



HAL
open science

Relation entre la déformation et la fracturation des roches en Provence occidentale. (Bassin d'Aix -en-Provence et ses bordures). Applications géotechniques éventuelles.

André Paris

► **To cite this version:**

André Paris. Relation entre la déformation et la fracturation des roches en Provence occidentale. (Bassin d'Aix -en-Provence et ses bordures). Applications géotechniques éventuelles.. Tectonique. Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble, 1969. Français. NNT: . tel-00574598

HAL Id: tel-00574598

<https://theses.hal.science/tel-00574598>

Submitted on 8 Mar 2011

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

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

Doctorat de 3ème Cycle
N° d'ordre

THESE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR DE 3^{ème} CYCLE

Spécialité : Sciences de la Terre

Mention Géologie appliquée

PAR

André PARIS

RELATION ENTRE LA DEFORMATION ET LA FRACTURATION DES ROCHES EN PROVENCE OCCIDENTALE

(BASSIN D'AIX-EN-PROVENCE ET SES BORDURES) APPLICATIONS GEOTECHNIQUES EVENTUELLES

Soutenu le 1969 devant la Commission d'examen

MM.

R. BARBIER Professeur Président

J. BIAREZ — |

"Feu et Eau s'unirent, et de leur mariage naquirent la terre, les rochers, les arbres et tout le reste. La seiche lutta avec le feu et fut battue. Le feu lutta avec les rochers, qui vainquirent. Les grosses pierres combattirent les petites ; celles-ci furent victorieuses. Les petites pierres luttèrent avec l'herbe, et l'herbe remporta la victoire. L'herbe lutta avec les arbres, elle fut battue et les arbres gagnèrent. Les arbres luttèrent avec les lianes, ils furent battus et les lianes furent victorieuses. Les lianes pourrirent, les vers s'y multiplièrent, et de vers, ils se transformèrent en hommes.

(mythe polynésien)

SOMMAIRE

	pages
<u>BUT DE L'ETUDE</u> -----	1
<u>CHAPITRE I ; PRESENTATION REGIONALE</u> -----	3
La région étudiée. -----	3
Résumé stratigraphique et tectonique -----	3
Caractéristiques mécaniques de la série étudiée -----	8
<u>CHAPITRE II ; METHODOLOGIE GENERALE - DEFINITION DE TERMES</u> -----	9
Généralités sur la méthode -----	9
Signes conventionnels utilisés -----	10
Définition de termes -----	11
<u>CHAPITRE III ; ETUDE STATISTIQUE DES DEFORMATIONS DU PLAN SE STRATIFICATION</u> -----	13
Le problème -----	13
L'observable -----	13
La méthode -----	13
L'échantillon -----	15
Les résultats -----	15
Interprétation -----	20
<u>CHAPITRE IV ; LA BORDURE NORD DU BASSIN D'AIX (La Sainte-Victoire) et plus au NORD L'ANTICLINAL DE CONCORS</u>	
<u>L'ANTICLINAL DE PONT DE MIRABEAU</u> -----	25
A l'Ouest l'anticlinal de Bimont -----	25
description des déformations du plan de stratification -----	27
description de la fracturation -----	27
interprétation de cette fracturation -----	27
L'anticlinal de Bimont plus à l'Est -----	29
le plan de stratification -----	29
les plans de fracturation -----	29
essais d'interprétation de cette fracturation -----	31

	pages
Remarques sur quelques déformations bien représentées au Bimont et dans les environs -----	33
L'anticlinal de Concors -----	39
Situation générale -----	39
La fracturation -----	39
Fracturation de l'Anticlinal de Pont-de-Mirabeau -----	47
<u>CHAPITRE V : BORDURE SUD DU BASSIN D'AIX ; L'AURELIEN, L'ARC TRIASIQUE DE L'HUVEAUNE, L'ETOILE</u> -----	53
A l'extrémité est du bassin, la zone des brèches de Pourcieux -----	53
les déformations -----	53
la fracturation -----	57
interprétation de cette fracturation -----	57
Le front du chevauchement de l'Aurélien -----	57
interprétation -----	59
La bordure ouest de l'arc triasique de l'Huveaune -----	59
Le front du chevauchement de l'Étoile -----	64
dans la région de Mimet - Saint- Savournin -----	67
plus à l'Ouest entre le Col Sainte-Anne et Simiane-Collongue -----	67
La partie sud de l'Étoile -----	69
Au Sud Ouest de l'Étoile -----	72
<u>CHAPITRE VI : LE REMPLISSAGE DU BASSIN D'AIX</u> -----	75
Les déformations du plan de stratification -----	75
La fracturation -----	80
fracturation dans le Campanien supérieur -----	80
fracturation dans le Maestrichtien -----	83
fracturation dans le calcaire danien -----	83
fracturation dans le poudingue danien terminal -----	83
fracturation dans le Montien -----	84
fracturation dans le Thanétien -----	85
fracturation dans le Sparnacien-Yprésien -----	89
<u>CHAPITRE VII : SYNTHESE DES DEFORMATIONS</u> -----	99

	pages
<u>CHAPITRE VIII : SYNTHESE DE LA FRACTURATION</u> -----	103
Le remplissage du bassin -----	103
les couples de plans obliques à la stratification -----	103
les couples perpendiculaires à la stratification -----	105
Les bordures du bassin -----	107
les couples de plans obliques -----	107
les plans sensiblement perpendiculaires à la stratification -----	107
 <u>CHAPITRE IX : LA FRACTURATION ET LE GENIE CIVIL</u> -----	 109
L'intensité de la fracturation -----	109
la méthode -----	109
les résultats -----	109
Fracturation et altération karstique -----	112
rôle de la morphologie -----	112
 <u>CHAPITRE X : TABLEAU RESUME DES RESULTATS</u> -----	 113
 <u>BIBLIOGRAPHIE</u> -----	 115

BUT DE CETTE ETUDE.

Cette étude de la fracturation des roches a été initialement entreprise à partir de deux galeries creusées par la société du Canal de Provence, l'une au Nord du bassin d'Aix (galerie de Concors) et l'autre au Sud (galerie de l'Etoile) afin de mettre en évidence des critères géotechniques utilisables prévisionnellement pour les projets ultérieurs de la société.

Des résultats ont été acquis ; mais en même temps il est apparu nécessaire d'étendre les observations à une plus grande variété de situations géologiques, tant stratigraphiques que tectoniques, afin d'établir une relation fracturation-déformation sur un ensemble régional. Sous cet angle la partie orientale du bassin d'Aix, avec ses bordures nord et sud, pouvait être considérée, a priori, comme intéressante en raison de sa richesse en affleurements, d'autant que la précision du levé géologique (Aix au 1/80 000, 3e édition) y est très agréable.

Il est apparu que les déformations régionales n'étaient pas simples ; on s'est donc efforcé de les préciser en utilisant cet outil qu'est l'analyse structurale, déjà indispensable pour appréhender la géométrie de la fracturation.

Le problème de la fracturation se pose à deux niveaux :

- dans un premier stade, la description de la fracturation, à condition d'être traduite numériquement, peut être utile à la prévision du comportement mécanique d'un massif rocheux soumis à des sollicitations géotechniques.
- d'autre part, cette fracturation représente l'enregistrement de la réponse d'un ensemble géologique aux contraintes qui l'ont déformé. On a donc là une information géologique (et l'une des plus dense) mise en mémoire. Malheureusement ce que l'on observe, ce sont des signes dont la signification n'est pas encore très claire. Pour lire ces "traces" laissées par des événements passés, il faudrait pouvoir décoder sans ambiguïté cette information, ce qui n'est, actuellement, que très imparfaitement réalisable. En effet, plusieurs modèles d'interprétation ont été réalisés mais il semble que ces clés de décodages ne permettent pas encore un déchiffrement complet de la fracturation.

Les résultats exposés dans ce travail s'appuient essentiellement sur 15 000 mesures géométriques complétées par des appréciations qui s'efforcent d'être quantitatives, compte tenu des moyens mis en œuvre ; dans leur présentation qui va suivre on a séparé nettement les faits d'observation de l'interprétation qui en est donnée.

