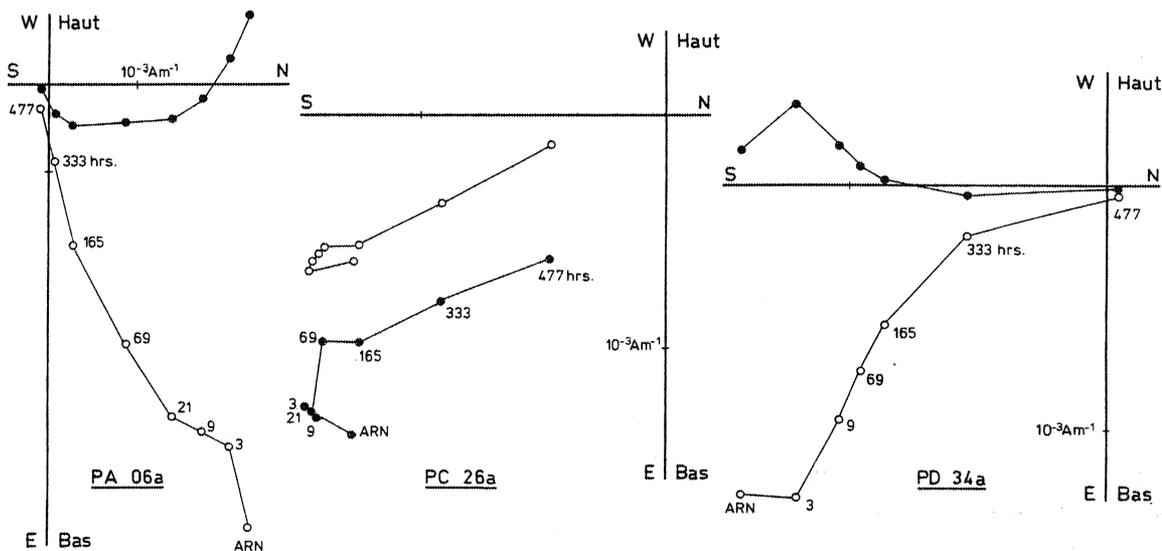


Fig. 79 - Désaimantations chimiques en diagramme de Zijderveld. Les temps cumulés d'attaque sont indiqués en heures.

Minéralogie magnétique.

Des courbes thermomagnétiques pour la détermination du point de Curie ont été obtenues à la balance de Curie pour un échantillon de chacun des sites. Ces courbes sont similaires pour tous les échantillons et seuls deux exemples sont illustrés Figure 80. Deux remarques sont à faire sur l'acquisition de ces courbes d'une part, la courbe de chauffe est obtenue point par point, du fait des pertes de poids, comme il a été noté en première partie. Après retarage de la balance à haute température, la courbe de refroidissement est enregistrée en continu. D'autre part, et pour des raisons techniques, la régulation électronique de vitesse de chauffe ($8^{\circ}\text{C}/\text{mm}$) ne débute qu'à 240°C et de ce fait, le début de la courbe de chauffe (non représentée ici) est entachée d'une erreur due à l'inertie thermique de l'échantillon (température du thermocouple d'enregistrement supérieure à celle de l'échantillon). Par contre, le refroidissement sans régulation de 240°C à la température ambiante se fait suffisamment lentement pour obtenir cette partie de la courbe.

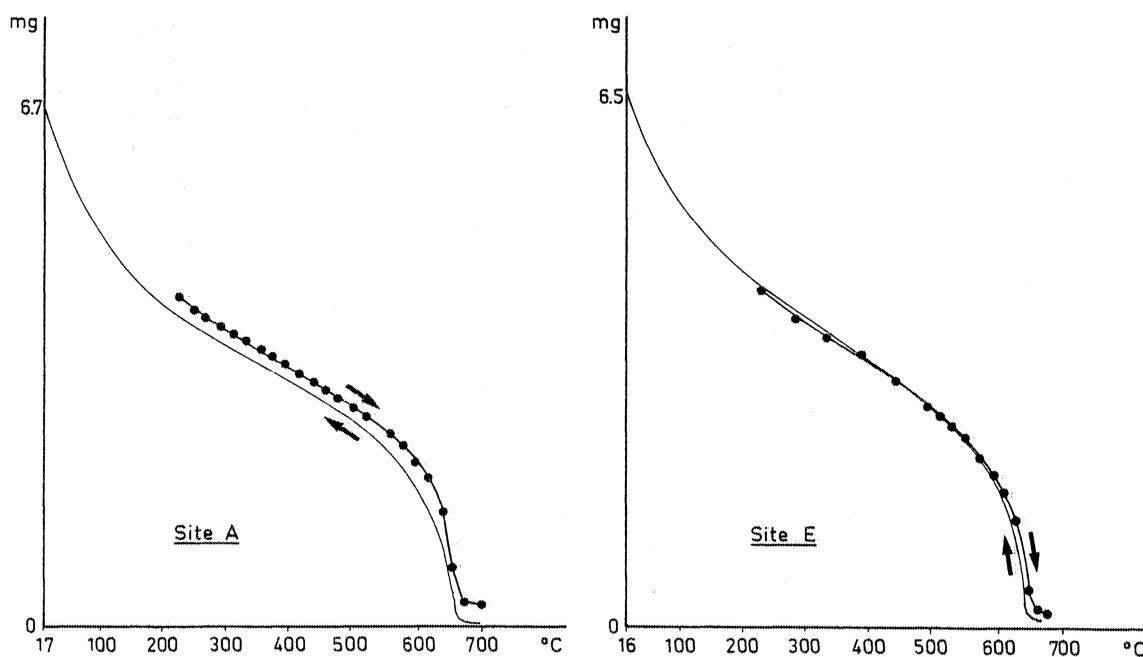


Fig. 80 - Courbes thermomagnétiques obtenues à la balance de Curie.
Les flèches indiquent le sens d'évolution. Chauffe : courbe
obtenue point par point après correction des pertes de poids.

Ces courbes ne mettent en évidence qu'une seule famille de minéraux magnétiques, l'hématite, de température de Curie supérieure à 650°C . La faible susceptibilité de l'hématite m'a contraint à travailler en champs fort ($> 0.8 \text{ T}$ au niveau de l'échantillon). De ce fait la concavité de début de courbe ($T < 250^{\circ}\text{C}$) est interprétée comme due à une composante paramagnétique plutôt qu'à la présence de minéraux de faible température de Curie.

Pour compléter cette information, des acquisitions d'ARI ont été effectuées sur des couples d'échantillons d'une même carotte attaqués et non attaqués à l'acide chlorhydrique (Fig. 81). Les courbes obtenues et les spectres de coercivité correspondants sont semblables à ce que l'on a déjà pu observer sur ce type de matériau : des minéraux de forte coercivité, l'hématite pigment, présents dans les échantillons frais tendent à disparaître au cours de l'attaque chimique. Celle-ci fait apparaître, dans les échantillons lessivés, une phase de coercivité inférieure à 0.1 T mais dont la faible contribution à la rémanence totale est .

attestée par les intensités d'aimantation acquise à 1,25 T : dans les deux cas présentés ici, l'hématite pigment porte plus de 98% de l'ARI.

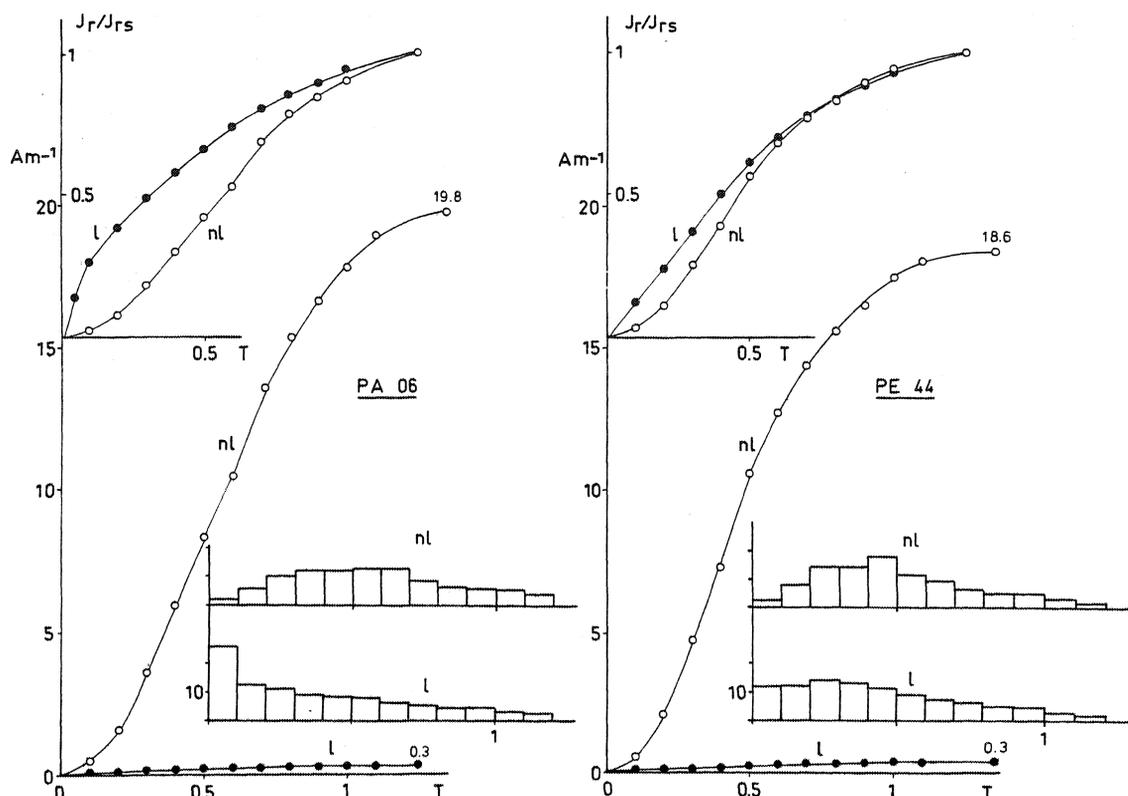


Fig. 81 - Acquisition d'ARI de couples de spécimens lessivés (l) et non lessivés (nl) d'une même carotte. En haut : Intensité normalisée, en bas : intensité absolue ; histogramme : spectre de coercivité.

Les désaimantations thermiques et chimiques ainsi que les courbes thermomagnétiques et les acquisitions d'ARI montrent que l'on a ici présence d'au moins deux composantes d'aimantation portées par un seul type de minéral, l'hématite pigment. Cela explique donc que l'on ne puisse pas séparer ces composantes dont les porteurs possèdent des spectres de température de déblocage et de solubilité superposés.

b. Résultats. Interprétation

Si les résultats obtenus sur ces séries rouges s'avèrent négatifs dans l'optique de ce travail, dont le premier point est de retrouver une aimantation antétectonique, il est cependant possible d'interpréter globalement l'ensemble des données.

Reportées en projections stéréographiques en coordonnées In Situ les directions d'aimantation montrent, au fur et à mesure de la désaimantation, une convergence vers la déclinaison SE caractéristique du Permien de l'Espagne, en s'éloignant des directions normale ou inverse d'un champ récent. Ce comportement est particulièrement bien illustré par les données du site F (Fig. 82) où l'on peut également constater l'identité du sens de l'évolution de l'aimantation en désaimantation thermique et chimique. Les exemples présentés ici montrent la prédominance de la composante de réaimantation récente et c'est également le cas pour le site A. Pour les trois autres sites (C, D et E) le point de

départ de l'évolution du vecteur aimantation se situe en position intermédiaire mais cette évolution se fait toujours vers le S à SE.

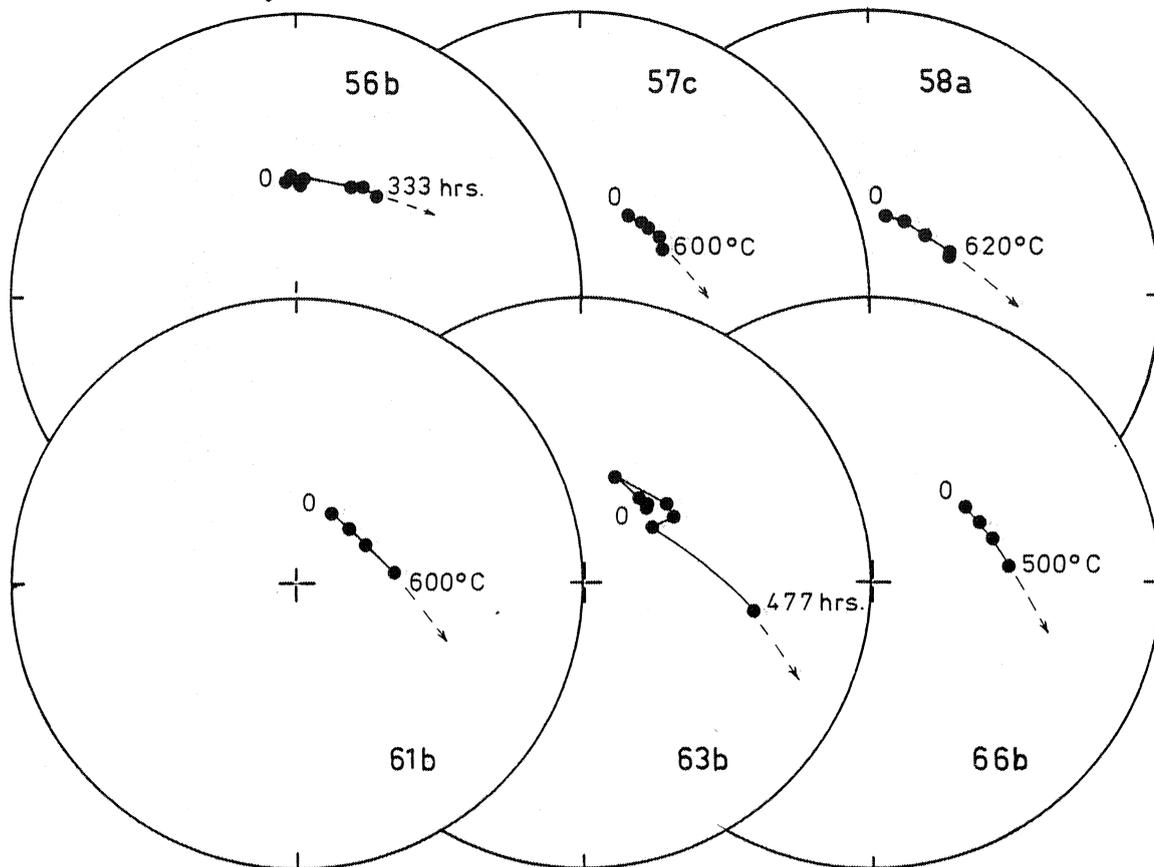


Fig. 82 - Projection stéréographique In Situ de l'évolution du vecteur aimantation en cours de désaimantations thermiques ou chimiques de quelques échantillons du site F. Les premiers et derniers points sont indiqués en °C ou en heures.

La contribution de cette réaimantation à la rémanence totale est donc d'importance variable et est reflétée par ailleurs par la distribution des directions d'ARN In Situ (Fig. 73c), étalée depuis le Nord vers le Sud Est. Les plans de réaimantation définis pour chacun des échantillons sont représentés site par site Figure 83 en coordonnées In Situ.

Le cas idéal où, pour un ensemble de sites de positions structurales différentes, des plans de réaimantations sont définis par une composante anté-tectonique et une composante post-tectonique, voudrait que l'intersection In Situ de ces plans permette de retrouver la composante post-tectonique, et après correction de pendage, la composante primaire. Ce n'est pas le cas ici (Fig. 84), où malgré la tendance décrite ci-dessus il n'est pas possible de définir une bonne intersection des plans moyens de chaque site (définis par statistique de Fisher sur les normales aux plans de réaimantation des échantillons), ni avant (IS) ni après correction de pendage classique (CP1) ou en tenant compte de la forme conique du plissement (CP2). A cela, plusieurs explications possibles :

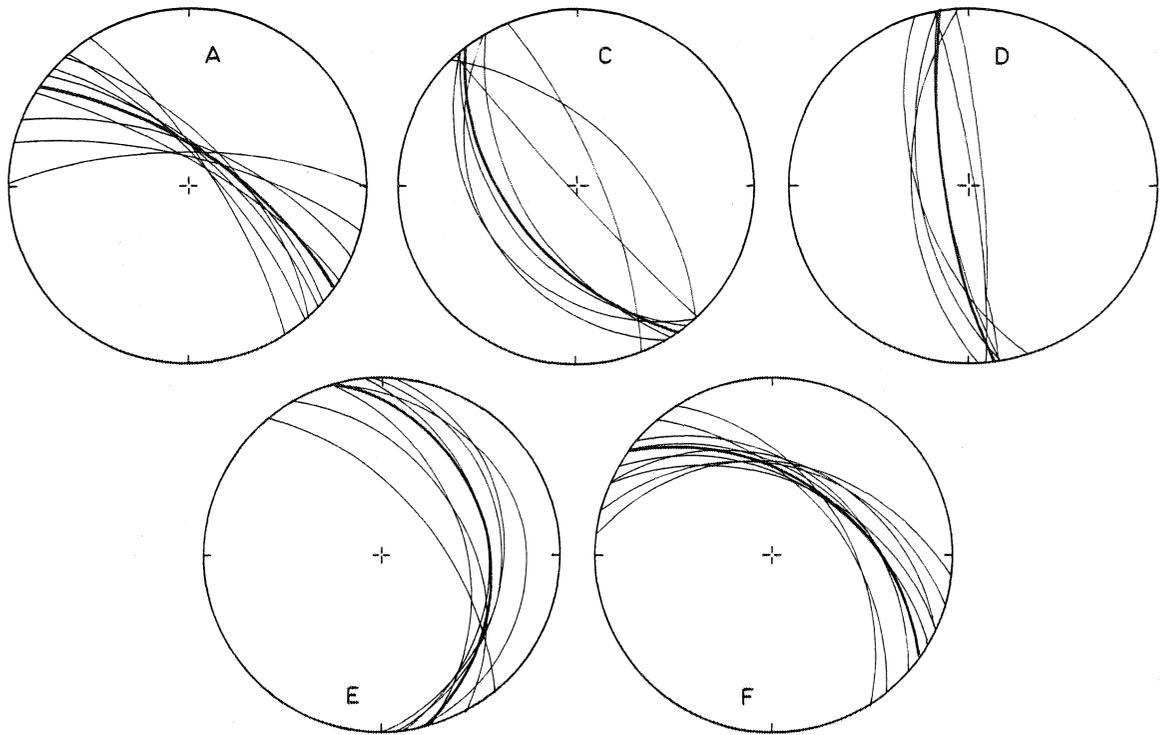


Fig. 83 - Projections stéréographiques In Situ des plans déterminés par l'évolution de l'aimantation en cours de désaimantation pour tous les spécimens traités. En trait gras : plan moyen pour chaque site.

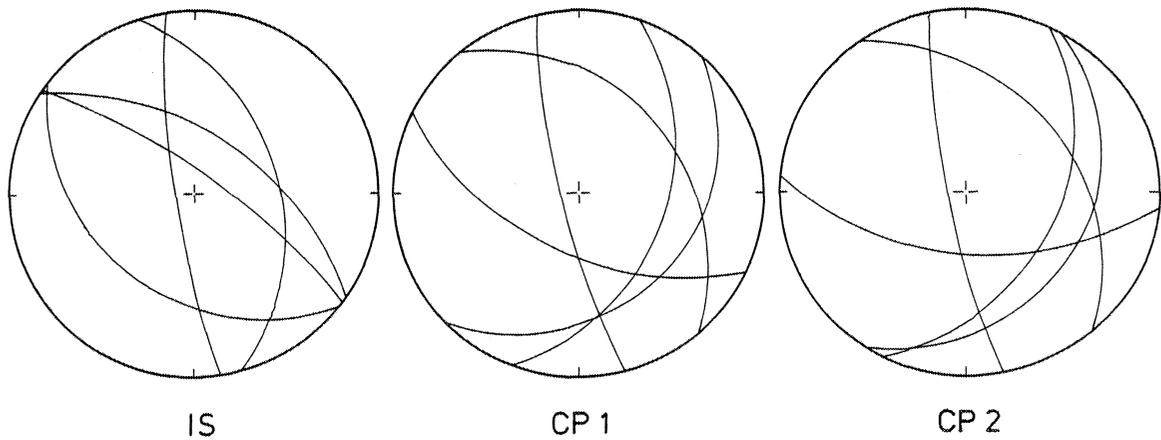


Fig. 84 - Plans de réaimantation moyens des 5 sites. IS : In Situ ; CP1 : après correction de pendage classique ; CP2 : en tenant compte de la forme conique du pli.

* In Situ : la réaimantation secondaire est en partie syntectonique, sa direction actuelle est donc différente d'un site à l'autre ; plus probablement, la réaimantation, même post-tectonique, est déviée du fait de la forte anisotropie de la roche déformée vers le plan de schistosité par rapport à la direction de champ externe réelle, comme cela a été décrit dans d'autres cas par Rochette (1983). Ceci est confirmé par les données des sites A et F où l'on peut isoler les composantes secondaires qui présentent une bonne homogénéité à l'échelle du site (Fig. 85). On constate, pour ces deux sites, que la direction d'aimantation moyenne est quasiment confondue avec l'axe d'allongement maximum X de la déformation finie dans le plan de schistosité.

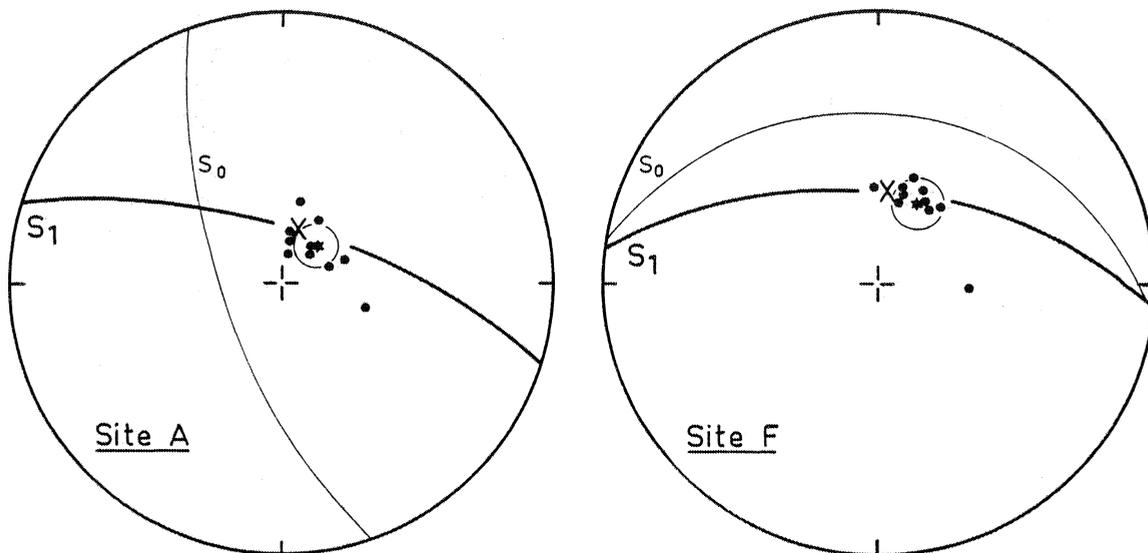


Fig. 85 - Directions d'aimantation caractéristique In Situ (ronds) et leur moyenne (étoile) avec le cercle de confiance comparées aux directions structurales. S_0 : Stratifications ; S_1 : Schistosité ; X : Axe d'allongement de la déformation finie.

* Après correction de pendage (Fig. 84 CP1 ; CP2) : bien que la persistance d'une composante d'aimantation à affinité permienne soit attestée par le comportement global du vecteur aimantation en cours de désaimantation, la mauvaise intersection des plans de réaimantation moyens ne permet pas de retrouver une direction unique bien définie à l'échelle de la série. Compte tenu de l'état de déformation de ces séries rouges et de ce qui a été décrit sur l'effet de la déformation sur l'orientation de l'aimantation anté-tectonique dans les Alpes Maritimes, il est raisonnable d'interpréter cette mauvaise intersection comme reflétant une dispersion intersite des directions d'aimantation primaire, due à un effet de déformation interne. N'étant pas en mesure de retrouver la direction caractéristique primaire de chaque site, il nous est impossible d'aller plus loin dans cette interprétation.

V - CONCLUSION.

L'analyse paléomagnétique de ces schistes rouges n'a donc pas permis d'isoler une composante d'aimantation anté-tectonique bien qu'il existe des arguments pour dire que celle-ci n'a pas été entièrement effacée par la réaimantation secondaire. De ce fait, l'hypothèse d'un comportement passif du vecteur aimantation au cours de la déformation n'a pu être testée ici.

Cependant, les résultats obtenus sur le banc gréseux sans déformation interne apparente du site B permettent de tirer deux conclusions importantes :

- Sur le plan local : la direction d'aimantation moyenne déterminée sur ce site est compatible avec les directions permotriassiques de la plaque espagnole ; ceci confirme que ces séries ont acquis une rémanence antétectonique dont l'analyse magnétique montre l'origine chimique.

- Sur un plan plus général : la présence de ce type de banc gréseux sans déformation interne au sein d'une série régionalement très déformée met en évidence la possibilité d'effectuer des études paléomagnétiques sur de telles séries si l'étude structurale détaillée permet de trouver des "zones abritées" de la déformation, comme c'est le cas ici.

CHAPITRE IV - LES ORIENTATIONS PRÉFÉRENTIELLES DE RÉSEAU DE L'HÉMATITE.

De l'étude des relations entre direction d'aimantation antétectonique et déformation dans les trois exemples présentés aux chapitres précédents, on retiendra essentiellement les trois points suivants :

- Lorsque les techniques d'analyse paléomagnétique permettent d'isoler une direction d'aimantation stable pouvant être interprétée comme primaire (dans le cas présent, antétectonique), on constate une importante déviation de celle-ci dans les séries déformées.

- Cette déviation se fait toujours d'une manière cohérente, et à toutes les échelles (du spécimen au site), depuis l'axe de raccourcissement vers le plan XY (schistosité). La comparaison d'éléments tels que groupement intrasite et intensité de la déformation interne, par exemple, permet en outre de montrer que la déviation devient plus importante au fur et à mesure que la déformation augmente.

- La déformation inverse effectuée sur chacune des directions améliore significativement des dispersions intra et intersites, et les directions moyennes obtenues et contrôlées, sont régionalement correctes.

Ces observations m'ont conduit à conclure que le comportement du vecteur aimantation rémanente antétectonique s'apparente à celui d'une ligne passive au cours de la déformation. L'étape suivante de ce travail consiste donc à tenter d'expliquer les résultats, en particulier par l'étude directe du comportement de l'hématite au cours de la déformation.

Cette approche a été effectuée par étude des orientations préférentielles de réseau de l'hématite par goniométrie de texture sur les échantillons des Alpes-Maritimes. Cette série se prête en effet particulièrement bien à ce type d'étude du fait de l'existence d'un gradient régional de déformation ; les sites échantillonnés présentant des états de déformation croissants, les variations d'orientation préférentielles des cristaux d'hématite doivent pouvoir être suivies.

1. Rappels.

- *Principe.*

Un faisceau de rayons X tombant sur un cristal est diffracté par une famille de plans réticulaires, hkl, si la loi de Bragg est vérifiée :

$$n \lambda = 2 d_{(hkl)} \sin \theta$$

- ou :
- λ est la longueur d'onde du faisceau incident.
 - $d_{(hkl)}$ est la distance interréticulaire des plans (hkl) diffractants
 - θ est l'angle de Bragg (ou angle d'incidence).

Dans un agrégat polycristallin, pour un angle θ donné, λ étant par ailleurs fixée, à chaque position de l'échantillon par rapport au faisceau incident correspondra une population de grains en position de Bragg et l'intensité diffractée sera proportionnelle au nombre de grains dans cette position. En mesurant les variations de l'intensité diffractée pour toutes les orientations de l'échantillon dans l'espace, on obtient donc une image qualitative et quantitative des orientations préférentielles de réseau dans l'agrégat.

- *Technique et appareillage*

Le type d'appareil et les techniques d'acquisition, de traitement et de représentation des données utilisés à Rennes ont été mis au point et décrits par Le Corre (1978) et Gapais (1979) et on se reportera à ces ouvrages pour plus de détails.

Il reste cependant utile de préciser ici quelques points :

* La technique utilisée ici est la technique par réflexion (l'autre technique possible étant celle par transmission, voir par ex : Siddans, 1976) où l'échantillon se présente sous la forme d'une pastille polie de quelques millimètres d'épaisseur (\varnothing 30 mm).

* L'exploration spatiale de l'échantillon se fait par trois mouvements simultanés de celui-ci (Fig. 86) une translation le long de l'axe OX, une rotation β de l'échantillon autour de sa normale OZ et une rotation plus lente ϕ (2.5° , 5° ou 10° pour $\beta = 360^\circ$) autour de l'axe OY compris dans le plan de l'échantillon et le plan formé par les rayons incidents et diffractés. Bien que l'exploration de la sphère soit théoriquement possible, des problèmes de défocalisation progressive du faisceau RX au cours de la rotation ϕ font qu'au delà de $\phi = 70^\circ$ la perte d'énergie est telle que les intensités mesurées n'ont plus de signification.

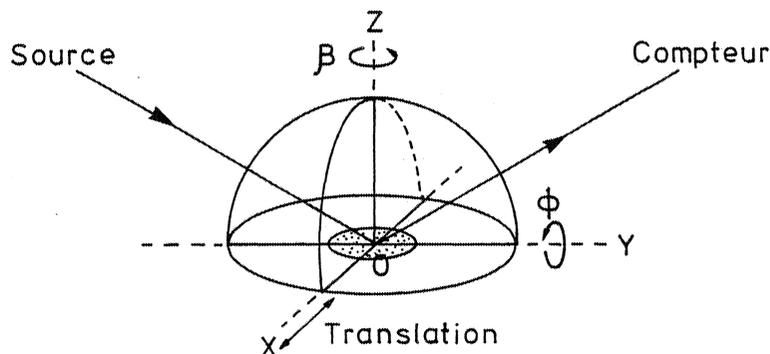


Fig. 86 - Géométrie de la chambre de texture dans le mode de réflexion (d'après Gapais, 1979). L'échantillon (pointillé) est représenté en position initiale, $\phi = 0^\circ$

La zone d'exploration est donc limitée à des angles ϕ de 0 à 70°. Dans le cas de fabriques unimodales intenses il est possible d'enregistrer toute l'énergie diffractée avant d'atteindre l'angle limite de 70°, sinon une extrapolation peut être faite pour la zone 70-90°.