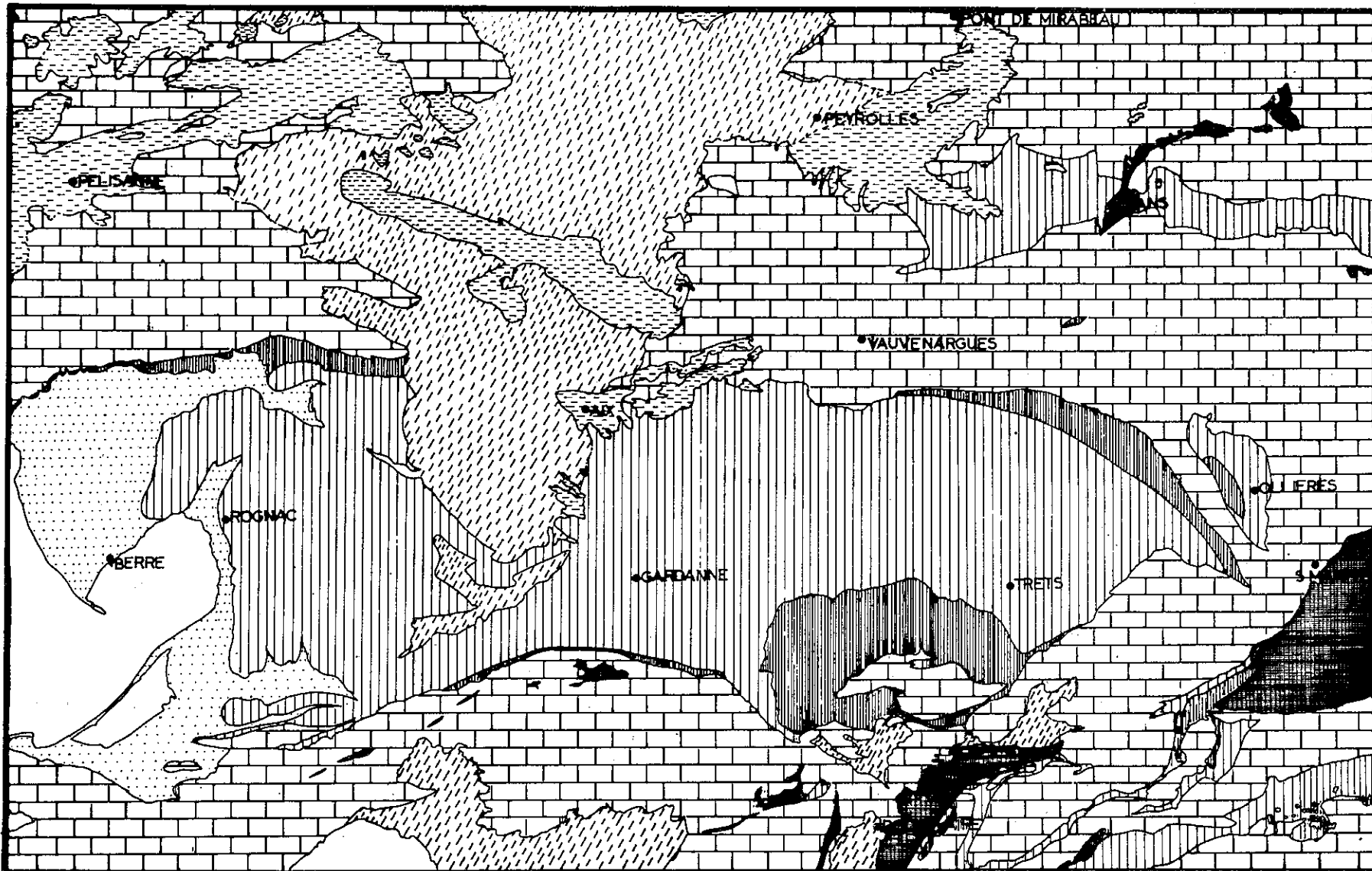




fig.1

ESQUISSE STRATIGRAPHIQUE DE LA CARTE AIX-EN-PROVENCE AU $\frac{1}{80\,000}$

 MIOCENE
 OLIGOCENE

 CRÉTACE SUPÉRIEUR
 JURASSIQUE CRÉTACE INFÉRIEUR

 ALLUVIONS



PRESENTATION REGIONALE

Cette étude est centrée sur la basse Provence calcaire, région géographiquement délimitée par les massifs cristallins des Maures et du Tanneron à l'Est, les vallées de la Durance et du Verdon au Nord, la basse vallée du Rhône à l'Ouest.

La personnalité marquée de cette région relève d'un ensemble de facteurs. Sur le plan géologique, l'individualité stratigraphique vient de la proximité des massifs cristallins (Maures Tanneron et vraisemblablement massifs cristallins actuellement immergés en Méditerranée) qui a permis une grande constance des sédimentations calcaires durant tout l'ère secondaire ; ce fait se remarque d'autant plus que fréquemment on oppose ces "faciès provençaux" aux sédimentations de l'aire vocontienne se développant au Nord.

L'architecture de la couverture individualise également cette région où les chaînons plissés ont une orientation générale est-ouest que l'on qualifie de pyrénéo-provençale.

LA REGION ETUDIEE

Le contour ne peut en être tracé avec la même précision que pour une étude basée sur un levé cartographique. En effet, la technique structurologique ne pouvant se limiter à une simple identification stratigraphique, une certaine qualité de l'affleurement est nécessaire sur laquelle vient se superposer nécessairement une densité variable d'observations et de mesures. Néanmoins l'essentiel des mesures a été relevé sur la partie orientale du bassin d'Aix (c'est-à-dire à l'Est du méridien d'Aix), en comprenant plus ou moins largement ses bordures nord et sud ; c'est ainsi que plus au Nord, une galerie du Canal de Provence a permis l'étude de l'anticlinal de Concors et que plus au Nord encore des mesures ont été effectuées sur l'anticlinal de Pont de Mira-beau. De même au Sud où une autre galerie a permis de bonnes mesures dans la partie sud de la chaîne de l'Etoile.

La carte de la figure 1 esquisse la géologie de cette région étudiée.

RESUME STRATIGRAPHIQUE ET TECTONIQUE

Les horizons lagunaires et marins du Trias moyen et supérieur sont les plus anciens dépôts visibles sur la feuille.

Au Jurassique, malgré de nombreuses lacunes stratigraphiques dues à des périodes de non sédimentation, la région reste constamment immergée.

A la fin du Malm, la tendance à l'émergence du massif des Maures conduit à la localisation des faciès calcaires bio-détritiques, souvent dolomitiques, du Malm et du Néocomien au Sud d'une ligne Martigues - Aix - Rians.

Dès lors, l'extension des faciès dolomitiques, sans être systématique, peut être considérable et intéresser une grande partie, sinon la totalité, du Crétacé inférieur (Etoile, Saint-Beaume).

Le faciès urgonien qui apparaît au Sud Ouest (Nerthe) dès l'Hauterivien moyen, occupe tout le Barrémien et se développe parfois jusqu'à l'Aptien inférieur. La localisation de ce faciès à l'Ouest et au Sud n'implique pas son absence originelle dans la partie est de la feuille, à l'approche du massif des Maures.

En effet, au Crétacé moyen, des soulèvements de plus grande amplitude à l'Est qu'à l'Ouest, permettent la formation de reliefs émergés (partie nord est de la feuille, axe primitif de l'Etoile et de la Sainte-Beaume). Il s'agit de l'isthme durancien. Les reliefs sont attaqués par l'érosion. Sur cette topographie d'érosion gisent les bauxites dont le mur est de plus en plus ancien vers le Nord Est (Urgonien à Allauch, niveau de base du Portlandien à Rians). Entre les ébauches plissées qui caractérisent la structure de l'isthme durancien, s'individualisent des sillons où se localisent les dépôts de l'Aptien et parfois de l'Albien. Le plus important s'étend de Martigues à la Sainte-Beaume, entre l'axe primitif de l'Etoile et les secteurs émergés du Nord de la feuille.

Au début du Crétacé supérieur, entre ces plis qui s'accroissent, vont se former des dépressions synclinales dans lesquelles la mer transgressive, puis les lacs du Crétacé supérieur et de l'Eocène déposent leurs sédiments. Le bassin de l'Arc, qui s'étend d'un bord à l'autre de la feuille, est la plus importante de ces dépressions. La série, dont la puissance dépasse 1000 m, débute par le Santonien marin et se termine par le Lutétien lacustre. Les reprises orogéniques du Bégudien et du Montien se traduisent, dans la sédimentation continentale, par des faciès détritiques grossiers localisés au voisinage des plis en cours de formation : brèches bégudiennes des Cadenaux, brèches de Sainte-Victoire (Bégudo-Rognacien) et du Tholonet (Montien). Mais le bassin lui-même n'a pas été affecté par ces mouvements de bordures. Le synclinal de Rians, situé dans le quart nord est de la feuille, montre une évolution analogue, mais la série est plus réduite, ne comprenant que le Rognacien et l'Eocène inférieur continentaux.

Les reliefs formés lors de la phase orogénique majeure d'âge lutétien vont nourrir la sédimentation détritique de l'Oligocène inférieur qui se localise dans les bassins subsidents d'Aix et de Marseille (dont seul le bord nord figure sur la feuille). Pendant que se déposent les gypses et marnes du groupe d'Aix (Oligocène supérieur), la région est soumise à une longue pénéplanation qui intéresse autant les structures plissées que les remplissages des bassins. Ainsi se modèlent la plate-forme d'abrasion sur laquelle la mer miocène va transgresser au Burdigalien (région de Salon), puis, après une émergence à l'Helvétien.

La régression marine de la fin du Miocène s'accompagne d'une phase d'érosion importante, responsable du déblaiement d'une partie du bassin de l'Arc (érosion des terrains meubles et développement d'un relief en cuesta) tandis que les reliefs de la partie nord de la feuille ont rajeuni. Les topographies fluviales de la Cluse de Mirabeau et de la vallée de la Durance ont commencé à évoluer plus tardivement mais avant que se manifeste la transgression de la mer pliocène. Cette dernière venant de l'Ouest emprunte alors la ria de la Durance en direction de Pertuis et de la Cluse de Mirabeau.

Les régressions successives observées depuis la fin du Pliocène jusqu'à l'oscillation flandrienne sont responsables des modelés actuels et principalement de celui de l'étang de Berre. Le colmatage alluvial de cette dernière unité géographique serait la conséquence de l'affaissement de la partie occidentale du bassin de l'Arc depuis la fin du Pliocène jusqu'à une période qui reste à déterminer.

On peut distinguer dans la feuille d'Aix quatre ensembles plissés principaux présentant chacun des caractères propres. Ce sont :

- au Sud du bassin de l'Arc, le système Etoile - Sainte-Beaume - Olympe ;
- au Nord Est du bassin de l'Arc, les plis très variés de Sainte-Victoire - Sambuc - Pallières. ;
- au Nord, séparés des précédents par le synclinal de Rians, les plis de Mirabeau - Vautubières - Montmajor, orientés Nord Ouest - Sud Est et déversés au Sud ;
- au Nord Ouest l'ensemble des Costes, du chaînon de Vernègues et des plateaux de Saint-Cannat - Pélissanne.

1. - Au Sud du bassin de l'Arc, l'anticlinal très dissymétrique, mais non couché, de la Nerthe, présente une zone axiale compliquée d'effondrements et de recouvrements locaux. Le grand pli de l'Etoile, constitué d'une succession d'unités synclinales ou monoclinales, chevauche au Nord Est le bassin de l'Arc. Le flanc inverse est inapparent sinon absent. Tout au plus doit-on lui attribuer le chaînon de Sousquières-Simiané qui apparaît plutôt comme un reliquat oriental de la Nerthe. Le Trias souligne l'axe du pli, lequel est très déporté vers le Nord.

Le massif tabulaire d'Allauch, au Sud Est de l'Etoile, doit son allure géométrique aux failles, soulignées par le Trias, qui l'encadrent. La zone plissée du massif (bordures sud et sud est), figure sur la feuille Marseille.

A l'Est, le Regainas passe à un pli-faille. Cette structure s'accroît dans les plis de l'Olympe, du Perdu et de l'Aurélien par un chevauchement vers le Nord Ouest, sur le bassin de l'Arc. La flèche est croissante vers l'Est.

A Saint-Maximin, le Jurassique de la bande d'Ollières, érigé en plis serrés au contact du chevauchement, ferme à l'Est le bassin de l'Arc.