* Représentation des résultats : l'acquisition et le traitement des données aboutit à l'obtention d'une figure de densité des pôles en projection stéréographique qui rend compte de la distribution spatiale des plans étudiés. D'un point de vue quantitatif, la distribution de ces axes cristallographiques est caractérisée par un tenseur d'orientation pondéré (Cobbold et Gapais, 1979), tenseur dont l'ellipsoïde représentatif possède les mêmes propriétés qu'un ellipsoïde de déformation ce qui permet de définir un paramètre de forme (k_f) et d'intensité (r_f) par analogie avec les paramètres de la déformation finie.

- *Données cristallographiques sur l'hématite.*

L'hématite appartient au système hexagonal et présente fréquemment une forme tabulaire selon les plans (001). En diffractométrie X, la raie la plus intense correspond aux axes $\langle 104 \rangle$ (angle de Bragg $\theta = 19.42^\circ$)⁽¹⁾ et par conséquent, ce sont ces axes dont on mesurera les orientations préférentielles par goniométrie de texture. Pour un cristal d'hématite, les 6 axes $\langle 104 \rangle$ se répartissent en cône autour de l'axe C, normale au plan basal (001). Le 1/2 angle d'ouverture de ce cône, calculé d'après les paramètres de réseau de l'hématite, est de 38.84°. Dans une roche ayant des cristaux d'hématite parfaitement orientés suivant leur plan basal, les axes C seront parallèles entre eux et on observera donc une répartition des axes $\langle 104 \rangle$ en cône autour des axes C et de 1/2 angle d'ouverture voisin de 40°.

2. Résultats - Interprétation.

Un échantillon de chacun des 8 sites répartis le long du gradient de déformation des séries rouges des Alpes-Maritimes, a été analysé par goniométrie. Les pastilles ont été taillées parallèlement au plan principal de déformation finie XY, assimilé à la stratification (S_0) pour les sites A et B, et à la schistosité (S_1) pour les autres sites.

Les résultats obtenus (Fig. 87) sont conformes à ce que l'on pouvait attendre et on peut faire les observations suivantes :

- La forme généralisée en couronne de la distribution des axes $\langle 104 \rangle$ traduit l'orientation des plans basaux de l'hématite parallèlement au plan principal de la déformation finie XY.

- En ce qui concerne le site A, on note l'existence d'une texture initiale soulignée par une fabrique assez diffuse parallèle à S_0 .

- Plus intéressants sont les résultats obtenus sur les sites B, C et F qui se situent de part et d'autre du front de schistosité. Deux de ces sites (B et C) montrent un ellipsoïde de déformation de type constriction. Dans le cas du site B (sans schistosité) il existe une fabrique prononcée dans la stratification avec cependant une tendance, marquée par l'allongement de nuages de points, vers un plan virtuel (pointillé sur la fig. 87, site B) perpendiculaire à S_0 , parallèle à la schistosité des stades plus déformés. Pour le site C, on a le même type de figure avec cette fois une orientation préférentielle du plan basal des hématites dans la schistosité, mais avec encore une tendance vers la stratification. En ce qui concerne le site F, la dissymétrie du maximum de pôles indique également une tendance des hématites à se situer en position intermédiaire entre S_0 et S_1 . Bien que la déformation interne soit ici

(1) pour une anticathode au Cobalt.

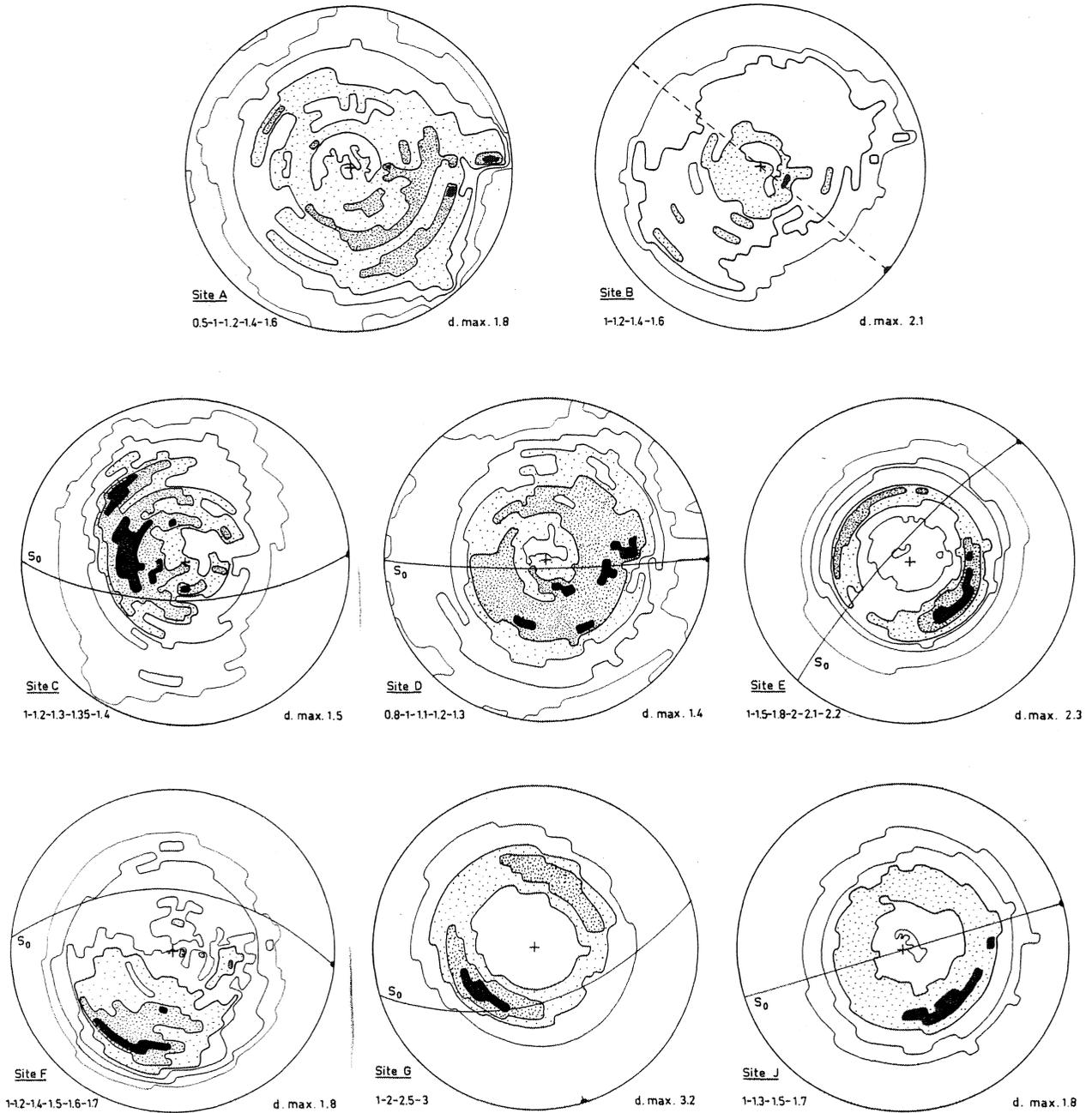


Fig. 87 - Orientations préférentielles des axes $\langle 104 \rangle$ de l'hématite dans les échantillons des Alpes Maritimes. Projection stéréographique dans l'hémisphère supérieur. Densité maximum (d. max.) et contours indiqués en multiples d'une distribution uniforme. Plans d'exploration : Sites A et B : S_0 ; Sites C à G : S_1 .

plus poussée que dans les sites B et C, l'angle relativement faible entre S_0 et S_1 est probablement à l'origine de cette position intermédiaire des plans basaux d'hématite. On a donc là trois exemples de *fabriques intermédiaires* ce qui constitue un argument en faveur de l'hypothèse d'un mécanisme de rotation des hématites durant la déformation.

- Pour les autres sites, les figures d'orientation préférentielle montrent des fabriques en couronnes assez régulières qui soulignent la distribution statistiquement parallèle du plan basal des hématites dans la schistosité

- On peut enfin noter que dans le site G bien que l'angle S_0/S_1 soit semblable à celui du site F, la déformation interne est suffisamment intense pour que l'on ne puisse plus retrouver de tendance à une fabrique intermédiaire.

Du point de vue des intensités de fabrique (r_f), il est possible de mettre en évidence une corrélation positive entre celles-ci et les intensités de déformation finie (r_s) (Fig. 88), au moins pour les cinq sites les plus déformés. Cela signifie que dans les exemples étudiés la fabrique continue à évoluer jusqu'aux stades les plus déformés, ou en d'autres termes, que *la déformation interne contrôle la fabrique de l'hématite*. Ceci appuie la thèse d'un mécanisme de rotation dominant pour les hématites, une importante recristallisation pouvant entraîner une désorientation des réseaux et donc diminuer l'intensité de la fabrique.

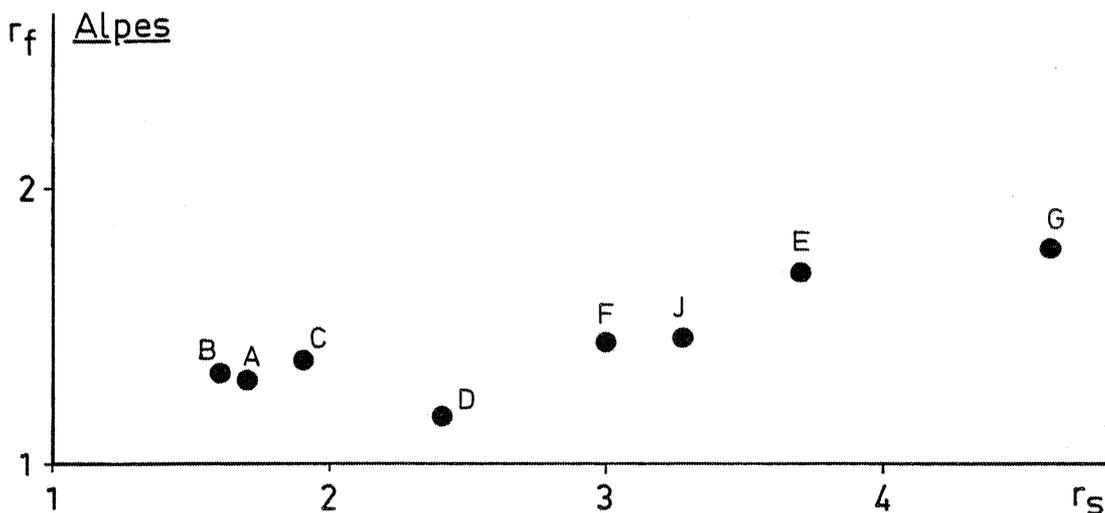


Fig. 88 - Intensité de la fabrique (r_f) en fonction de l'intensité de la déformation finie (r_s) pour les échantillons des Alpes Maritimes.

Ce dernier point est confirmé par les mesures d'orientation préférentielle d'hématite effectuées sur les échantillons du Somport, où l'on sait par ailleurs que d'un point de vue paléomagnétique il existe des recristallisations (aimantation secondaire d'origine chimique dominante). Le diagramme $r_f = f(r_s)$ correspondant (Fig. 89) ne montre, en effet, pas de corrélation nette entre ces deux paramètres pour ces échantillons.

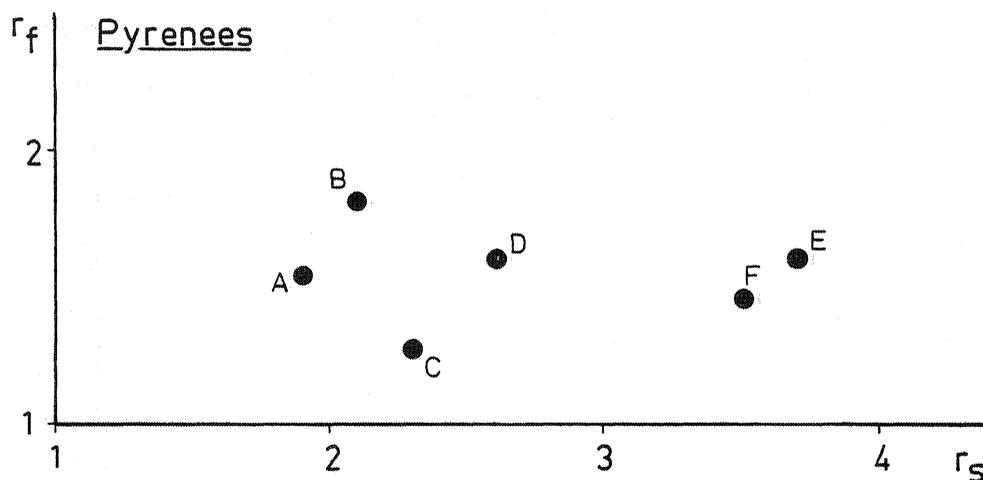


Fig. 89 - Intensité de la fabrique (r_f) en fonction de l'intensité de la déformation finie (r_s) pour les échantillons du Col du Somport.

3. Conclusion.

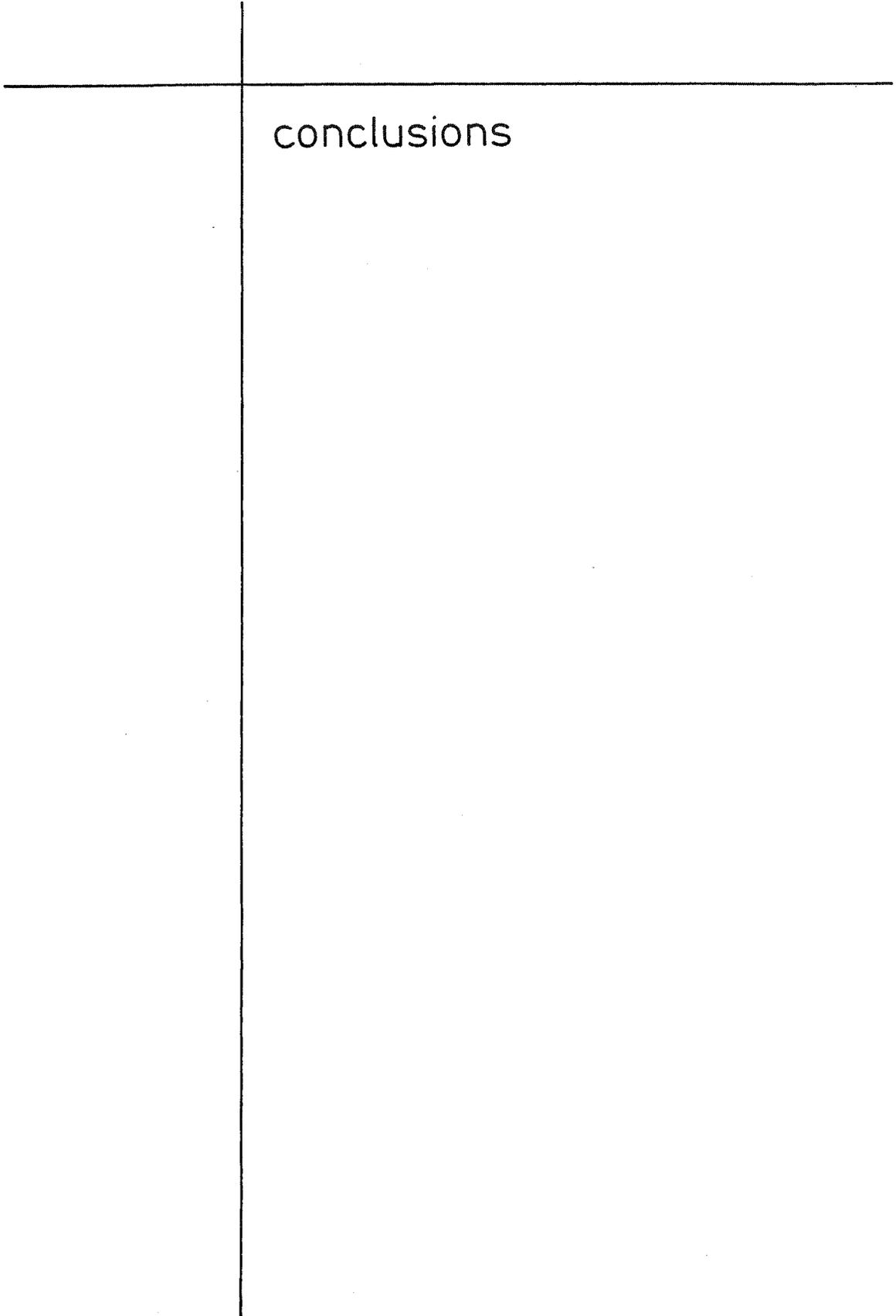
Bien qu'il ait été montré par Siddans (1980) que le mécanisme dominant de déformation dans les séries rouges des Alpes-Maritimes est la cristallisation ou la recristallisation des phyllosilicates, les résultats présentés ici plaident en faveur d'un mécanisme de réorientation du plan basal des minéraux anisométriques d'hématite.

Cette interprétation repose sur les deux observations principales suivantes :

- Existence de fabriques intermédiaires.
- Correlation entre intensité de fabrique et intensité de déformation finie.

Un troisième argument d'ordre paléomagnétique vient corroborer cette interprétation : il n'existe pas de composante d'aimantation secondaire syn ou post tectonique significative, on n'a donc pas de recristallisation importante de grains d'hématite de taille supérieure au volume critique de passage superparamagnétique monodomaine ($\sim 0.1 \mu$: Nagata, 1961).

Il semble donc que l'on puisse effectivement attribuer la déviation du vecteur aimantation rémanente de ces séries rouges à des phénomènes de rotation de grains d'hématite au cours de la déformation interne.



conclusions

CONCLUSIONS.

Cette étude constitue une première approche d'un problème fréquemment posé lors d'études paléomagnétiques en zones orogéniques : de quelle manière se comporte le vecteur aimantation rémanente existant dans une roche si celle-ci subit une déformation interne ? De plus, est-il possible d'appliquer une correction à cette remanence et de retrouver ainsi une direction d'aimantation antétectonique dans les roches déformées ?

La recherche de solutions à ce problème particulier nécessite l'utilisation des méthodologies d'études structurales d'une part, et paléomagnétiques, d'autre part. Il est en effet nécessaire de connaître l'état de déformation des roches étudiées. Pour ce faire, un ellipsoïde moyen de déformation finie a été déterminé sur chacun des sites à l'aide de marqueurs passifs ellipsoïdaux, constitués principalement ici par des taches de réduction de l'hématite pigment des séries rouges. Par ailleurs, l'analyse de l'aimantation rémanente naturelle a été effectuée à l'aide des techniques de désaimantations thermiques et chimiques auxquelles s'ajoutent les méthodes d'analyses vectorielles (Zijderveld, 1967) ou par grands cercles (Halls, 1978) afin de séparer les éventuelles composantes secondaires se superposant à la composante antétectonique recherchée.

Deux séries naturelles ont été étudiées : les séries rouges permo-triasiques pyrénéennes au Col du Somport et les séries rouges permienes des Alpes Maritimes.

PYRENEES : Des réaimantations secondaires syn- ou post-tectoniques d'origine chimique sont dominantes dans ces séries et il n'a pas été possible d'isoler une composante primaire stable dans la majorité des sites. L'effet de la déformation interne sur l'orientation de l'aimantation antétectonique n'a donc pu être apprécié dans cet exemple. Cependant, les résultats positifs obtenus sur un banc gréseux ne présentant pas de déformation interne permettent de faire deux remarques :

- Ces séries ont acquis une aimantation chimique primaire d'âge Permien sup. - Trias inf. compatible avec les données permo-triasiques de la plaque Ibérique. Cette aimantation a ensuite été pratiquement effacée dans les bancs pélitiques par suite de recristallisations probablement importantes au cours du développement de la schistosité.
- L'analyse structurale met en évidence la possibilité de trouver des affleurements sans déformation interne au sein de séries régionalement très déformées, ce qui présente un intérêt certain pour la recherche de sites paléomagnétiquement fiables lors d'études en zones orogéniques.

ALPES-MARITIMES : L'étude des séries rouges permienes des Alpes-Maritimes a été présentée en deux parties : l'une concerne un ensemble de sites situés en différents points du gradient Nord-Sud de déformation finie mis en évidence par Graham (1978), (Cogné, 1982 ; Cogné et al., 1982a, 1982b) ; l'autre partie se réfère à six sites répartis sur les flancs et la charnière d'un pli pluri-décamétrique (Cogné, 1983) situé dans la zone la plus déformée de ces séries rouges. Dans le cas du gradient, les sites montrent un état de déformation croissant avec un axe de raccourcissement généralement proche de la stratification et de la direction moyenne d'aimantation. En ce qui concerne le pli, la déformation interne est quasiment identique d'un site à l'autre avec cette fois-ci des relations angulaires variables entre axes de la déformation et plan de stratification.

Les résultats essentiels obtenus par ces 2 études sont les suivants :

- L'aimantation rémanente chimique acquise par ces roches subit une déviation notable lorsque celles-ci se déforment.

- Il existe une logique dans le sens de cette déviation par rapport aux axes de la déformation que l'on peut schématiquement résumer en deux points principaux : (1) Lorsque l'axe de raccourcissement de la déformation finie est proche de la direction d'aimantation antétectonique théorique il existe une forte dispersion intrasite des directions d'aimantation de chaque échantillon. La direction moyenne à l'échelle du site ne subit pas de déviation significative. On constate une augmentation de la dispersion intrasite avec l'augmentation de l'intensité de la déformation finie. (2) Lorsque l'angle entre direction de raccourcissement et direction d'aimantation théorique croît, la dispersion intrasite est peu affectée mais la direction d'aimantation moyenne du site subit une déviation vers le plan XY de la déformation finie.

- Les dispersions intrasites observées ayant été interprétées comme étant dues à la déformation interne, le calcul de la direction d'aimantation avant déformation à l'aide du tenseur de déformation inverse a été effectué sur la direction caractéristique de chacun des échantillons. Les résultats de cette dédéformation sont positifs à deux niveaux : (1) Dans les cas de fortes dispersions intrasites on observe un regroupement statistiquement significatif des directions d'aimantation. (2) Après déformation inverse du plan de stratification et rotation rigide inverse, le groupement intersite des moyennes est significativement amélioré.

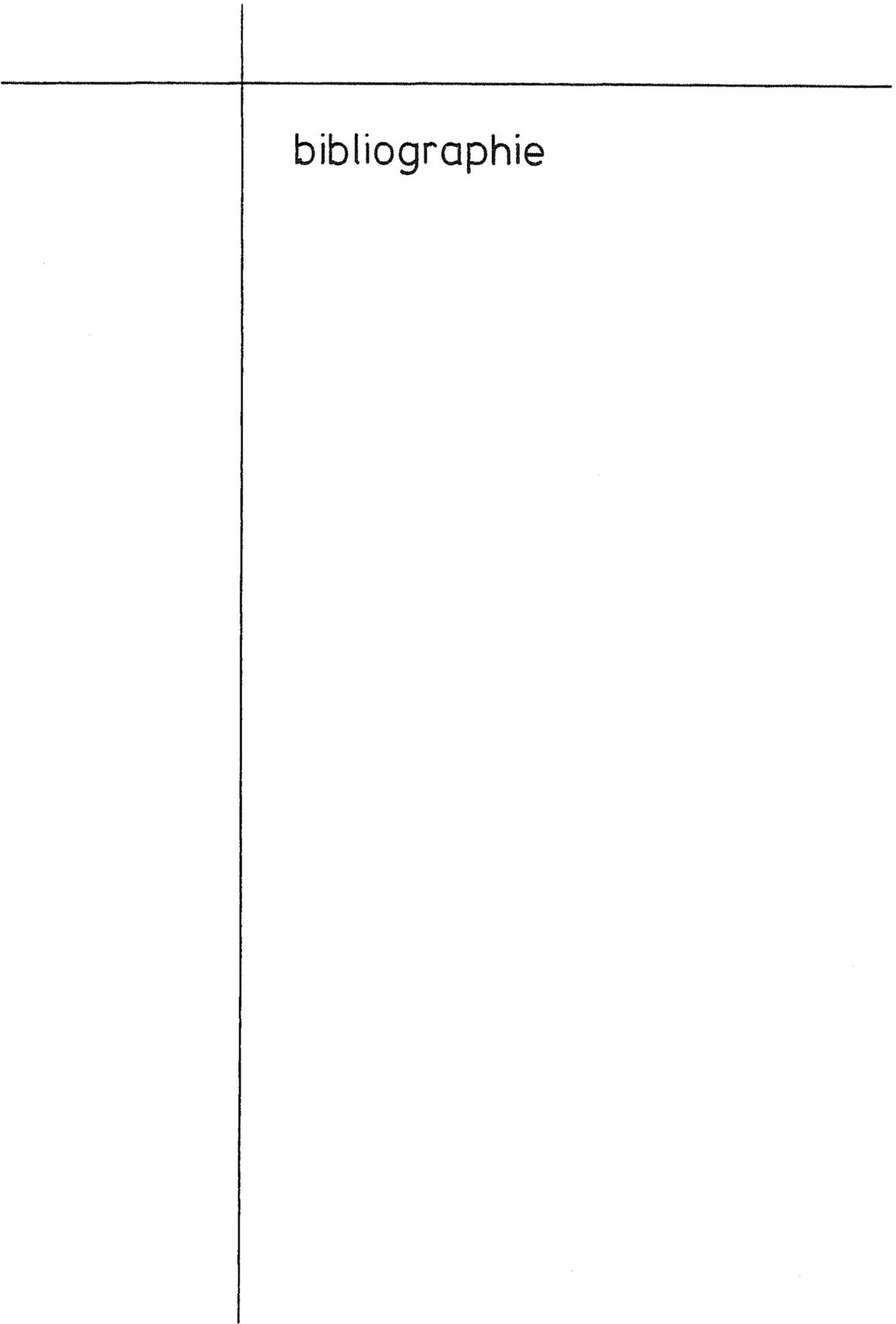
- La direction paléomagnétique moyenne d'ensemble de la série, ainsi recalculée, n'est pas significativement différente des directions déduites des pôles permies de l'Europe stable.

- L'étude des orientations préférentielles d'axes $\langle 104 \rangle$ de l'hématite par goniométrie de texture a permis de montrer que ces minéraux à forte anisotropie planaire subissent une réorientation progressive au cours de la déformation.

L'analyse et l'interprétation des résultats obtenus sur les schistes rouges des Alpes-Maritimes ainsi que le caractère positif du test de déformation inverse des vecteurs aimantation rémanente permet de conclure au comportement passif de celui-ci durant la déformation de ces séries. Ce type de résultats est compatible avec les modèles expérimentaux d'Ozima (1980) et de Morash (1981).

Il est, bien sûr, trop tôt pour établir une loi de comportement du vecteur rémanent à partir de ces seules observations. Il apparaît donc nécessaire de multiplier les recherches dans cette direction tant par l'étude d'autres séries naturelles que par des modélisations expérimentales ou mathématiques, afin d'approcher les solutions à certains problèmes soulevés ici : problème des relations entre rotation d'une population de grains magnétiques et déviation du vecteur aimantation résultant mesuré à l'échelle de l'échantillon (ceci a été abordé en 2 dimensions par Rochette (1983)), et surtout, problème des limites au comportement passif de l'aimantation.

Si la cohérence des relations direction d'aimantation/direction et intensité de déformation observée ici est ainsi confirmée le champ d'investigations paléomagnétiques en zone orogénique pourra être étendu aux séries déformées sous réserve d'une bonne détermination de la déformation et d'une analyse rigoureuse des données paléomagnétiques.