Dans l'angle sud est de la feuille apparaît le massif de la Sainte-Beaume qui s'étend également sur les feuilles voisines. On y remarque essentiellement le synclinal de Crétacé supérieur du Plan d'Aups, qui, enfoui au Sud sous la série renversée de la haute chaîne, semble supporter au Nord une série normale (Roqueforcade-Nans), à laquelle se rattache naturellement vers l'Ouest le chaînon de Bassan-Roussargue-Gémenos. Le Crétacé supérieur enveloppe périclinalement, au Nord, une unité constituée par l'anticlinal de la Lare, et vient buter contre le Trias plissé de l'Huveaune.

Le cours transversal nord sud de l'Huveaune correspond à une brusque torsion de la bande triasique, mais non à un changement de direction de ces plis, qui demeure est-ouest. Redressés et érodés, ils sont, à Pont-de-l'Etoile, recouverts par l'Oligocène discordant.

2. - Au Nord du bassin de l'Arc, l'anticlinal de Sainte-Victoire chevauche vers le Sud le bord relevé et plissé du bassin. Plus à l'Est, le pli s'atténue et s'ennoe, relayé vers le Nord par les structures chevauchantes du Sambuc et de Pallières.

3. - Au Nord de la Sainte-Victoire se développe l'anticlinal faillé du Concors (à noyau jurassique supérieur) et les plis chevauchants vers le Sud de Vautubières et du Montmajor. Ce dernier est lié au petit arc triasique de la plaine de Valaves qui se prolonge vers le Sud-Ouest par le diapir de Rians.

4. - Dans le quart nord ouest de la feuille se dressent des reliefs plus accidentés au Nord (chaînon des Costes et d'Auron) qu'au Sud (plateau de Saint-Cannat, Lançon). Un accident situé sur le bord nord de la dépression miocène de Pélissanne - Lambesc, limite une structure (partie occidentale des Costes) dans laquelle se développent des écaillés de poussées du Nord Ouest vers le Sud Est. L'ensemble chevauche le Miocène.

Au Sud, les structures paraissent relativement simples. Les affleurements montrent des plis anticlinaux et synclinaux seulement faillés dans leur axe. Mais la présence à Eguilles d'une brèche assimilable à celle du Tholonet, et à plus de 1900 m de profondeur, montre que des accidents importants, non décelables en surface, viennent compliquer cette structure. Notons que ce secteur est nettement séparé du massif de Sainte-Victoire et du Concors par le bassin oligocène d'Aix qui masque sur son bord oriental un accident (faille Aix-Meyrargues) mis en évidence par des données géophysiques et hydrogéologiques.

D'un point de vue plus général, il faut remarquer que les structures visibles sur la feuille s'ennoeient de l'Est vers l'Ouest. Dans la moitié orientale, les grandes lignes tectoniques résultent de l'évolution des ébauches plissées apparues dès le Crétacé. La faible puissance de la couverture mésozoïque et les érosions antérieures à l'orogénèse majeure ont localisé les déformations dans les axes des anticlinaux, tandis que les bassins avec leur puissant remplissage fluvio-lacustre ne sont généralement pas affectés. Des séries surélevées ont pu glisser sous l'action de leur propre poids vers les synclinaux (Aurélien, Pallières et surtout Montmajor).

Ces caractères rapprochent ces structures de celles du Dracénois.

La moitié occidentale de la feuille montre des accidents qui intéressent une couverture beaucoup plus puissante. Au Sud, le chevauchement de l'Etoile refoule les assises du bord méridional du bassin d'Aix (synclinaux aptiens de Simiane, lambeau de Gardanne). Au Nord, la présence en profondeur du niveau dysharmonique des "terres noires" du Callovo-Oxfordien doit jouer un rôle prépondérant (structure profonde des Costes et du pli de Mirabeau, sur le bord nord de la feuille). Le passage au style dracénois des plis se fait au niveau de Sainte-Victoire, de la montagne de Vautubières et de l'Aurélien. (d'après la notice de la feuille d'Aix au 1/80 000, 3e édition).

SERIE STRATIGRAPHIQUE POSTERIEURE A L'EPISODE DURANCIEN

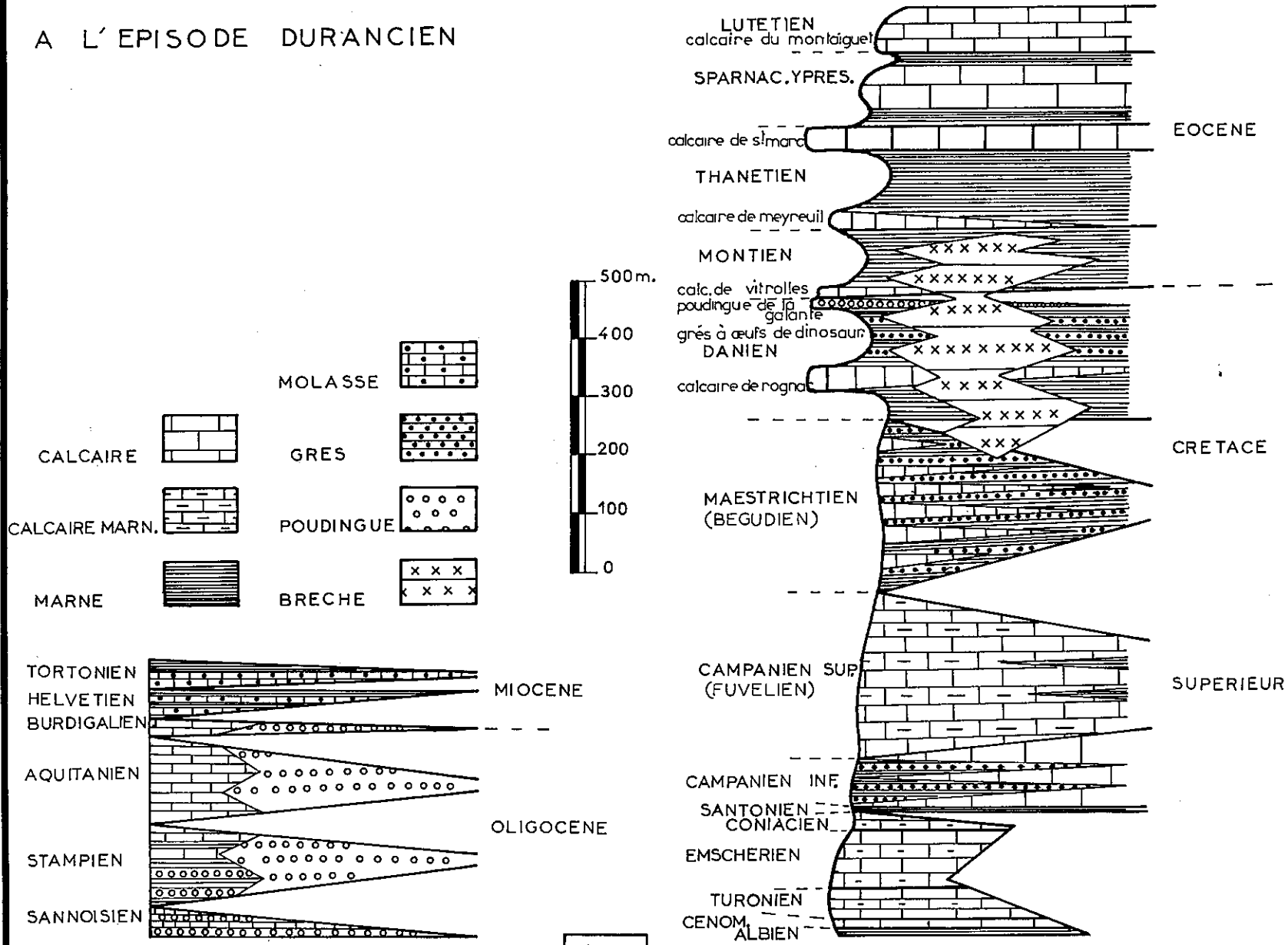
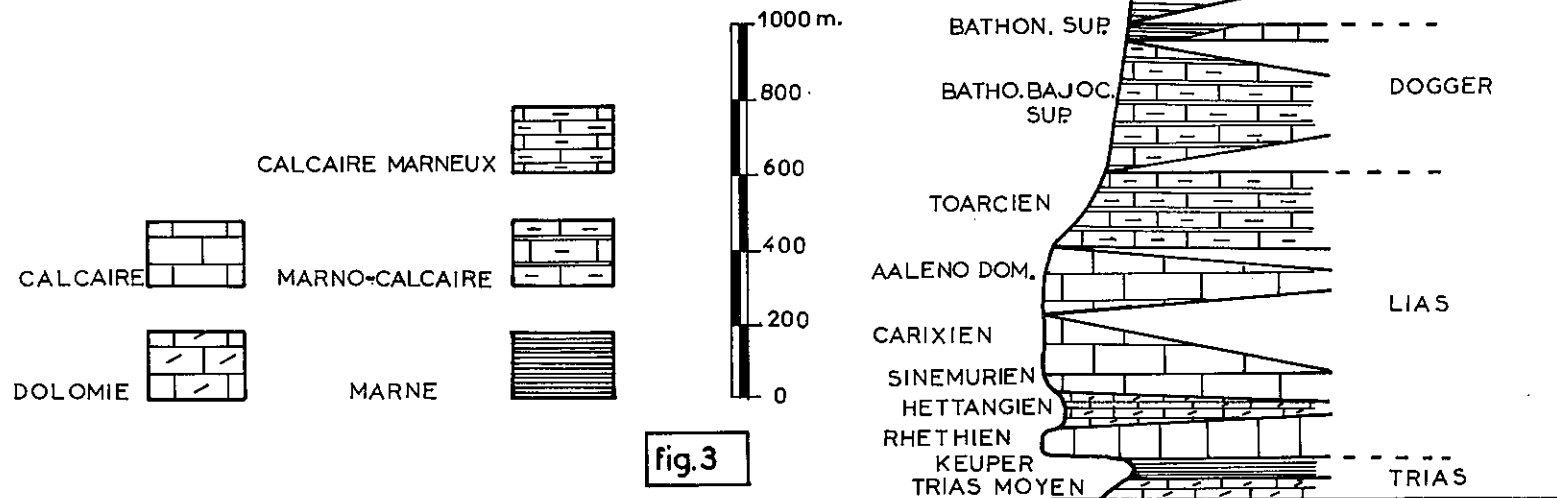


fig.2

SERIE STRATIGRAPHIQUE ANTERIEURE A L EPISODE DURANCIEN

Fig. 3 - La série jurassique-crétacé inf. a subi une érosion importante mais irrégulière durant l'émersion durancienne ; par ailleurs tous les étages stratigraphiques subissent de fortes variations d'épaisseur qui sont figurées. Mécaniquement le Trias joue un grand rôle en facilitant les glissements d'ensemble de ces formations très compétentes sauf au voisinage du Dogger.

Fig. 2 - Après l'émersion résultant de la formation de l'isthme durancien, les transgressions du Crétacé supérieur s'installent dans les gouttières E-W, d'autant plus tardivement que ces gouttières sont septentrionales ; dans le bassin d'Aix cette transgression s'effectue au Santonien. L'Eocène lacustre montre une succession de niveaux calcaires séparés par des argiles rouges.



CARACTERISTIQUES MECANIQUES DE LA SERIE STRATIGRAPHIQUE

Les figures 2 et 3 donnent une représentation de la série stratigraphique régionale avec les variations de faciès et d'épaisseur rencontrées pour les différents niveaux.

Cette vue d'ensemble de la couverture sédimentaire fait apparaître les grands traits suivants pour les propriétés mécaniques :

- niveau très incompetent * dans le Trias supérieur qui rend possible les glissements de l'ensemble de la couverture sur son substratum ;
- niveau compétent du Lias supérieur (100 à 300 m d'épaisseur) ;
- niveau peu compétent du Dogger et du Callovien-Oxfordien (300 à 700 m d'épaisseur) ;
- niveau compétent du Jurassique supérieur et du Crétacé inférieur (500 à plus de 1000 m) ;

Cette formation constitue l'ossature de la couverture sédimentaire ; leur épaisseur a été réduite par l'érosion consécutive à l'émersion durancienne.

Après le Crétacé inférieur les dépôts ne sont plus d'extension régionale mais se localisent dans des aires où la couverture se trouve fortement épaissie. Leurs caractères principaux sont :

- niveau peu compétent pour l'ensemble du Crétacé supérieur ;
- alternance de niveaux compétents et de niveaux incompetents dans l'Eocène ;
- l'Oligocène et le Miocène jouent un rôle mécaniquement négligeable.

* - La compétence d'une roche ne peut pas être définie de façon absolue par les seules propriétés mécaniques de la roche ; la courbe contrainte/déformation d'une roche fait intervenir :

- les propriétés mécaniques de la roche ;
- la grandeur moyenne de l'état de contrainte (essai triaxial) ;
- la vitesse de la déformation ;
- la température ;
- les conditions aux limites cinématiques.

Lorsque ces conditions sont déterminées, la compétence pourrait être assimilée à la fragilité c'est-à-dire à la différence entre la contrainte maximale supportée avant la rupture de la roche et la contrainte résiduelle qui continue à déformer la roche après sa rupture.

En géologie on utilise le terme de compétence dans un sens relatif (et qualitatif) pour différencier le comportement mécanique, par exemple entre une argile et un calcaire, lorsque tous les autres facteurs sont identiques.

CHAPITRE II

METHODOLOGIE GENERALE - DEFINITION DE TERMES

GENERALITES SUR LA METHODE

L'analyse structurale consiste à établir la géométrie des éléments d'un ensemble géologique ; c'est une technique de base pour traduire quantitativement des observations géologiques.

Le problème d'échelle :

Sur le terrain, les éléments mesurés ont généralement une grande extension, relativement à la nécessaire localisation de la mesure (par exemple, mesure ponctuelle de l'orientation d'une strate ayant une extension régionale). Les mesures étant ponctuelles, il est nécessaire d'établir une couverture de mesures suffisante sur l'étendue de l'objet étudié.

Que faut-il mesurer

Une couverture sédimentaire offre des éléments géométriques qui, pour l'essentiel, sont des plans et des lignes. Une définition géométrique d'un tel ensemble supposerait :

- la connaissance de l'orientation des plans et des lignes (données angulaires),
- la mesure de leurs dimensions,
- le repérage de leur position.

Il est évident que l'étude de terrain ne peut fournir que des précisions très inégales selon ces trois paramètres ; le maximum d'information est fourni sur l'orientation des éléments. En effet, sur l'affleurement, seules des portions d'éléments sont accessibles à l'observation et, s'il est possible d'obtenir des données angulaires il est, par contre, beaucoup plus difficile d'appréhender les dimensions de l'élément dont une grande partie reste cachée ; quant à la position, il est difficile de reporter des observations situées au mètre ou au décimètre près sur des cartes topographiques usuelles au 1/20 000. Néanmoins, dans ce travail, on s'est efforcé de préciser au maximum les dimensions de l'élément géométrique considéré.

Comment mesurer

Il est évident aussi que tous les éléments de la région parcourue ne peuvent être mesurés. Puisque le but de cette étude est d'obtenir des données générales valables sur l'étendue de la région, il se pose le problème de la représentativité des mesures dont l'approche a été la suivante ; en premier lieu une discontinuité dans les observations est imposée par la répartition même des affleurements. S'ils ne sont pas trop épars - et c'est le cas ici - on n'a pas à craindre les anomalies dues à un échantillonnage trop restreint.

Ensuite le choix relève de l'observateur et vient de l'impossibilité de pouvoir tout mesurer dans l'étendue d'un seul affleurement ; c'est là que réside la principale source de distorsion de l'objectivité, d'une part en raison de la transposition d'échelle entre la mesure et l'objet étudié, d'autre part en raison de la dispersion des mesures (abstraction faite de l'imprécision sur la mesure).


Il est important de toujours rechercher si la variation d'une grandeur mesurée se fait en suivant une loi ou si, au contraire, cette variation est simplement aléatoire autour d'une valeur plus fréquente ; par exemple un observateur tendancieux, qui ne mesurerait que les orientations extrêmes d'une même famille de diaclases, ferait apparaître deux groupements des valeurs autour de deux familles n'existant ni l'une ni l'autre. La solution consiste naturellement dans le relevé d'un plus grand nombre possible de mesures.

Il n'en reste pas moins que cette dispersion, que l'on s'efforce de neutraliser par des moyens statistiques, garde une signification physique et pourrait être prise comme variable à étudier.*

Report des mesures

Les mesures ont été reportées directement à l'aide des canevas polaires. On a utilisé le canevas de Wulf pour les lectures directes des groupements et le canevas de Schmidt, qui maintient l'équivalence des aires de la projection stéréographique, pour les cas où un comptage statistique était nécessaire.

Code utilisé :

- - pour les plans de stratification
- - pour les diaclases banales
- - pour les diaclases calciteuses
- - pour les diaclases calciteuses striées
- - pour les lignes (directions des stries)
-  - pour le sens des stries avec la convention suivante : c'est le sens du mouvement du compartiment supérieur qui est figuré.

* - On a pu observer le phénomène suivant dans un affleurement où la fracturation se composait de quatre familles de plans : deux familles montraient une dispersion constante, avec le même maximum de fréquence, d'une partie à l'autre de l'affleurement, c'est-à-dire que, même entre deux plans voisins, l'écart pouvait être maximum. Par contre, les deux autres familles montraient une dispersion très faible si l'on ne considérait qu'une partie de l'affleurement ; mais d'une partie à l'autre, tous les plans de ces deux familles se réorientaient dans leur ensemble. En définitive le diagramme synthétique correspondant à toute l'étendue de l'affleurement montrait une dispersion équivalente pour les quatre familles de plans, alors qu'en fait cette dispersion avait été acquise selon deux processus différents qui opposaient deux familles à deux autres.

DEFINITION DE TERMES

- Plan et famille de plans :

il s'agit toujours d'un ensemble de plans dont les orientations se regroupent autour d'une valeur centrale qui est prise pour identifier tout le groupement.

- Extension d'un plan :

donne une appréciation de la grandeur de ce plan selon une intersection avec la topographie.

- Plan réglé :

ce terme est utilisé comparativement pour préciser l'importance relative des irrégularités de détail que présentent les surfaces.

- Longueur d'un pli :

il s'agit, en coupe, de la distance horizontale comprise entre deux points d'inflexion ; équivaut à la demi-période d'une courbe périodique.

- Fracturation enroulée :

il s'agit d'une fracturation qui est entraînée par les déformations des strates et qui suit le même changement d'orientation qu'elles.

- Dérouler la fracturation :

consiste à remettre la stratification horizontale et à faire subir le même mouvement à la fracturation.

- Direction transverse :

il s'agit de la direction transversale aux grandes structures est-ouest, c'est-à-dire de la direction nord-sud.

CHAPITRE III.

ETUDE STATISTIQUE DES DEFORMATIONS DU PLAN DE STRATIFICATION

LE PROBLEME

Les couches géologiques sont un empilement de surfaces qui, après leurs déformations, constituent un ensemble tectonique ; les plis sont classiquement les éléments de cet ensemble, ainsi que les unités descriptives des déformations.

Dans la méthode géologique habituelle on commence par accumuler les descriptions microrégionales que l'on juxtapose selon un ordre géographique ; ensuite, une comparaison de proche en proche permet de différencier les caractères purement locaux de ceux qui, par leur permanence, acquièrent de la généralité.

Une autre méthode est utilisée dans ce chapitre pour essayer de mettre en évidence d'emblée certains caractères généraux des déformations, sans passer par le stade des descriptions cumulées.