bibliographie

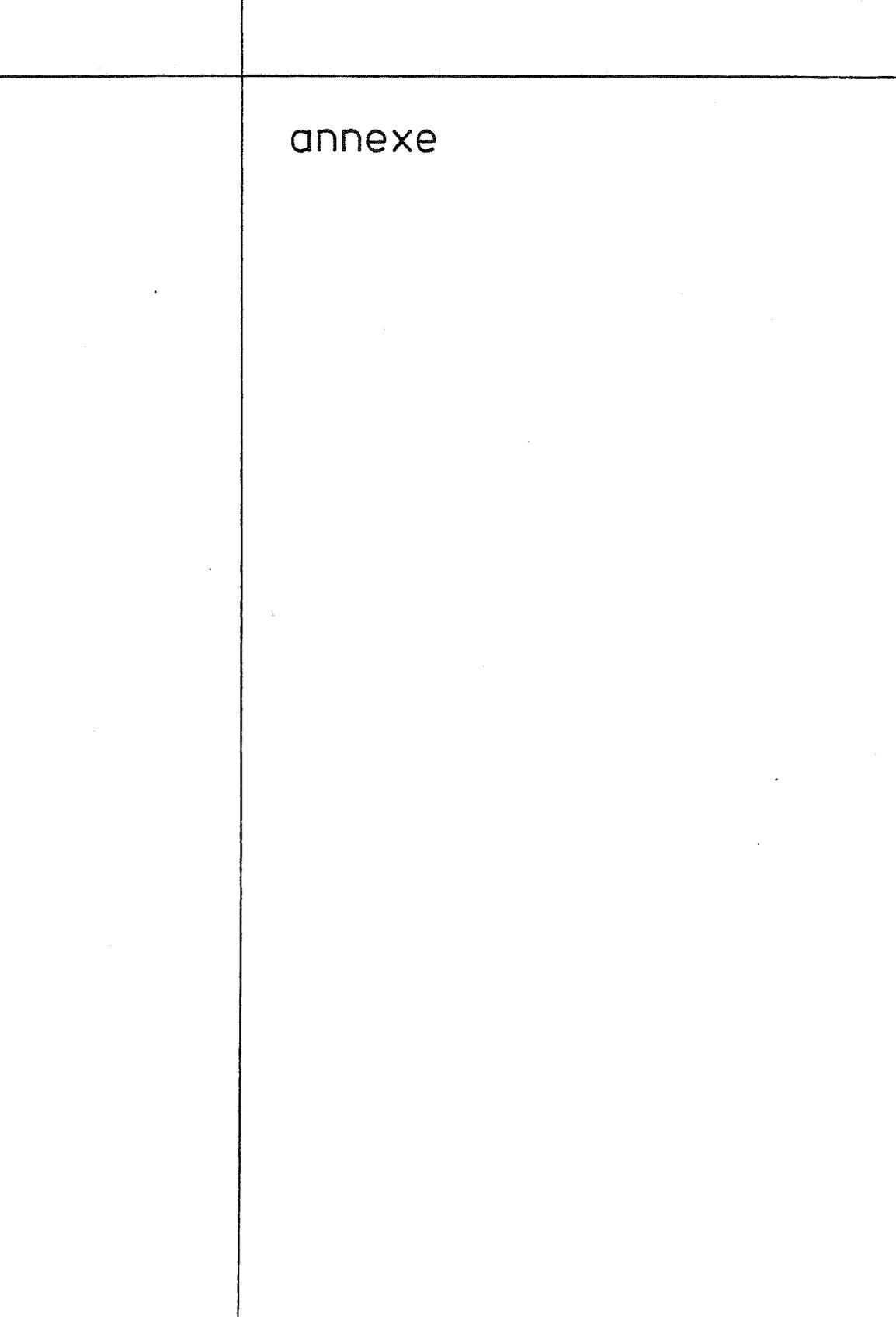
B I B L I O G R A P H I E

- BIQUAND, D., 1974 - L'aimantation rémanente naturelle des roches sédimentaires : ses propriétés, sa nature ; conditions et limites d'une utilisation paléomagnétique. Thèse, Paris.
- BONHOMMET, N., COBBOLD, P.R., PERROUD, H., RICHARDSON, A., 1981 - Paleomagnetism and Cross-folding in a key area of the Asturian arc (Spain). *J. Geophys. Res.*, 86, 1873-1887.
- BORDET, P., 1950 - Le dôme permien de Barrot (Alpes-Maritimes) et son auréole de terrains secondaires. *Bull. Serv. Carte Géol. Fr.*, 228, 51-89.
- BRESSLER, S.L., ELSTON, D.P., 1980 - Declination and Inclination errors in experimentally deposited specularite-bearing sandstones. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 48, 227-232.
- BLOW, R.A., HAMILTON, M., 1978 - Effect of compaction on the acquisition of a detrital remanent magnetization in fine-grained sediments. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 52, 13-23.
- CHOUKROUNE, P., 1976a - Structure et évolution tectonique de la zone Nord-Pyrénéenne. *Mém. Soc. Geol. Fr.*, 127, p. 1-116.
- CHOUKROUNE, P., 1976b - Strain patterns in the Pyrenean Chain. *Phil. Trans. R. Soc. London*, A-283, 271-280.
- CHOUKROUNE, P., LE PICHON, X., SEURET, M., SIBUET, J.C., 1973 - Bay of Biscay and Pyrénées. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 18, 109-118.
- COBBOLD, P.R., 1977 - Compatibility equations and the integration of finite strain in two dimensions. *Tectonophysics*, 39, T1-T6.
- COBBOLD, P.R., GAPAIS, D., 1979 - Specification of fabric shapes using an eigenvalue method : discussion. *Geol. Soc. Am. Bull.*, V.90, 310-312.
- COGNÉ, J.P., 1982 - Test de déformation inverse des directions d'aimantations des schistes rouges permien des Alpes Maritimes. *Coll. Int. CNRS : "Interpretation des champs de déformation finie en tectonique"*, Rennes, 13-16 mai 1982.
- COGNÉ, J.P., 1983 - Pre-tectonic direction of magnetization recovered by strain removal. The example of a fold in red sediments of the Alpes Maritimes (France). *2nd E.U.G. Meeting*, Strasbourg 28-31 Mars 1983.
- COGNÉ, J.P., PERROUD, H., BONHOMMET, N., 1982a - Recherche des relations aimantation-déformation dans un exemple naturel : les séries rouges permien des Alpes Maritimes (France). *9e Réunion. Ann. Sci. Terre. Paris*, 17-19 Mars 1982.
- COGNÉ, J.P., BONHOMMET, N., COBBOLD, P.R., 1982b - Pre-tectonic magnetization obtained by strain removal. *EGS-ESC Meeting - Leeds*, Août 1982-EOS transactions, 63, 51, 1982.
- COLLINSON, D.W., 1968 - An estimate of the haematite content of sediments by magnetic analysis. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 4, 417-421.
- CRAMBERT, S., 1981 - Déformation totale dans les schistes rouges cambro-tremadociens de Bretagne centrale. *Mem. DEA*, Rennes, 31 p.
- DUNLOP, D.J., 1972 - Magnetic Mineralogy of unheated and heated red sediments by coercivity spectrum analysis. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 27, 37-55.
- DUNNET, D., 1969 - A technique of finite strain analysis using elliptical particles. *Tectonophysics*, 7 (2), 117-136.
- ELMORE, R.D. and VAN DER VOO, R., 1982 - Origin of hematite and its associated remanence in the Copper Harbour conglomerate (Keweenaw), Upper Michigan. *Journ. of Geophys. Res.*, 87, 10, 918-928.
- FACER, R.A., 1983 - Folding, strain and Graham's fold test in palaeomagnetic investigations. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 72, 165-171.

- FAURE-MURET, A., 1955 - Etudes géologiques sur le massif de l'Argentera-Mercantour et ses enveloppes sédimentaires. *Mém. Carte Géol., Fr.*, 336p.
- FISHER, R.A., 1953 - Dispersion on a sphere. *Proc. Roy. Soc. London*, A 217, 295-305.
- FLINN, D., 1965 - On the symmetry principle and the deformation ellipsoid. *Geol. Mag.*, 102, p. 36-45.
- GAPAIS, D., 1979 - Orientation préférentielles de réseau et déformations naturelles. Application aux quartzites (segment hercynien de Bretagne centrale) et aux amphibolites (couverture des dômes gneissiques de Kuopio, Finlande). Thèse 3e cycle, Rennes, 261 pp.
- GRAHAM, J.W., 1949 - The stability and significance of magnetism in sedimentary rocks. *J. Geophys. Res.*, 54, 131-167.
- GRAHAM, R.H., 1978a - Quantitative deformation studies in the Permian rocks of the Alpes-Maritimes. *Proc. Sympos.*, in honour of Prof. J. Goguel, *Mém. BRGM*, 91, 219-238.
- GRAHAM, R.H., 1978b - Wrench faults, arcuate fold patterns and deformation in the southern French Alps. *Proc. Geol. Assoc.*, 89, 125-142.
- HALLS, H.C., 1976 - A least-squares method to find a remanence direction from converging remagnetization circles. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 45, 297-304.
- HALLS, H.C., 1978 - The use of converging remagnetization circles in palaeomagnetism. *Phys. Earth Planet. Int.*, 16, 1-11.
- HENRY, B., 1973 - Studies of microtectonics, anisotropy of magnetic susceptibility, and paleomagnetism of the Permian Dôme de Barrot (France) : paleotectonic and paleosedimentological implications. *Tectonophysics*, 17, 61-72.
- HENRY, S.G., 1979 - Chemical demagnetization : methods, procedures and applications through vector analysis. *Can. J. Earth Sci.*, 16, 1832-1841.
- IRVING, E., 1964 - Paleomagnetism and its application to geological and geophysical problems. J. Wiley & Sons Ed. New-York.
- ISING, G., 1943 - *Ark. Math. Astr. Fys.*, 29, Ht 1.
- KLIGFIELD, R., OWENS, W.H., LOWRIE, W., 1981 - Magnetic susceptibility anisotropy, strain, and progressive deformation in permian sediments from the Maritime Alps (France) *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 55, 181-189.
- KLIGFIELD, R., LOWRIE, W., HIRT, A., SIDDANS, A.W.B., 1983 - Effect of progressive deformation on remanent magnetization of Permian Redbeds from the Alpes Maritimes (France). *Tectonophysics*. 97, 59-85.
- KODAMA, K.P., COX, A., 1978 - The effects of a constant volume deformation on the magnetization of an artificial sediment. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 38, 436-442.
- KNEEN, S.J., 1976 - The relationship between the magnetic and strain fabrics of some haematite-bearing Welsh slates. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 31, 413-416.
- LE CORRE, Cl., 1978 - Approche quantitative des processus synschisteux. L'exemple du segment hercynien de Bretagne centrale. Thèse, Rennes, 381 pp.
- LE THEOFF, B., 1977 - Marqueurs ellipsoïdaux et déformation fine - Application aux synclinaux de Bretagne centrale et aux "mantled gneiss domes" de Kuopio (Finlande). Thèse 3e cycle Rennes, 96 pp.
- LIEBES, E., SHIVE, P.N., 1982 - Magnetization acquisition in two Mesozoic red sandstones. *Phys. of the Earth and Planet. Int.*, 30, 396-404.
- MCCABE, C. and VAN DER VOO, R., 1983 - Paleomagnetic results from the Upper Keweenaw Chequamegon sandstone : implications for red bed diagenesis and Late Precambrian apparent polar wander of North America. *Can. J. Earth Sci.*, 20, 105-112.

- McCABE, C., VAN DER VOO, R., PEACOR, D. R., SCOTSESE, C. R., FREEMAN, R., 1983 - Diagenetic magnetite carries ancient yet secondary remanence in some Paleozoic sedimentary carbonates. *Geology*, 11, 221-223.
- Mc DONALD, W. D., 1980 - Net tectonic rotation, apparent tectonic rotation and the structural tilt correction in paleomagnetic studies. *J. Geophys. Res.*, 85, B7, 3659-3669.
- Mc ELHINNY, M. W., 1964 - Statistical significance of the fold test in palaeomagnetism. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 8, 338-340.
- Mc ELHINNY, M. W., 1973 - Palaeomagnetism and plate tectonics. Cambridge University Press.
- Mc FADDEN, P. L., JONES, D. L., 1981 - The fold test in palaeomagnetism. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 67, 53-58.
- Mc PHERSON, J. G., 1980 - Genesis of variegated redbeds in the fluvial Aztec siltstone (Late Devonian), southern Victoria Land, Antarctica. *Sediment. Geol.*, 27, 2, 119-142.
- MARDIA, K. V. et GADSDEN, R. J., 1977 - A small circle of best fit for spherical data and areas of vulcanism. *Appl. Statist.*, 26, 238-245.
- MORASH, A., 1981 - Paleomagnetisme et déformation. Mém. DEA, Rennes, 24 p.
- MORASH, A., BONHOMMET, N., 1981 - Deviation of I.R.M. during simple shortening experiments. Abs. 4th, I.A.G.A. Scientific Assembly, Edinburgh, 113-12, 252.
- NAGATA, T., 1961 - Rock magnetism. Maruzen Company, Tokyo, 350 p.
- OWENS, W. H., 1973 - Strain modifications of angular density distributions. *Tectonophysics*, 16, 249-261.
- OZIMA, M., 1980 - Effects of a plastic deformation on the remanent magnetization of a Cu-Co alloy. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 47 : 121-123.
- PARK, J. K., 1970 - Acid leaching of redbeds and the relative stability of the red and black magnetic components. *Can. J. Earth Sci.*, 7, 1088-1092.
- PERCEVAULT, M. N., 1983 - Problème inverse en déformation finie application au segment hercynien de Bretagne centrale. Thèse 3e cycle, Rennes, 137 p.
- PERROUD, H., 1980 - Contribution à l'étude paléomagnétique de l'arc ibéro-armoricain. Thèse 3e cycle, Rennes, 91 p.
- PERROUD, H., 1982 - Chemical magnetic overprinting in the Ordovician redbeds of Buçaco (Portugal) *Physics of the Earth and Planet. Int.*, 30, 374-384.
- PERROUD, H., 1983 - Paleomagnetism of paleozoic rocks from the Cabo de Peñas, Asturias, Spain. *G. J. RAS*. In press.
- PURUCKER, J. E., ELSTON, P. R., SHOEMAKER, E. M., 1980 - Early acquisition of characteristic magnetization in redbeds of the Moenkopi formation (Triassic), Gray Mountain, Arizona. *J. Geophys. Res.*, 85, 997-1012.
- RAMSAY, J. G., 1967 - Folding and fracturing of rocks. Mc Graw Hill (New York), 568 pp.
- RAMSAY, J. G., WOOD, D. S., 1973 - The geometric effects of volume change during deformation process. *Tectonophysics*, 16, 263-277.
- ROCHETTE, P., 1983 - Propriétés magnétiques et déformation dans des roches sédimentaires alpines. Application au Dogger de la zone dauphinoise. Thèse 3e cycle, Grenoble, 136 p.
- ROY, J. L., PARK, J. K., 1974 - The magnetization process of certain redbeds : vector analysis of chemical and thermal results. *Can. J. Earth Sci.*, 11, 437-471.
- ROY, J. L. et LAPOINTE, J. K., 1978 - Multiphase magnetization : problems and implications. *Phys. Earth Planet. Int.*, 16, 20-37.
- RUNCORN, S. K., 1956 - Paleomagnetic comparisons between Europe and North America. *Proc. Geol. Assoc. Canada*, 8, 77-85.

- SCHEIDEGGER, A.E., 1965 - On the statistics of the orientation of bedding planes, grain axes and similar sedimentological data. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper*, 525C, 164-167.
- SCHWARZ, E.J., 1963 - A paleomagnetic investigation of Permo-Triassic redbeds and Andesites from the Spanish Pyrénées. *J. Geophys. Res.*, 68, 10, 3265-3271.
- SCHWERTNER, W.M., 1973 - A scale problem in paleostain analysis. *Tectonophysics*, 16, p.47-54.
- SCOTESE, C.R., VAN DER VOO, R., Mc CABE, C. 1982 - Paleomagnetism of the Upper Silurian and Lower Devonian carbonates of New York State : evidence of secondary magnetizations residing in magnetite. *Phys. of the Earth and Planet. Int.*, 30, 385-395.
- SEGURET, M., 1972 - Etude tectonique des nappes et séries décollées de la partie centrale du versant Sud des Pyrénées. *Pub. Ustela, serv. Géol. struc.*, n°2, Montpellier.
- SIDDANS, A.W.B., 1976 - Deformed rocks and their textures. *Phil. Trans. R. Soc. London*, A 283 : 43-54.
- SIDDANS, A.W.B., 1979 - Arcuate fold and thrust pattern in the subalpine Chains of Southeast France. *J. Struct. Géol.*, 1, 2, 117-126.
- SIDDANS, A.W.B., 1980 - Compaction métamorphisme et structurologie des argilites permienues dans les Alpes-Maritimes (France). *Rev. Géol. Dynamique Geog. Physique*. 22, 279-292.
- TURNER, P., 1974 - Origin of redbeds in the Ringerike group (Silurian) of Norway. *Sedimentary Geol.*, 12 (3), 215-235.
- TURNER, P., 1981 - Relationship between magnetic components and diagenetic features in redened Triassic alluvium (St Bees Sandstone, Cumbria, UK) *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 67, 2, 395-414.
- VAN DEN ENDE, C., 1977 - Paleomagnetism of Permian redbeds of the Dôme de Barrot (S. France). Thèse, Utrecht, 171 pp.
- VAN DER VOO, R. et BOESSENKOOL, 1973 - Permian paleomagnetic result from the Western Pyrénées. Delineating the plate boundary between the Iberian peninsula and stable Europe. *J. Geophys. Res.*, 78, 23, p. 5118-5127.
- VAN DER VOO, R. CHANNEL, J.E.T., 1980 - Paleomagnetism in Orogenic Belts. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 18, 2, 455-481.
- VAN DER VOO, R., FRENCH, A.N., FRENCH, R.B., 1979 - A paleomagnetic pole position from the folded Upper Devonian Catskill redbeds, and its tectonic implications. *Geology*, 7 : 345-348.
- VAN DER VOO, R., PEINADO, J., SCOTESE, R.S., 1983 - A paleomagnetic reevaluation of Pangea reconstructions. *Tectonophysics*. in press.
- VAN HOUTEN, F.B., 1973 - Origin of redbeds, a review 1961-1972. *Ann. Rev. Earth. Planet. Sci.*, 1, 39-61.
- WALKER, T.R., LARSON, E.E., HOBLITT, R.P., 1981 - Nature and origin of hematite in the Moenkopi formation (Triassic), Colorado plateau : a contribution to the origin of magnetism in redbeds. *J. Geophys. Res.*, 86, 1, 317-333.
- WATSON, G.S. - 1956 - Analysis of dispersion on a sphere. *Mon. Not. Roy. Ast. Soc., Geophys. Supp.*, 7, 153-159.
- WATTERSON, J., 1968 - Homogeneous deformation of the gneisses of Westerland, South West Greenland. *Grøn. Geol. Undersø. Bull.*, 78.
- WESTPHAL, M., 1973 - Etudes paléomagnétiques de quelques formations permienues et triasiques dans les Alpes Occidentales (France). *Tectonophysics*, 17, 323-335.
- WESTPHAL, M., 1980 - Analyse statistique de directions non orientées. *Pageoph.*, Vol. 119, Birkhauser Verlag, Berlin.
- WOOD, D.S., OERTEL, G., SINGH, K. and BENNETT, H.F., 1976 - Strain anisotropy in rocks. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A. 283, 27-42.
- ZIJDERVELD, J.D.A., 1967 - Demagnetization of rocks : analysis of results. In : methods in paleomagnetism (D.W. Collinson, K.M. Creer & S.K. Runcorn edit.) 254-286, New-York.
- ZIJDERVELD, J.D.A., VAN DER VOO, R., 1971 - Les données paléomagnétiques et leur implication sur l'histoire structurale du Golfe de Gascogne. In : Histoire structurale du Golfe de Gascogne, 1, IFP, II-1, II-23.



annexe

T A B L E A U X

1. ARN Alpes.
2. Désaimantation Alpes
 - A. Composantes caractéristiques
 - B. Pôles des grands cercles en désaimantation thermique
3. ARN pli
4. Désaimantation chimique pli
5. ARN Somport
6. Désaimantation Somport
 - A. Composantes primaires site B
 - B. Plans de réaimantation (pôles)
 - C. Grands cercles moyens (pôles)
 - D. Aimantations secondaires sites A et F.
7. Pôles permians de l'Europe stable (d'après Van der Voo et al., 1983) et directions correspondantes au lieu 44. 1N, 7.1 E.
8. Pôles permians et permotriasiques pour la plaque espagnole (d'après Zijdeveld et Van der Voo, 1971) et directions correspondantes au lieu 42.8 N, 0.5 W (Somport).