L'OBSERVABLE

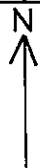
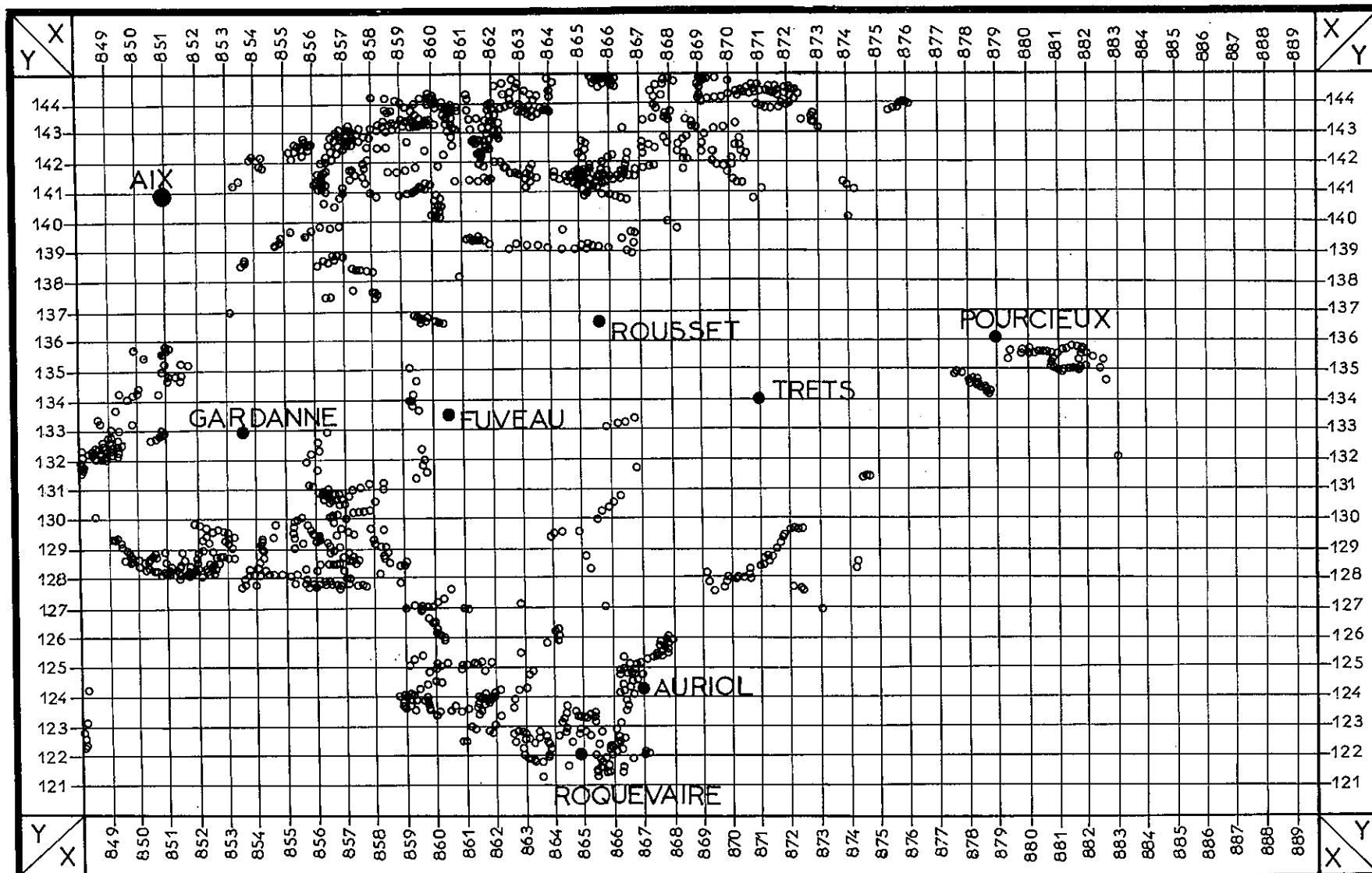
Une déformation serait complètement connue si l'on pouvait suivre exactement la trajectoire de tous les points de la masse déformée. Or, il y a des difficultés majeures à cette connaissance directe. En géologie, seul est directement accessible à l'observation un état résultant, formé de l'intersection du volume géologique par la surface topographique. De plus on limite généralement l'observation à l'orientation dans l'espace de portions de plans stratigraphiques, en prenant le Nord et l'horizontale comme axes repères ; les prélèvements d'orientations sont discontinus.

En faisant l'hypothèse qu'à l'état initial le plan stratigraphique était horizontal, on ne peut réellement apprécier que la réorientation de ce plan à l'état final. Il est quelquefois possible d'ajouter des traces locales du sens des translations dont la grandeur n'est jamais directement accessible.

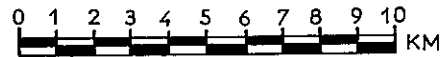
Malgré ces limitations à la connaissance de la déformation, la seule position des plans stratigraphiques en affleurement permet des hypothèses sur un ensemble géologique plissé, et ceci presque indépendamment de toute chronologie stratigraphique.

LA METHODE

En prélevant au hasard des orientations des plans stratigraphiques, et secondairement en dissociant la direction de l'horizontale de ce plan de son inclinaison, on aura des indications quant à la forme décrite par ces plans. Par exemple, si l'on considère l'intersection d'une surface quelconque (la topographie) avec une surface de cylindre d'axe horizontal (pli exemplaire) on obtiendra une répartition statistique des horizontales qui fera apparaître un seul maximum centré sur l'orientation de l'axe du cylindre ; si l'axe du cylindre n'est plus horizontal mais incliné, on aura une même allure de



REPARTITION DE L'ÉCHANTILLON DE PENDAGES
(CARROYAGE LAMBERT)



phénomène, avec seulement une plus forte dispersion autour de la valeur centrale. Par contre, des axes de plis ayant des orientations différentes mais stables, feront apparaître une répartition multimodale des orientations des horizontales.

L'ECHANTILLON

On considère ici 1000 mesures d'orientation des couches.

Ces mesures sont réparties sur la partie est du bassin d'Aix (à l'Est d'Aix) et largement sur ses bordures (voir figure 4).

Ces mesures sont relevées selon des cheminements qui peuvent être considérés de hasard ; l'espacement entre les mesures est quelconque mais évite * les accumulations singulières.

Toutefois, il est à craindre des anomalies de répartition liées à ce type d'échantillonnage et des conclusions quantitatives ne peuvent être tirées des histogrammes ; tout au plus l'allure de la courbe peut être prise en considération.

Afin de mettre en évidence les anomalies liées à l'échantillonnage non rigoureux, la population des directions est diaphragmée pour considérer séparément les directions associées aux pendages nord et celles associées aux pendages sud ; l'allure de la répartition doit alors se retrouver dans les deux sous-ensembles pour ne pas être liée à l'échantillonnage.

De plus, la population des directions est diaphragmée en trois sous-ensembles stratigraphiques :

- 1 - Jurassique - Crétacé inférieur ;
- 2 - Crétacé supérieur ;
- 3 - Dano-Eocène.

Ceci pour tenter de mettre en évidence des différences dans les déformations de ces sous-ensembles, dont l'étude classique a montré qu'elles se développaient à des époques différentes.

LES RESULTATS

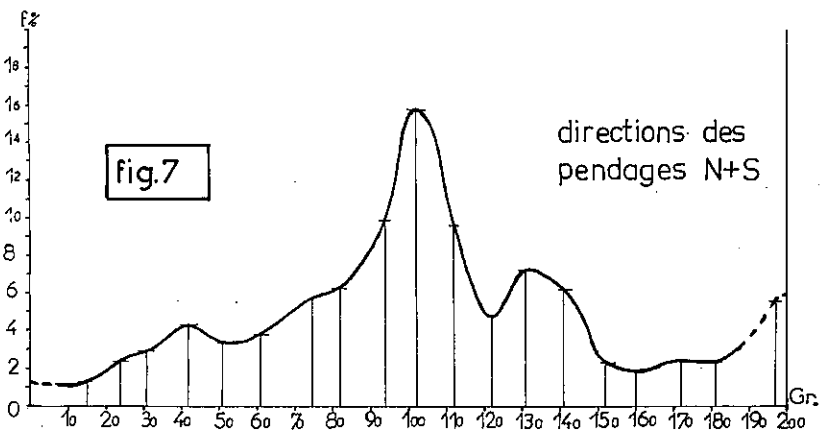
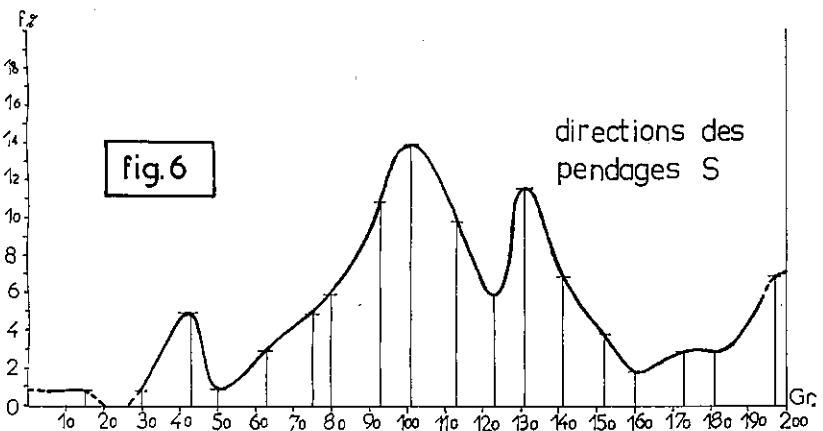
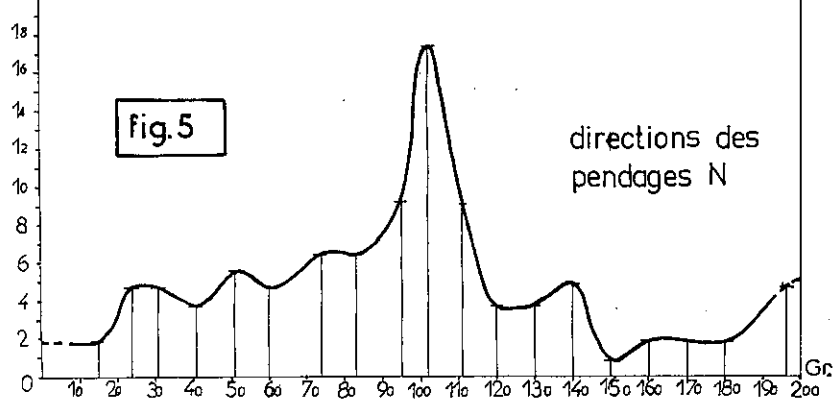
- Sous-ensemble Dano-Eocène :

l'histogramme des directions de pendage nord + sud (fig. 7 et 13) montre :

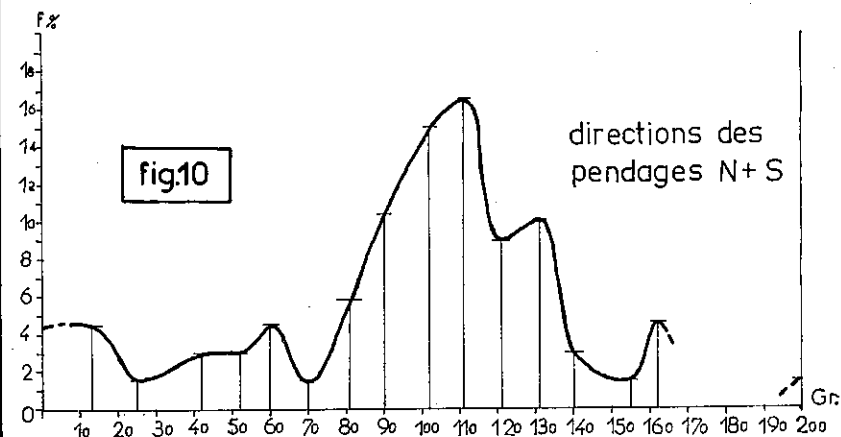
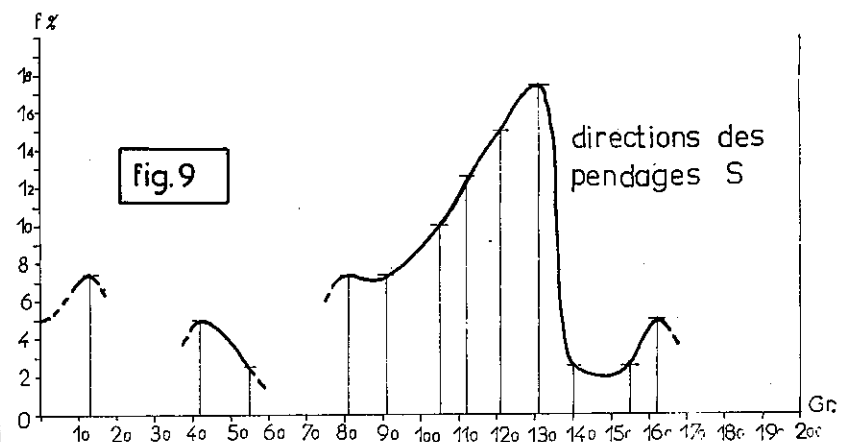
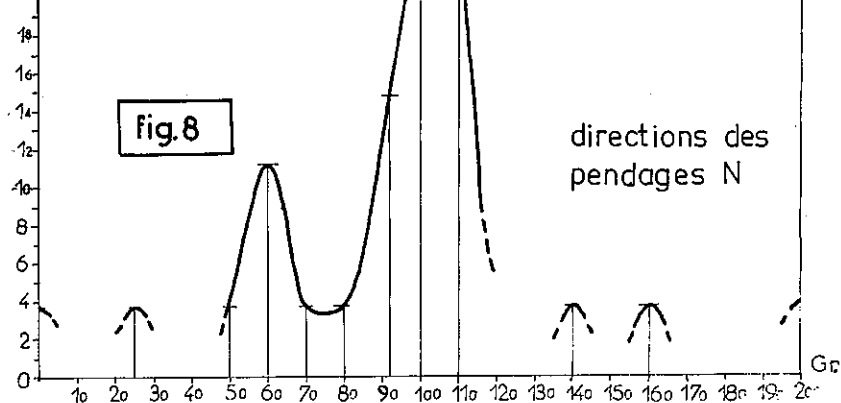
- . un maximum principal bien centré sur N102 .
- . deux maxima intermédiaires sensiblement centrés sur N40-45 et N130-135.
- . les directions perpendiculaires au maximum principal, c'est-à-dire voisines de N zéro présentent une fréquence anormalement forte.

* - Les pendages ont été mesurés au cours des cheminements ; mais localement un nombre plus important de mesures a été accumulé pour la construction de diagrammes ; afin de ne pas perturber la répartition de l'échantillonnage, ces accumulations singulières ont été supprimées pour cette étude statistique. En effet de telles concentrations introduiraient un excès de "poids" de certaines valeurs.

HISTOGRAMMES DES DIRECTIONS DANO-EOCENE



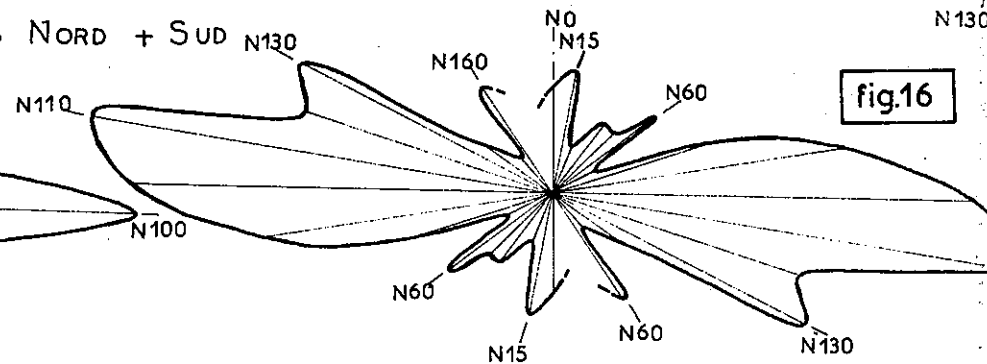
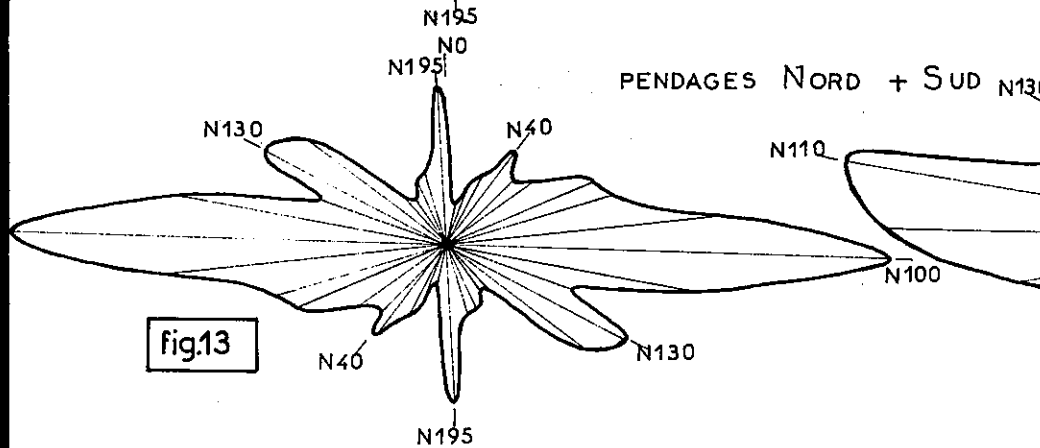
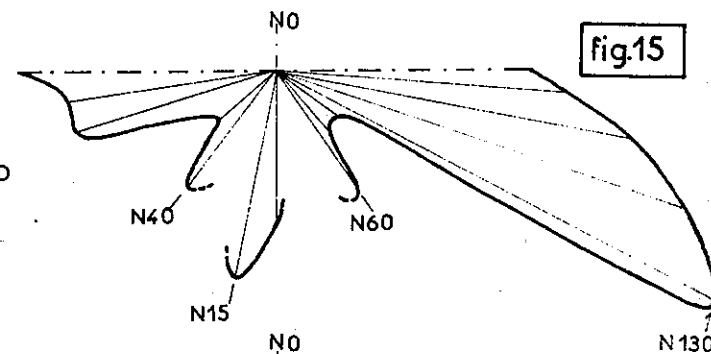
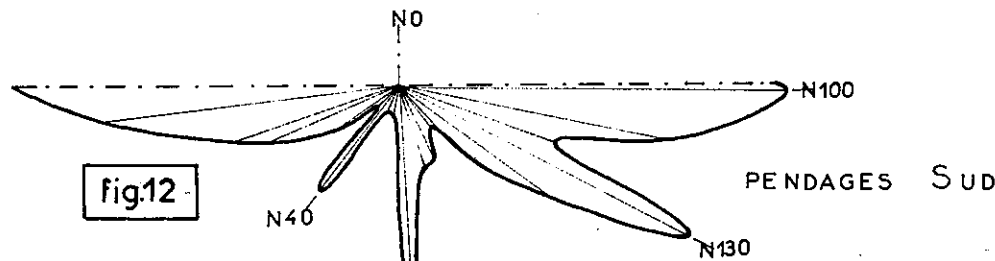
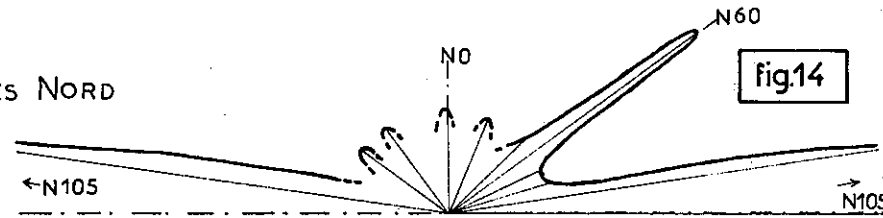
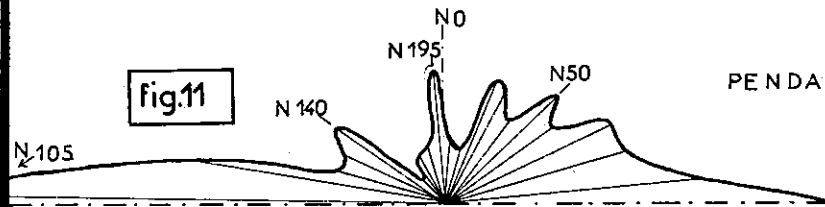
HISTOGRAMMES DES DIRECTIONS CRETACE SUP.