ARN ALPES

SITE	N°	J (Am ⁻¹)	IS		CP		V	TRAITEMENT
			D	I	D	I		
A	1	0.110	238	23	240	14	17	-
	2 A	0.283	24	3	23	7	2	th
	2 B	0.209	201	- 24	196	- 27	7	-
	3 A	0.093	224	31	228	24	21	-
	3 B	0.149	207	19	210	14	11	th
	4	0.076	228	4	228	- 4	26	-
	5	0.177	199	22	203	18	12	th
	6	0.154	221	17	223	10	10	th
	7 A	0.206	225	19	227	12	9	th
	7 B	0.199	215	16	217	10	9	th
8	0.082	220	- 3	219	- 9	21	th	
9 A	0.211	225	43	231	35	3	th	
9 B	0.198	217	39	223	32	13	th	
B	10 A	0.069	216	- 14	215	- 11	17	-
	10 B	0.062	220	- 11	219	- 9	18	ch
	11 A	0.093	220	- 15	219	- 13	8	-
	11 B	0.176	218	- 19	216	- 17	6	th
	12	0.040	229	- 11	228	- 10	12	th
	13 A	0.052	192	- 14	191	- 10	17	ch
	13 B	0.072	193	- 15	192	- 11	16	th
	14 A	0.053	222	- 23	220	- 21	21	ch
	14 B	0.053	222	- 21	220	- 19	16	th
	15	0.023	229	11	230	12	33	-
	16	0.075	174	- 42	172	- 37	11	-
	17	0.128	217	- 4	217	- 2	11	th
	18 A	0.053	229	9	230	10	22	-
	18 B	0.069	230	4	230	5	20	ch
19	0.043	214	5	214	8	24	-	
20	0.128	216	- 15	215	- 12	7	th	
21	0.094	73	43	68	44	16	th	
C	22 A	0.179	193	- 3	196	- 24	8	th
	22 B	0.164	196	3	198	- 18	5	ch
	23	0.180	203	- 60	256	- 71	14	-
	24	0.532	215	14	213	- 2	8	th
	25 A	0.513	212	4	213	- 12	8	th
	25 B	0.687	224	11	222	- 1	5	th
	26 A	0.507	185	13	185	- 10	3	th
	26 B	0.555	191	19	189	- 3	9	th
	27 A	0.449	197	4	199	- 16	5	th
	27 B	0.543	209	8	209	- 9	7	ch

Tableau 1

ARN ALPES (SUITE)

SITE	N°	J (Am ⁻¹)	IS		CP		V	TRAITEMENT
			D	I	D	I		
C (suite)	27 C	0.446	205	10	205	- 8	11	-
	28 A	1.089	208	19	205	1	5	ch
	28 B	0.926	198	28	193	7	3	th
	29	0.721	187	- 5	190	- 27	9	-
	30 A	0.318	196	5	197	- 16	6	-
	30 B	0.286	197	3	200	- 17	10	ch
	31 A	0.554	212	16	209	- 1	5	ch
	31 B	0.524	209	10	209	- 7	1	th
D	32 A	0.065	196	2	196	- 28	11	th
	32 B	0.079	196	- 6	196	- 36	9	th
	32 C	0.068	191	- 15	189	- 45	13	ch
	33 A	0.090	227	23	224	- 3	8	ch
	33 B	0.122	220	14	220	- 13	8	th
	33 C	0.132	225	16	224	- 10	12	-
	34 A	0.103	227	6	229	- 19	8	ch
	34 B	0.113	224	- 1	228	- 27	6	th
	35 A	0.039	220	15	220	- 12	16	th
	35 B	0.122	220	14	220	- 13	8	th
	35 B	0.074	201	- 10	203	- 40	12	-
	35 C	0.068	207	1	209	- 28	13	th
	35 D	0.062	205	- 1	207	- 30	13	th
	36 A	0.099	221	23	219	- 4	11	th
	36 B	0.040	220	28	217	0	22	th
	37 A	0.038	223	6	225	- 20	12	ch
	37 B	0.053	219	9	220	- 18	32	-
	38 A	0.029	219	22	217	- 6	24	-
	38 B	0.031	216	7	217	- 21	24	-
	39 A	0.029	247	61	224	37	26	-
39 B	0.025	209	- 5	212	- 34	35	-	
40 A	0.041	214	2	216	- 26	12	ch	
40 B	0.095	195	- 9	195	- 39	9	th	
E	41 A	0.372	185	- 15	206	- 39	6	ch
	41 B	0.407	194	- 22	220	- 38	4	th
	42 A	0.412	195	- 3	205	- 24	4	th
	42 B	0.483	203	- 4	212	- 19	3	th
	42 C	0.468	203	- 10	217	- 24	3	ch
	43	0.481	195	5	200	- 18	5	th
	44	0.421	180	- 14	200	- 42	4	th
	45	0.207	79	- 46	24	- 51	10	-

Tableau 1 (suite)

ARN ALPES (SUITE)

SITE	N°	J (Am ⁻¹)	IS		CP		V	TRAITEMENT
			D	I	D	I		
E (suite)	46 A	0.173	197	- 2	206	- 22	7	th
	46 B	0.223	194	- 9	209	- 29	4	ch
	47 A	0.264	206	0	212	- 14	3	th
	47 B	0.180	201	- 1	209	- 18	7	ch
	48	0.280	159	36	155	- 6	1	th
F	49 A	0.110	202	12	203	- 24	5	ch
	49 B	0.126	198	6	200	- 30	9	th
	50 A	0.180	194	2	196	- 35	3	ch
	50 B	0.133	187	- 5	187	- 42	4	-
	51 A	0.158	211	3	215	- 30	5	ch
	51 B	0.136	201	1	204	- 35	8	th
	51 C	0.132	202	0	206	- 35	7	th
	52 A	0.093	196	0	198	- 36	9	-
	52 B	0.117	200	- 5	204	- 41	6	th
	52 C	0.204	198	- 4	202	- 40	6	ch
	53 A	0.034	192	33	191	- 4	19	-
	53 B	0.058	188	- 2	189	- 39	15	th
	53 C	0.058	188	- 10	189	- 47	16	-
	54 A	0.140	195	9	196	- 27	5	ch
	54 B	0.156	196	14	196	- 22	5	th
	55 A	0.201	197	2	199	- 34	8	th
	55 B	0.162	202	- 2	206	- 37	3	-
	56 A	0.177	219	7	222	- 24	2	ch
56 B	0.204	221	0	227	- 29	4	th	
56 C	0.156	214	- 1	220	- 33	6	-	
57 A	0.193	218	8	221	- 23	4	th	
57 B	0.128	215	2	220	- 30	8	-	
58	0.166	208	17	208	- 17	10	th	
G	59 A	0.082	230	- 4	229	20	10	-
	59 B	0.065	216	- 10	216	11	8	th
	60	0.032	216	16	208	37	13	th
	61	0.039	214	6	209	26	11	-
	62 A	0.038	202	5	197	22	7	th
	62 B	0.027	196	8	190	22	18	ch
	63	0.127	225	- 12	225	12	4	-
	64 A	0.077	233	- 9	232	16	8	-
	64 B	0.079	227	- 6	226	18	9	th
	65 A	0.037	21	43	33	24	13	-
	65 B	0.043	358	45	17	33	10	-
	66	0.053	174	43	149	44	12	ch
	67	0.295	196	- 7	196	8	6	th
68	0.134	161	- 20	170	- 17	10	th	

Tableau 1 (suite)

ARN ALPES (SUITE)

SITE	N°	J (Am ⁻¹)	IS		CP		V	TRAITEMENT
			D	I	D	I		
I	76	0.109	199	- 19	201	5	6	th
	77 A	0.171	209	- 3	207	22	9	-
	77 B	0.130	220	- 9	220	17	7	-
	78	0.070	222	26	219	52	12	th
	79	0.053	231	47	236	73	15	th
	80	0.053	217	44	205	70	13	-
	81	0.070	214	20	209	45	10	th
	82 A	0.055	234	40	240	66	8	th
	82 B	0.050	214	31	206	56	8	th
	83	0.108	214	3	212	29	7	th
84	0.145	212	- 17	212	9	5	-	
J	135 A	0.149	216	- 6	230	- 30	5	-
	135 B	0.144	220	- 1	229	- 24	8	th
	136 A	0.168	220	4	226	- 20	8	-
	136 B	0.203	222	11	223	- 14	9	-
	136 C	0.337	222	11	223	- 14	5	th
	137 A	0.107	208	11	211	- 22	4	th
	137 B	0.138	209	7	215	- 25	5	-
	137 C	0.212	214	14	215	- 16	6	-
	138 A	0.374	233	13	230	- 5	6	th
	138 B	0.304	228	5	232	- 14	8	-
	139	0.161	217	3	224	- 23	9	-
	140 A	0.217	222	16	220	- 10	6	-
	140 B	0.237	220	18	217	- 9	6	-
	141 A	0.137	215	- 9	231	- 33	5	-
	141 B	0.144	211	- 8	227	- 35	6	th
	141 C	0.092	208	- 8	224	- 37	6	th
	142 A	0.283	224	- 16	225	- 32	4	th
	142 B	0.077	211	- 11	229	- 38	8	-
	143 A	0.343	228	- 17	248	- 30	9	-
	143 B	0.326	231	- 13	247	- 25	10	-
143 C	0.359	238	- 17	255	- 23	9	th	
144 A	0.059	213	- 6	227	- 32	10	-	
144 B	0.084	218	- 9	234	- 31	8	th	

Tableau 1 (suite)

DESAIMANTATIONS ALPES

A - COMPOSANTES CARACTERISTIQUES

SITE	N°	TYPE	INTERVALLE	IS		CP		DDCP	
				D	I	D	I	D	I
B	10 B	Ch	93 - 858	221	- 10	220	- 8	217	- 8
	13 A	Ch	189 - 858	194	- 23	192	- 18	200	- 19
	14 A	Ch	189 - 858	222	- 20	220	- 18	217	- 18
	18 B	Ch	93 - 858	228	- 1	227	0	225	0
C	22 A	Th	630 - 685	195	0	197	- 21	190	- 19
	22 B	Ch	21 - 858	196	3	198	- 18	190	- 17
	24	Th	0 - 670	220	13	217	0	203	0
	25 A	Th	200 - 685	218	5	218	- 8	203	- 9
	25 B	Th	200 - 685	224	11	222	- 2	206	- 2
	26 A	Th	200 - 660	186	12	186	- 10	184	- 10
	26 B	Th	200 - 685	194	18	192	- 3	187	- 3
	27 A	Th	500 - 685	198	3	200	- 17	191	- 16
	27 B	Ch	45 - 858	208	8	208	- 10	196	- 10
	28 A	Ch	45 - 858	207	17	205	- 1	194	- 1
	28 B	Th	660 - 685	201	26	197	5	190	5
	30 B	Ch	9 - 858	200	0	198	- 19	193	- 19
	31 A	Ch	45 - 858	210	13	210	- 7	198	- 4
	31 B	Th	0 - 685	210	10	209	- 3	197	- 7
D	32 C	Ch	93 - 858	195	- 19	196	- 49	206	- 6
	33 A	Ch	189 - 858	220	14	220	- 13	211	- 10
	34 A	Ch	189 - 858	228	4	231	- 21	211	- 10
	34 B	Th	500 - 670	230	4	233	- 20	204	- 8
	36 A	Th	500 - 670	216	11	217	- 17	195	- 25
	37 A	Ch	189 - 858	227	5	229	- 21	210	- 10
	40 A	Ch	93 - 858	205	- 9	208	- 39	200	- 18
E	41 A	Ch	93 - 858	180	- 23	210	- 48	179	- 18
	41 B	Th	200 - 670	193	- 25	222	- 41	185	- 17
	42 A	Th	0 - 680	194	- 6	207	- 26	179	- 9
	42 B	Th	200 - 675	204	- 4	213	- 18	182	- 6
	42 C	Ch	93 - 858	207	- 4	216	- 16	183	- 5
	43	Th	400 - 670	185	30	178	- 3	170	- 1
	44	Th	200 - 675	163	- 15	182	- 52	176	- 12
	46 A	Th	630 - 680	199	- 10	214	- 27	182	- 10
	46 B	Ch	189 - 858	190	- 13	208	- 35	179	- 12
	47 A	Th	630 - 680	211	- 3	218	- 13	184	- 5
	47 B	Ch	93 - 858	204	0	210	- 16	181	- 5
48	Th	200 - 660	161	- 36	208	- 69	177	- 32	

Tableau 2

DESAIMENTATIONS ALPES (SUITE)

A - COMPOSANTES CARACTERISTIQUES (SUITE)