HISTOGRAMMES ENROULES FIGURANT LA DISTRIBUTION DES DIRECTIONS DE PENDAGE

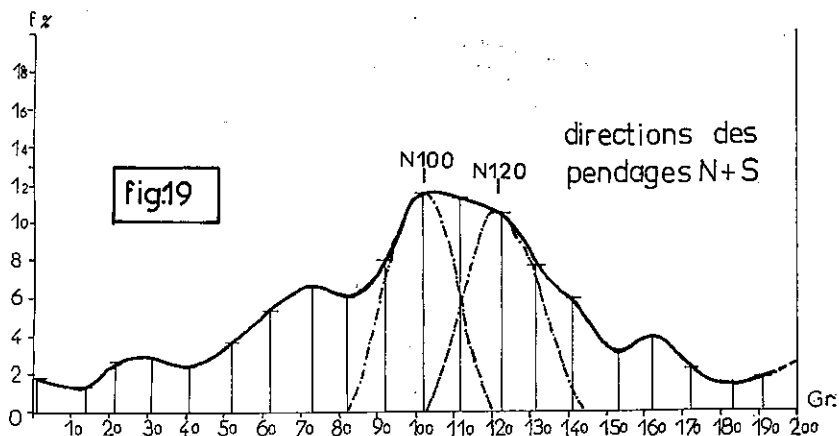
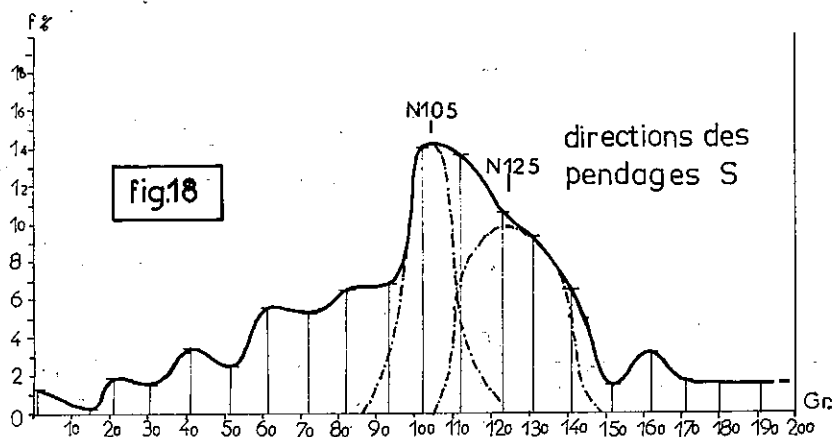
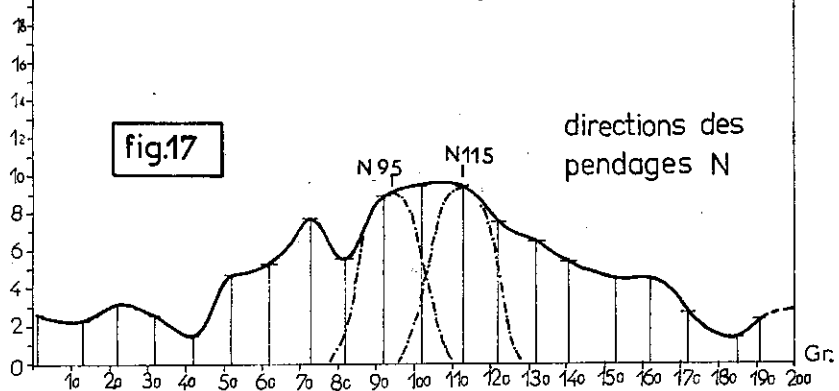
DANO-EOCENE

CRETACE SUPERIEUR

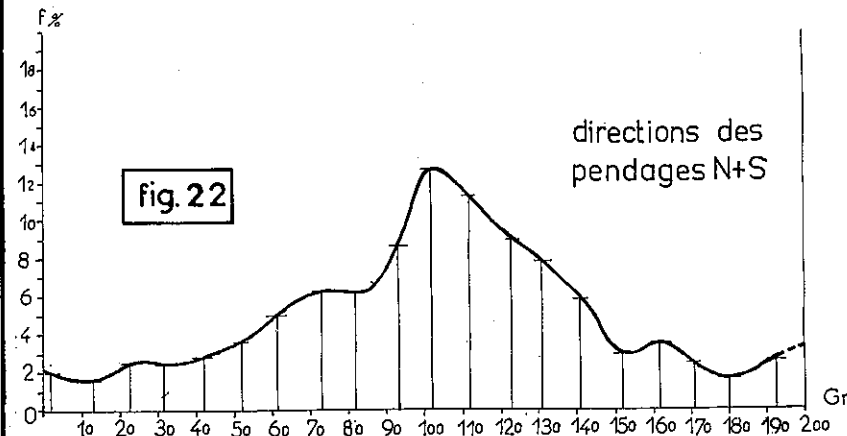
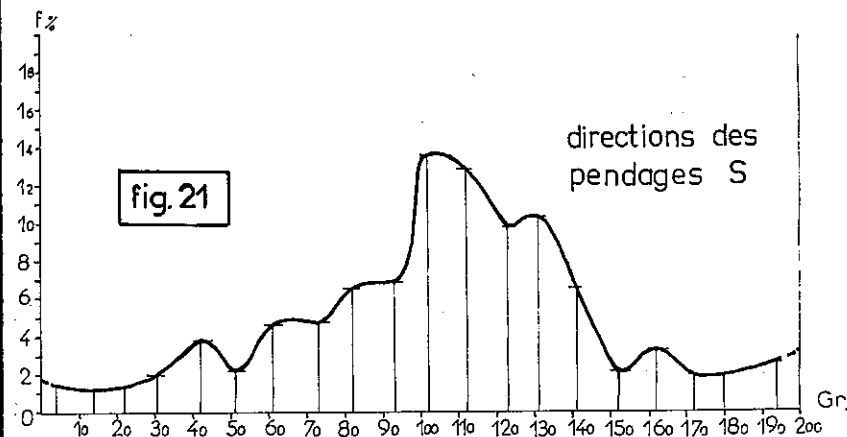
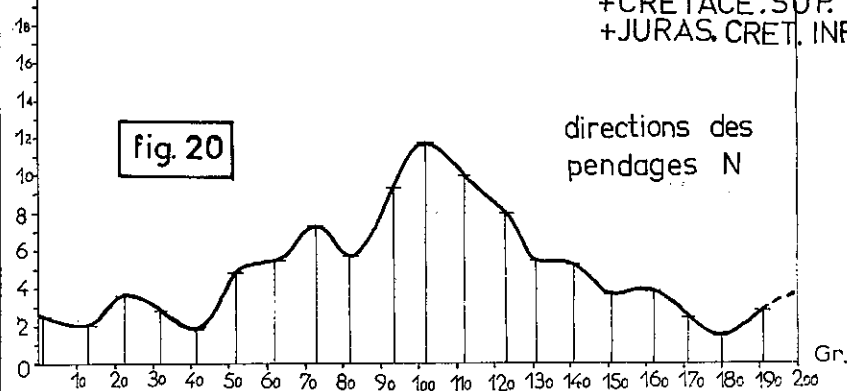


Ces histogrammes montrent un maximum, unimodal centré sur la direction N100 (sauf pour les pendages S dans le crétacé supérieur où, de plus, l'échantillon est insuffisant), deux maxima intermédiaires pour les valeurs N40 et N130 ainsi qu'une fréquence élevée pour les directions méridiennes.

F% HISTOGRAMMES DES DIRECTIONS JURAS. CRET. INF



F% HISTOGRAMMES DES DIRECTIONS DANO-EOCENE +CRETACE.SUP. +JURAS.CRET. INF



HISTOGRAMMES ENROULES FIGURANT LA DISTRIBUTION DES DIRECTIONS DE PENDAGE

JURASSIQUE CRETACE INFERIEUR

DANO.EOC.+CRET. SUP.+JURAS. CRET. INF

fig. 23



fig. 26

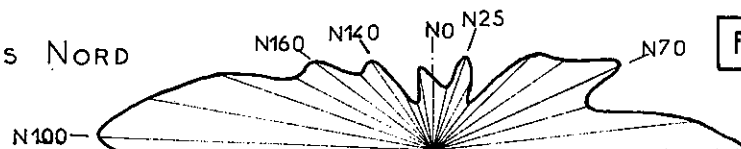


fig. 24

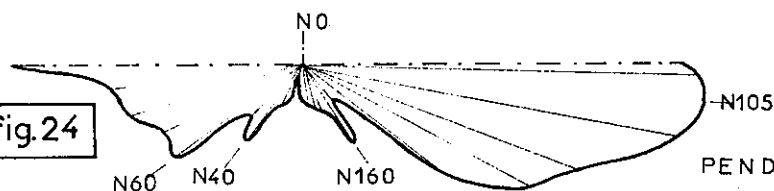


fig. 27

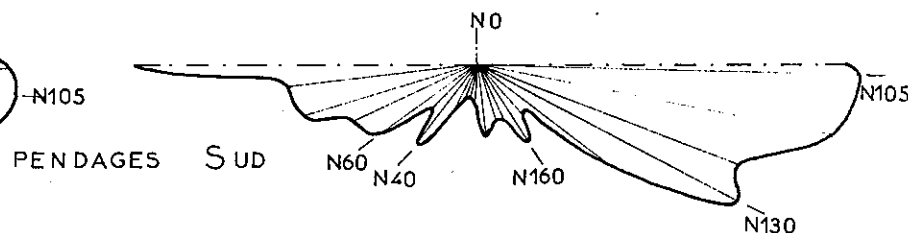


fig. 25

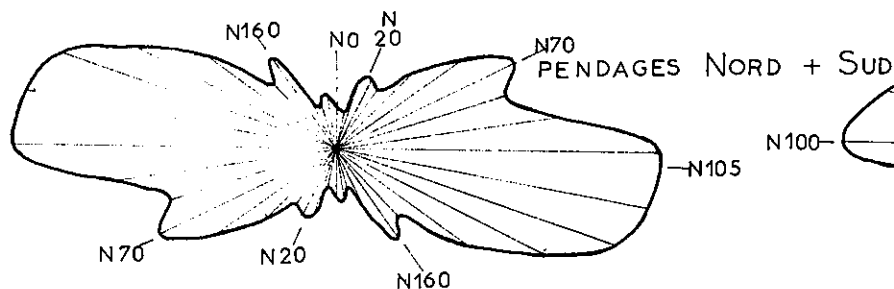
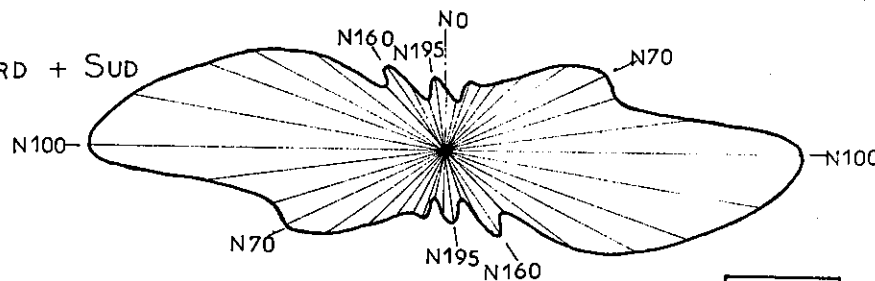


fig. 28



Ces histogrammes montrent un maximum étalé qui n'est plus unimodal mais qui se compose de deux valeurs : N100 et N120 ainsi qu'une fréquence élevée pour les directions méridiennes.