SITE	N°	TYPE	INTERVALLE	IS		CP		DDCP	
				D	I	D	I	D	I
F	49 A	Ch	45 - 663	197	7	199	- 29	194	- 15
	49 B	Th	620 - 670	204	13	205	- 22	196	- 12
	50 A	Ch	189 - 858	192	1	194	- 35	193	- 18
	51 A	Ch	189 - 858	206	0	211	- 34	197	- 18
	51 B	Th	0 - 660	204	5	207	- 30	196	- 16
	51 C	Th	620 - 670	210	2	214	- 31	198	- 17
	52 B	Th	200 - 620	196	- 4	199	- 40	194	- 21
	52 C	Ch	93 - 858	202	- 2	207	- 37	196	- 20
	53 B	Th	500 - 640	191	1	192	- 35	192	- 18
	54 A	Ch	189 - 858	196	9	197	- 28	193	- 15
	54 B	Th	620 - 685	203	18	203	- 17	195	- 10
	55 A	Th	500 - 680	198	4	200	- 32	194	- 17
	56 A	Ch	93 - 858	216	0	222	- 31	199	- 18
	56 B	Th	200 - 670	215	- 2	221	- 33	199	- 19
	57 A	Th	550 - 685	223	11	225	- 18	201	- 12
58	Th	0 - 685	207	18	209	- 16	197	- 9	
G	59 B	Th	350 - 550	210	- 30	216	- 9	210	- 2
	60	Th	500 - 600	214	- 2	211	19	207	3
	62 A	Th	500 - 620	242	- 30	243	- 4	223	- 1
	62 B	Ch	189 - 858	193	0	191	14	200	2
	64 B	Th	500 - 620	225	- 14	225	10	212	2
	66	Ch	189 - 858	168	26	155	26	190	5
	67	Th	400 - 670	193	47	161	55	195	9
	68	Th	620 - 655	165	- 40	184	- 33	195	- 10
J	135 B	Th	200 - 630	208	- 9	225	- 38	195	- 20
	136 C	Th	200 - 630	219	8	219	- 18	194	- 8
	137 A	Th	400 - 660	206	10	209	- 24	189	- 10
	138 A	Th	0 - 660	235	11	232	- 5	199	- 3
	141 B	Th	200 - 630	215	- 17	238	- 39	205	- 26
	141 C	Th	200 - 660	201	- 16	224	- 48	195	- 27
	142 A	Th	400 - 660	217	- 10	234	- 33	201	- 19
	143 C	Th	200 - 660	214	- 16	237	- 39	203	- 25
	144 B	Th	600 - 680	187	33	183	- 10	181	- 3

Tableau 2 (suite)

DESAIMENTATIONS ALPES (SUITE)

B - POLES DES GRANDS CERCLES EN DESAIMANTATION THERMIQUE

SITE	N°	INTERVALLE	N	IS	
				D	I
A	2 A	400 - 630	4	61	88
	3 B	400 - 600	3	106	33
	5	200 - 600	4	99	20
	6	200 - 600	4	119	56
	7 A	400 - 630	4	119	46
	7 B	500 - 685	5	94	79
	8	400 - 600	3	268	57
	9 A	200 - 600	4	112	15
	9 B	400 - 685	6	107	15
B	11 B	0 - 635	6	130	10
	12	350 - 620	5	272	53
	13 B	500 - 670	5	271	54
	14 B	200 - 640	7	205	74
	17	0 - 635	6	126	53
	20	0 - 635	6	138	31
	21	600 - 670	5	147	63
D	32 A	0 - 660	7	112	17
	32 B	200 - 685	7	108	45
	33 B	200 - 685	7	1	70
	35 A	200 - 630	4	122	7
	35 C	400 - 660	5	72	68
	35 D	0 - 660	6	108	37
	36 B	0 - 660	7	126	0
	40 B	200 - 670	6	108	30
I	76	0 - 660	7	114	16
	78	200 - 660	6	117	31
	79	200 - 600	4	101	33
	81	0 - 600	5	109	41
	82 A	200 - 660	6	82	48
	82 B	0 - 660	7	71	55
	83	200 - 660	6	120	35

Tableau 2 (suite)

ARN PLI

SITE	N°	J (Am ⁻¹)	IS		CD		V	TRAITEMENT
			D	I	D	I		
P1	115 A	0.044	206	- 18	196	- 55	17	ch
	115 B	0.034	187	- 7	176	- 38	19	ch
	116 A	0.025	229	20	229	- 19	18	ch
	116 B	0.024	232	10	233	- 28	19	ch
	117 A	0.061	221	- 32	221	- 71	9	ch
	117 B	0.025	241	6	244	- 31	23	-
	118 A	0.058	231	21	231	- 17	13	ch
	118 B	0.047	223	9	224	- 30	14	ch
	119	0.039	241	39	236	2	14	ch
	120 A	0.003	283	27	273	5	49	-
	120 B	0.004	283	54	257	27	48	-
	121	0.008	318	15	307	16	51	-
	122	0.008	262	- 4	271	- 32	68	-
	123	0.005	273	- 82	30	- 55	106	-
124	0.004	43	27	45	65	72	-	
P2	96	0.100	205	- 54	187	- 65	15	ch
	97 A	0.065	206	- 25	200	- 37	9	-
	97 B	0.088	206	- 22	201	- 34	12	ch
	98 A	0.093	224	- 31	215	- 45	7	ch
	98 B	0.096	218	- 27	214	- 41	8	ch
	99 A	0.071	219	- 33	214	- 47	6	-
	99 B	0.095	214	- 33	208	- 46	8	ch
	100 A	0.032	348	- 71	17	- 62	318	-
	100 B	0.078	207	- 6	205	- 18	9	ch
	101 A	0.108	206	- 35	198	- 47	10	ch
	101 B	0.100	196	- 37	185	- 48	10	ch
	102 A	0.022	195	- 42	182	- 51	14	-
	102 B	0.033	207	- 25	202	- 37	11	ch
	102 C	0.043	204	- 14	200	- 27	9	ch
	103 A	0.080	205	- 33	198	- 45	7	-
103 B	0.091	208	- 27	203	- 39	7	ch	
104 A	0.065	219	- 42	212	- 55	14	-	
104 B	0.072	215	- 49	204	- 63	10	ch	
104 C	0.064	216	- 55	202	- 68	13	-	
P3	85 A	0.044	247	- 20	256	47	16	-
	85 B	0.034	252	- 40	249	27	22	-
	86 A	0.077	209	- 46	214	24	22	-
	86 B	0.067	209	- 49	215	21	14	ch
	87 A	0.174	200	- 47	208	20	9	ch

Tableau 3

ARN PLI (SUITE)

SITE	N°	J (Am ⁻¹)	IS		CP		V	TRAITEMENT
			D	I	D	I		
P5 (suite)	108 A	0.028	281	63	254	53	22	ch
	108 B	0.031	248	42	239	26	28	ch
	109 A	0.046	246	9	246	- 6	17	ch
	109 B	0.018	247	2	248	- 13	27	ch
	109 C	0.015	243	- 13	248	- 28	30	-
P6	110 A	0.030	254	- 8	254	10	23	ch
	110 B	0.042	253	- 19	251	- 1	19	ch
	111 A	0.031	260	49	290	61	20	ch
	111 B	0.018	238	7	241	28	35	ch
	112 A	0.072	245	28	255	46	12	ch
	112 B	0.070	238	20	243	40	12	ch
	113	0.120	205	- 35	206	- 13	8	ch
	114	0.029	218	24	220	46	15	ch

Tableau 3 (Suite)

ARN PLI (SUITE)

SITE	N°	J (Am ⁻¹)	IS		CP		V	TRAITEMENT
			D	I	D	I		
P3(Suite)	87 B	0.124	212	- 40	213	31	10	-
	88 A	0.213	222	- 51	224	20	11	ch
	88 B	0.229	231	- 51	229	21	11	ch
	89 A	0.083	222	- 46	223	26	10	ch
	89 B	0.102	207	- 45	212	24	10	ch
	90	0.064	206	- 49	213	20	11	-
	91 A	0.105	205	- 71	220	- 1	12	-
	91 B	0.086	181	- 78	218	- 9	10	ch
	92 A	0.201	222	- 50	224	22	4	ch
	92 B	0.319	216	- 43	218	28	9	-
	93 A	0.061	214	- 60	220	11	20	-
	93 B	0.152	203	- 68	218	2	11	-
	94 A	0.196	218	- 35	218	36	12	-
	94 B	0.213	218	- 49	220	22	6	ch
	94 C	0.211	208	- 54	216	16	15	-
	95 A	0.163	115	- 66	203	- 25	9	-
95 B	0.136	74	- 61	209	- 43	11	-	
P4	125	0.068	229	- 30	230	- 69	7	ch
	126 A	0.052	258	10	260	- 24	13	ch
	126 B	0.053	248	4	252	- 32	13	ch
	126 C	0.030	253	16	253	- 19	18	ch
	127	0.020	316	49	276	30	29	-
	128 A	0.037	237	8	238	- 31	12	ch
	128 B	0.029	240	4	242	- 34	15	ch
	129 A	0.014	271	33	262	2	39	-
	129 B	0.019	239	5	241	- 33	20	ch
	130	0.029	261	47	250	12	30	-
	131	0.024	245	- 10	252	- 47	23	-
	132 A	0.025	265	- 2	273	- 32	32	-
	132 B	0.023	252	- 25	273	- 58	38	-
	133	0.010	112	33	142	41	180	-
134 A	0.024	310	52	275	34	32	-	
134 B	0.009	281	- 16	298	- 35	78	-	
P5	105 A	0.047	260	42	249	29	15	ch
	105 B	0.037	241	- 6	244	- 22	19	ch
	106 A	0.035	254	15	252	1	26	-
	106 B	0.025	237	5	238	- 12	27	-
	107 A	0.044	251	22	247	8	17	ch
	107 B	0.049	220	- 4	221	- 23	11	ch

Tableau 3 (Suite)

DESAIMANTATIONS CHIMIQUES PLI

SITE	N°	INTERVALLE	IS		CP		DDCP	
			D	I	D	I	D	I
P1	115 A	312 - 666	210	- 19	201	- 56	201	- 10
	115 B	218 - 666	185	- 13	171	- 42	196	- 8
	116 A	164 - 573	225	14	225	- 25	206	- 5
	116 B	477 - 669	220	- 24	220	- 63	204	- 11
	117 A	165 - 837	216	- 25	211	- 64	203	- 11
	118 A	69 - 477	231	13	232	- 25	208	- 5
	118 B	218 - 573	239	15	239	- 22	210	- 5
	119	333 - 669	246	43	239	6	214	2
P2	96	120 - 666	202	- 49	187	- 60	204	- 20
	97 B	120 - 666	201	- 18	197	- 30	206	- 7
	98 A	120 - 666	218	- 30	213	- 44	211	- 11
	98 B	477 - 1137	213	- 32	207	- 46	210	- 12
	99 B	333 - 999	208	- 31	202	- 44	208	- 12
	100 B	312 - 573	205	0	205	- 12	209	- 3
	101 A	69 - 999	206	- 34	198	- 46	207	- 13
	101 B	120 - 666	217	- 30	213	- 44	211	- 12
	102 B	218 - 456	209	- 8	207	- 21	209	- 5
	102 C	69 - 837	204	- 10	201	- 22	208	- 5
	103 B	120 - 666	207	- 25	202	- 37	208	- 9
	104 B	218 - 573	224	- 43	219	- 57	213	- 18
P3	86 B	477 - 1137	202	- 58	214	11	220	6
	87 A	120 - 666	198	- 51	208	16	218	8
	88 A	218 - 666	218	- 57	222	14	223	8
	88 B	165 - 1137	212	- 61	220	10	222	6
	89 A	218 - 666	211	- 50	216	21	221	10
	89 B	120 - 666	203	- 49	210	19	218	9
	91 B	669 - 1137	189	- 82	222	- 11	226	- 13
	92 A	120 - 666	220	- 49	222	23	223	11
	94 B	218 - 666	219	- 58	223	13	223	7
P4	125	333 - 999	226	- 36	223	- 75	211	- 18
	126 A	164 - 573	255	0	261	- 34	224	- 11
	126 B	312 - 573	254	5	259	- 30	224	- 9
	126 C	69 - 477	252	12	254	- 23	223	- 7
	128 A	69 - 669	231	- 1	232	- 40	215	- 10
	128 B	164 - 573	235	6	237	- 32	216	- 8
	129 B	164 - 573	237	0	240	- 38	218	- 10

Tableau 4

DESAIMENTATIONS CHIMIQUES PLI (SUITE)

SITE	N°	INTERVALLE	IS		CP		DDCP	
			D	I	D	I	D	I
P5	105 A	164 - 573	245	18	243	3	221	1
	105 B	120 - 573	235	- 18	241	- 35	219	- 9
	107 A	218 - 666	247	11	248	- 4	222	- 1
	107 B	312 - 666	224	- 9	226	- 28	215	- 7
	108 A	312 - 666	240	59	229	41	217	15
	108 B	312 - 573	239	32	235	15	218	4
	109 A	164 - 573	228	0	229	- 18	216	- 4
	109 B	312 - 456	221	11	221	- 8	213	- 2
P6	110 A	120 - 666	247	1	250	20	223	6
	110 B	120 - 666	238	- 11	238	10	220	3
	111 A	120 - 573	243	34	256	53	220	15
	111 B	218 - 573	234	- 9	234	12	218	4
	112 A	120 - 666	239	19	245	39	219	11
	112 B	164 - 666	233	19	238	40	217	11
	113	164 - 666	206	- 36	208	- 13	209	- 4
	114	120 - 312	211	14	210	37	210	9

Tableau 4 (Suite)

ARN SOMPORT

SITE	N°	J (10^{-2}Am^{-1})	IS		CP		V	TRAITEMENT
			D	I	D	I		
A	1 A	0.602	58	67	257	47	11	th
	1 B	0.510	180	78	238	20	10	-
	2	0.821	16	61	281	38	13	-
	3 A	0.393	41	59	273	50	13	ch
	3 B	0.363	74	63	248	52	18	th
	4	0.376	350	85	255	25	12	ch
	5 A	0.568	46	73	259	40	5	ch
	5 B	0.398	31	73	264	37	10	th
	6 A	0.626	357	65	278	29	8	ch
	6 B	0.483	53	62	263	51	6	-
	7 A	0.636	16	71	269	35	8	ch
	7 B	0.469	26	74	263	35	9	-
	8 A	0.542	113	68	231	39	11	-
	8 B	0.480	137	47	202	33	14	th
	9	0.368	123	71	232	35	15	-
	10 A	0.533	41	77	258	36	12	ch
10 B	0.631	66	70	252	45	10	-	
B	11 A	3.94	113	16	133	4	9	th
	11 B	5.34	117	15	132	- 1	2	ch
	12 A	2.76	122	16	133	- 5	2	-
	12 B	3.86	122	13	130	- 5	3	-
	13	2.51	113	23	140	3	1	-
	14	4.10	134	4	121	- 16	2	-
	15 A	6.42	128	5	122	- 11	1	af
	15 B	5.93	126	8	124	- 10	3	ch
	16 A	3.45	130	13	130	- 13	1	th
	16 B	4.02	131	10	127	- 13	2	ch
	17 A	1.52	125	17	134	- 8	11	ch
	17 B	1.63	128	10	127	- 11	1	-
	18	2.40	131	18	135	- 13	1	-
	19	2.82	129	8	125	- 12	1	-
	20 A	2.08	115	16	134	2	2	ch
	20 B	1.76	124	12	129	- 7	2	th
21 A	6.16	129	10	127	- 12	2	-	
21 B	2.04	135	9	125	- 17	1	ch	
22 A	5.44	134	14	131	- 17	1	-	
22 B	4.72	133	12	129	- 16	1	th	

Tableau 5

ARN SOMPORT (SUITE)

SITE	N°	J (10 ⁻² Am ⁻¹)	IS		CP		V	TRAITEMENT
			D	I	D	I		
C	23 A	0.273	136	10	149	28	7	th
	23 B	0.165	145	13	158	23	12	ch
	24 A	0.130	135	45	183	51	26	-
	24 B	0.123	129	28	159	45	24	-
	25 A	0.094	163	16	175	14	21	-
	25 B	0.280	79	45	97	85	7	ch
	26 A	0.220	129	16	147	36	10	ch
	26 B	0.145	136	9	148	26	15	th
	27 A	0.159	142	29	169	38	14	ch
	27 B	0.112	147	25	170	31	19	-
	28 A	0.724	139	- 11	138	9	2	ch
	28 B	0.675	137	- 15	135	6	4	-
	29 A	0.283	155	- 11	151	- 1	13	-
	29 B	0.301	140	- 5	142	13	7	ch
	30 A	0.106	257	12	257	- 28	18	-
	30 B	0.115	236	15	234	- 23	18	-
	31 A	0.715	117	- 14	117	17	3	th
	31 B	0.384	136	- 3	141	17	5	-
32 A	0.310	140	27	166	37	7	th	
32 B	0.58 2	128	3	137	26	4	-	
D	33 A	0.174	153	56	141	74	18	ch
	33 B	0.174	163	25	163	44	102	-
	34 A	0.158	205	56	235	67	17	ch
	34 B	0.170	182	51	196	68	16	-
	35 A	0.279	182	- 33	180	- 15	11	ch
	35 B	0.270	176	- 19	175	0	26	-
	36 A	0.399	154	- 36	155	- 17	10	-
	36 B	0.282	170	- 32	169	- 13	12	th
	37 A	0.213	175	- 25	174	- 6	16	-
	37 B	0.208	176	- 19	175	- 1	15	ch
	37 C	0.128	151	32	146	51	23	-
	38 A	0.244	168	60	176	79	12	th
	38 B	0.273	170	50	175	69	11	-
	39 A	0.410	156	- 46	158	- 27	8	-
	39 B	0.314	164	- 29	164	- 11	8	ch
40 A	0.225	176	- 28	175	- 9	18	ch	
40 B	0.166	164	- 8	164	11	22	-	
41 A	0.205	139	12	136	29	14	th	

Tableau 5 (Suite)

ARN SOMPORT (SUITE)

SITE	N°	J (10 ⁻² Am ⁻¹)	IS		CP		V	TRAITEMENT
			D	I	D	I		
D(suite)	41 B	0.220	162	2	162	21	14	-
	42 A	0.151	169	30	171	48	16	-
	42 B	0.193	147	35	140	53	13	th
	42 C	0.233	146	18	143	36	12	-
E	43	0.553	91	48	64	40	4	-
	44 A	0.459	50	56	33	33	8	-
	44 B	0.479	114	41	88	44	13	ch
	45	0.695	351	62	357	34	9	-
	46 A	0.602	109	62	59	57	5	-
	46 B	0.606	106	42	80	42	7	ch
	47 A	1.129	133	15	123	31	5	-
	47 B	1.369	147	6	141	28	3	th
	48 A	0.892	151	7	145	30	3	th
	48 B	1.264	151	6	145	29	4	ch
	49 A	1.044	148	55	96	70	4	-
	49 B	0.977	147	43	118	62	5	-
	50 A	1.184	128	39	101	50	4	-
	50 B	1.301	138	24	122	41	8	ch
	51	1.253	143	22	129	41	6	-
	52 A	1.214	144	11	136	31	3	th
	52 B	1.168	144	13	136	34	5	ch
	53 A	0.949	139	26	124	43	5	-
	53 B	1.204	150	13	142	35	4	ch
	53 C	1.395	150	1	146	24	3	-
54 A	0.925	131	23	116	37	4	-	
54 B	1.297	146	3	142	25	7	-	
55 A	1.304	128	14	118	28	5	-	
55 B	0.958	142	- 2	140	19	10	th	
F	56 A	0.435	7	46	7	21	5	-
	56 B	0.301	351	47	355	23	12	ch
	56 C	0.238	355	45	358	20	11	-
	57 A	0.426	8	48	8	23	8	-
	57 B	0.309	27	56	20	31	11	ch
	57 C	0.302	30	55	22	31	11	th
	58 A	0.398	16	56	14	31	9	th
	58 B	0.299	31	50	24	26	11	ch
	58 C	0.350	103	56	69	50	79	-
	59	0.489	24	51	18	27	7	ch

Tableau 5 (Suite)

ARN SOMPORT (SUITE)

SITE	N°	J (10^{-2} Am^{-1})	IS		CP		V	TRAITEMENT
			D	I	D	I		
F(suite)	60 A	0.374	19	57	15	32	12	ch
	60 B	0.308	25	52	20	28	10	-
	61 A	0.520	25	57	19	32	8	-
	61 B	0.351	42	60	28	38	12	th
	62 A	0.461	15	54	13	29	8	-
	62 B	0.383	35	57	25	33	14	-
	63 A	0.384	13	51	11	26	9	-
	63 B	0.342	31	52	24	28	11	ch
	64 A	0.399	39	44	31	22	9	-
	64 B	0.175	54	34	46	15	11	-
	65 A	0.211	38	51	29	28	13	-
	65 B	0.323	29	48	23	23	8	-
	66 A	0.377	38	46	30	23	10	-
	66 B	0.335	50	46	39	25	7	th

Tableau 5 (Suite)

DESAIMENTATIONS SOMPORT

A - COMPOSANTES PRIMAIRES SITE B

N°	TYPE	INTERVALLE	IS		CP	
			D	I	D	I
11 A	th	550 - 660	216	19	135	0
11 B	ch	0 - 1137	118	18	134	- 1
15 B	ch	0 - 1137	125	9	125	- 8
16 A	th	200 - 660	130	12	129	- 13
16 B	ch	0 - 999	127	11	128	- 10
17 A	ch	9 - 999	129	15	132	- 13
20 A	ch	0 - 999	114	12	129	2
20 B	th	400 - 620	122	12	129	- 5
21 B	ch	0 - 1137	134	11	127	- 17
22 B	th	200 - 640	132	12	129	- 15

B - PLANS DE REAIMANTATION (POLES) -

SITE	N°	TYPE	INTERVALLE	N	Q	IS	
						D	I
A	1 A	th	0 - 620	7	$5 - 10^{-4}$	195	13
	3 A	ch	0 - 165	6	$4 - 10^{-5}$	220	17
	3 B	th	0 - 600	6	$3 - 10^{-4}$	203	19
	4	ch	9 - 333	5	$3 - 10^{-4}$	182	15
	5 A	ch	0 - 165	6	$3 - 10^{-4}$	223	15
	5 B	th	0 - 600	4	$1 - 10^{-3}$	232	20
	6 A	ch	0 - 333	8	$2 - 10^{-3}$	239	12
	7 A	ch	0 - 165	6	$9 - 10^{-5}$	213	11
	8 B*	th	0 - 600	4	$4 - 10^{-3}$	278	34
	10 A	ch	0 - 165	6	$2 - 10^{-4}$	230	10

Tableau 6

DESAIMANTATIONS SOMPORT (SUITE)

SITE	N°	TYPE	INTERVALLE	N	Q	IS	
						D	I
C	23 A*	th	0 - 600	6	$3 - 10^{-3}$	225	36
	23 B	ch	21 - 477	5	$1 - 10^{-3}$	49	58
	25 B	ch	21 - 477	5	$3 - 10^{-4}$	6	75
	26 A	ch	69 - 477	4	$4 - 10^{-6}$	18	56
	26 B*	th	0 - 450	3	$< 10^{-7}$	49	3
	27 A	ch	69 - 477	4	$3 - 10^{-6}$	344	50
	28 A	ch	69 - 477	4	$1 - 10^{-4}$	57	36
	29 B	ch	9 - 477	6	$4 - 10^{-6}$	51	47
	31 A	th	0 - 600	5	$3 - 10^{-4}$	59	59
	32 A*	th	0 - 600	4	$3 - 10^{-3}$	247	16
D	33 A	ch	0 - 165	6	$1 - 10^{-4}$	266	6
	34 A	ch	0 - 333	7	$5 - 10^{-6}$	71	23
	35 A*	ch	0 - 477	8	$2 - 10^{-3}$	135	60
	36 B	th	200 - 660	8	$6 - 10^{-5}$	79	11
	37 B	ch	0 - 69	5	$9 - 10^{-6}$	259	1
	38 A	th	0 - 640	6	$1 - 10^{-3}$	280	3
	39 B	ch	0 - 477	8	$9 - 10^{-6}$	85	27
	40 A	ch	0 - 477	8	$3 - 10^{-4}$	79	23
	41 A	th	200 - 660	8	$1 - 10^{-4}$	62	11
	42 B*	th	200 - 660	6	$4 - 10^{-2}$	330	76
E	44 B	ch	21 - 477	5	$9 - 10^{-5}$	274	60
	46 B	ch	0 - 333	7	$5 - 10^{-5}$	231	26
	47 B	th	200 - 660	8	$3 - 10^{-5}$	265	51
	48 A	th	200 - 640	5	$2 - 10^{-4}$	253	38
	48 B*	ch	0 - 333	7	$1 - 10^{-3}$	57	12
	50 B*	ch	3 - 333	6	$4 - 10^{-3}$	56	12
	52 A	th	200 - 660	8	$3 - 10^{-5}$	280	58
	52 B	ch	3 - 669	8	$2 - 10^{-4}$	241	39
	53 B	ch	3 - 69	4	$5 - 10^{-6}$	255	67
	55 B*	th	200 - 640	5	$8 - 10^{-4}$	37	32

Tableau 6 (SUITE)

DESAIMANTATIONS SOMPORT (SUITE)

SITE	N°	TYPE	INTERVALLE	N	Q	IS	
						D	I
F	56 B	ch		7	$5 - 10^{-6}$	188	44
	57 B	ch		6	$1 - 10^{-4}$	211	34
	57 C	th		6	$4 - 10^{-4}$	205	35
	58 A	th		7	$3 - 10^{-4}$	205	31
	58 B	ch		6	$7 - 10^{-4}$	196	40
	59	ch		7	$1 - 10^{-4}$	238	34
	60 A*	ch		7	$2 - 10^{-3}$	170	28
	61 B	th		4	$< 10^{-7}$	222	30
	63 B	ch		8	$6 - 10^{-5}$	217	37
66 B	th		7	$3 - 10^{-4}$	213	43	

Tableau 6 (SUITE)

* donnée écartée

n : nombre de données définissant le plan

Q : coefficient de qualité

C - GRANDS CERCLES MOYENS (POLES)

SITE	N	IS		CP1		CP2	
		D	I	D	I	D	I
A	9	215	15	26	37	5	37
C	7	36	57	313	65	300	65
D	8	80	11	77	12	79	12
E	7	254	50	289	51	297	51
F	9	214	37	229	59	236	59

Tableau 6 (SUITE)

D - AIMANTATIONS SECONDAIRES SITES A ET F

SITE	N°	TYPE	INTERVALLE	IS	
				D	I
A	1 A	th	500 - 620	70	63
	3 A	ch	165 - 477	70	70
	3 B	th	400 - 600	13	56
	4	ch	69 - 333	14	70
	5 A	ch	69 - 477	37	70
	5 B	th	0 - 600	14	67
	6 A	ch	165 - 477	44	72
	7 A	ch	9 - 477	12	78
	8 B	th	450 - 620	29	60
	10 A	ch	165 - 477	105	55
F	56 B	ch	69 - 477	19	46
	57 B	ch	69 - 477	16	53
	57 C	th	0 - 550	26	49
	58 A	th	450 - 660	28	53
	58 B	ch	21 - 333	15	51
	59	ch	21 - 477	35	54
	60 A	ch	69 - 477	13	56
	61 B	th	0 - 600	358	52
	63 B	ch	69 - 477	39	51
	66 B	th	500 - 600	95	53

Tableau 6 (SUITE)

POLES PERMIENS DE L'EUROPE STABLE
 (D'APRES VAN DER VOO ET AL., 1983) ET
 DIRECTIONS CORRESPONDANTES AU LIEU 44.1N, 7.1 E

P G V		AGE (Ma)	DIRECTION	
Latitude (S)	Longitude (W)		D	I
49.0	33.8	223	205.8	- 18.9
43.1	34.3	228	209.0	- 9.4
59.0	34.0	228	200.9	- 33.8
51.5	38.0	241	206.9	- 25.2
47.5	29.0	241	203.6	- 13.7
51.5	36.0	241	205.8	- 24.1
46.6	9.2	248	191.1	- 3.7

Tableau 7

POLES PERMIENS (P) ET PERMO TRIASIQUES (P-Tr) POUR LA PLAQUE ESPAGNOLE
 (D'APRES ZIJDERVELD ET VAN DER VOO, 1971) ET
 DIRECTIONS CORRESPONDANTES AU LIEU 42.8°N/0.5°W (SOMPORT)

P G V		AGE	DIRECTION	
Latitude (N)	Longitude (W)			
52	154	P-Tr	163.9	- 14.8
51	133	P-Tr	151.6	- 23.9
48.5	163	P	168.5	- 5.2

Tableau 8



R É S U M É

L'interprétation d'une direction d'aimantation en terme de marqueur d'un paléochamp est subordonnée à la fidélité de cet enregistrement depuis l'âge présumé de l'acquisition de l'aimantation par la roche, jusqu'à nos jours. Il est évident que la déformation des roches constitue une cause majeure de déviation d'une aimantation antétectonique. Cependant, si les problèmes posés par le plissement des roches sédimentaires par rotation rigide commencent à être bien cernés, l'effet de la déformation interne (strain) est peu connu et les roches montrant des évidences de déformation interne sont généralement évitées. Ce problème particulier des relations entre déviation de l'aimantation antétectonique et déformation interne s'inscrit donc dans les développements récents des méthodologies d'étude de l'aimantation rémanente des roches en zone orogénique.

Les résultats présentés ici concernent deux séries déformées : les schistes rouges permien des Alpes Maritimes et les schistes rouges permotriasiens pyrénéens au Col du Somport. Dans les deux cas, la déformation interne a été quantifiée pour chaque site d'échantillonnage paléomagnétique, à l'aide de marqueurs elliptiques (taches de réduction principalement). L'analyse vectorielle de l'aimantation rémanente des échantillons des Pyrénées montre que des réaimantations secondaires syn ou post-tectoniques masquent l'aimantation primaire anté-tectonique qu'il n'a pas été possible d'isoler ; pour cette raison l'étude de cette série n'a pas permis d'atteindre le but poursuivi. Par contre, dans le cas des Alpes Maritimes, une composante caractéristique primaire a été isolée dans la majorité des échantillons traités. L'analyse de cette série est présentée en deux parties distinctes : l'une comprend un ensemble de sites présentant une déformation interne croissante qui illustre un gradient de la déformation, l'autre concerne des sites répartis dans les flancs et la charnière d'un pli pluri-décamétrique. L'interprétation des résultats obtenus sur ces deux exemples permet de poser l'hypothèse d'un comportement passif de l'aimantation durant la déformation de la roche. De ce fait, la déformation inverse du vecteur aimantation a été effectuée sur chaque échantillon. La direction moyenne ainsi recalculée pour l'ensemble de la série passe un test statistique positif par rapport au groupement obtenu après simple correction de pendage et correspond aux directions connues pour l'Europe stable au Permien.

L'approche des mécanismes de déformation par goniométrie de texture permet, toujours en ce qui concerne les Alpes Maritimes, de montrer que des phénomènes de réorientation des hématites peuvent rendre compte du comportement passif de l'aimantation rémanente.