Ces caractéristiques n'apparaissent pas liées à l'échantillonnage puisqu'elles se retrouvent nettement sur les histogrammes partiels où les pendages nord et sud sont étudiés séparément (fig. 5 - 6 et 11 - 12).

- Sous-ensemble Crétacé supérieur :

le faible nombre de mesures s'y rapportant ne permet pas d'observations très stables.

- . les directions des pendages nord et sud sont centrées différemment : N105 et N130 pour leur maximum principal;
- . deux maxima intermédiaires (N60 et N160) se retrouvent assez nettement sur tous les histogrammes (fig. 8-9-10 et 14-15-16) ;
- . les directions voisines de N zéro ont une fréquence anormalement forte.

- Sous-ensemble Jurassique - Crétacé inférieur :

- . le maximum principal apparaît fortement étalé sur toutes les courbes (fig. 17-18-19 et 23-24-25) ;
- . deux maxima intermédiaires sont constants : N60-75 et N160 ;
- . les fréquences des directions voisines de N zéro ont une valeur anormalement élevée.

- Ensemble Jurassique - Crétacé inférieur + Crétacé supérieur + Dano-Eocène (fig. 20-21-22 et 26-27-28) :

Ces histogrammes présentent la somme des caractéristiques précédentes, devenues plus confuses par la superposition de leurs décalages.

INTERPRETATION

- Le maximum principal, peu étalé et bien centré dans le Dano-Eocène, encore peu étalé mais décalé dans le Crétacé supérieur, s'étale dans le Jurassique - Crétacé inférieur. L'on sait par ailleurs que le sous-ensemble Jurassique - Crétacé inférieur a subi deux déformations principales qui se sont cumulées : la déformations conduisant à la formation de "l'isthme durancien", et celle de la fin de l'Eocène.

Le Dano-Eocène n'a subi que la deuxième déformation.

On peut faire l'hypothèse que cette superposition des déformations est responsable de l'étalement du maximum principal dans le sous-ensemble Jurassique - Crétacé inférieur où il est remarquable de voir que le maximum principal de l'histogramme se décompose en deux harmoniques privilégiés centrés N100 et N120 soit avec un écart de 20 gr (fig. 17-18-19). Cet écart est hypothétiquement interprété comme le résidu de la différence entre l'orientation du plissement de la fin de l'Eocène (N100) et l'orientation du plissement antérieur de "l'isthme durancien" ayant initialement des axes encore plus éloignés de N100 (N130 - N140 peut-être) et ramenés à N120 par le plissement de la fin de l'Eocène.

Il est possible de construire un modèle théorique correspondant à la superposition de deux plissements superposés écartés de 25 Gr. par exemple (photo de la maquette photo 1) ; un tel modèle fait apparaître une caractéristique principale : les plis résultants n'ont qu'une extension limitée, sans continuité axiale.

C'est là une caractéristique très connue des plis provençaux.

- Le décalage du maximum principal, que l'on observe dans le sous-ensemble du Crétacé supérieur malgré un échantillon trop restreint, n'est peut-être que le résultat du moulage du bassin sédimentaire où la transgression s'installe sur un plissement antérieurement orienté.

Dans le sous-ensemble Dano-Eocène le maximum principal, centré N100-N105 avec un faible étalement, traduit l'orientation du plissement de la fin de l'Eocène.

- Les maxima intermédiaires N40-60 et N130-160, sensiblement perpendiculaires, posent un problème d'interprétation ; leur constance montre qu'ils ne peuvent simplement passer pour une perturbation de la répartition liée à l'échantillonnage. La description particulière des déformations (Chapitre IV et chapitre V) permettra un essai d'interprétation de ce caractère statistique général dont on verra qu'il se rattache à la fréquence anormale des directions voisines de N zéro (chapitre VII).

LA VALEUR DU PENDAGE PRISE COMME VARIABLE STATISTIQUE

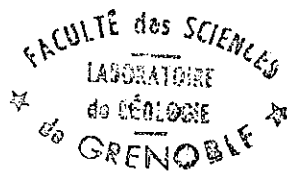
Une étude assez parallèle peut être conduite en considérant, cette fois, la répartition statistique de la valeur du pendage (inclinaison des couches).

La population n'est plus diaphragmée en fonction de l'appartenance stratigraphique du plan mais seulement en fonction des pendages nord et sud.

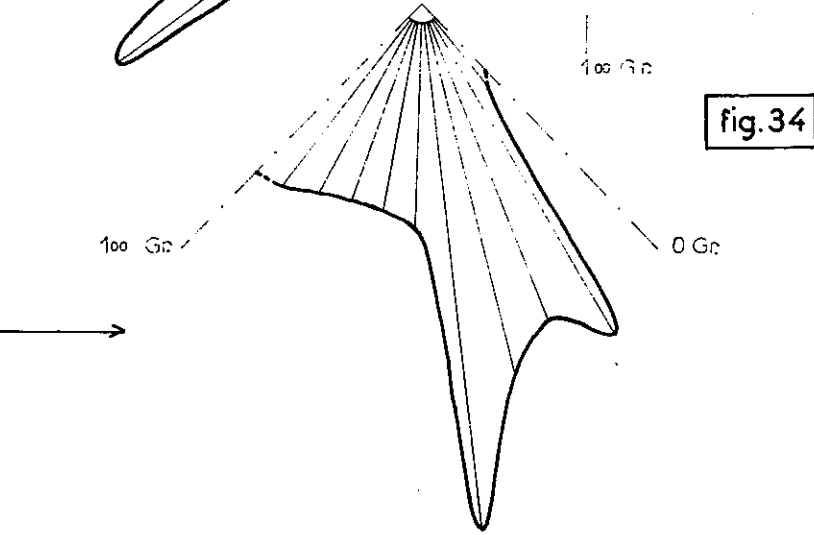
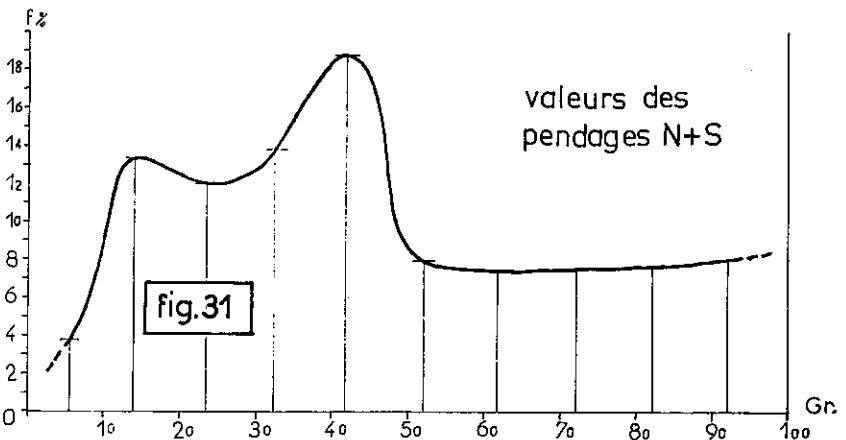
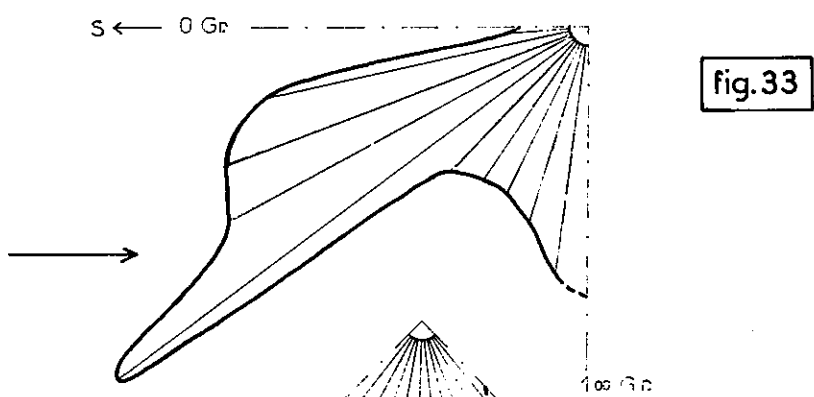
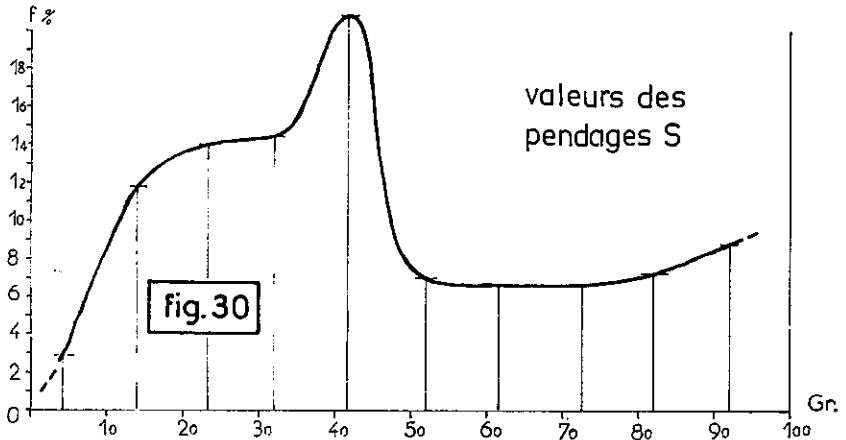
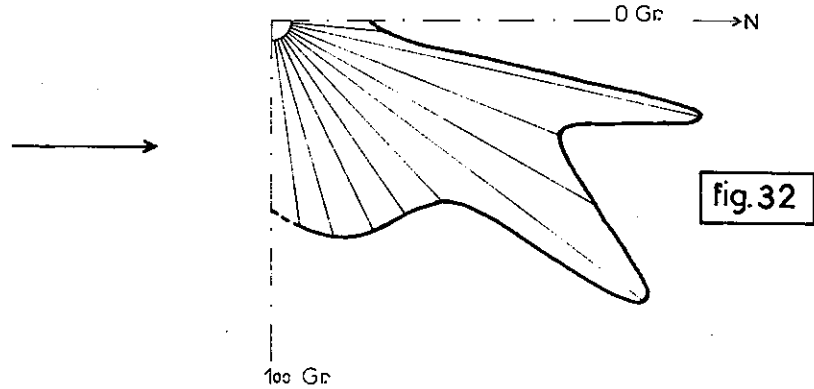
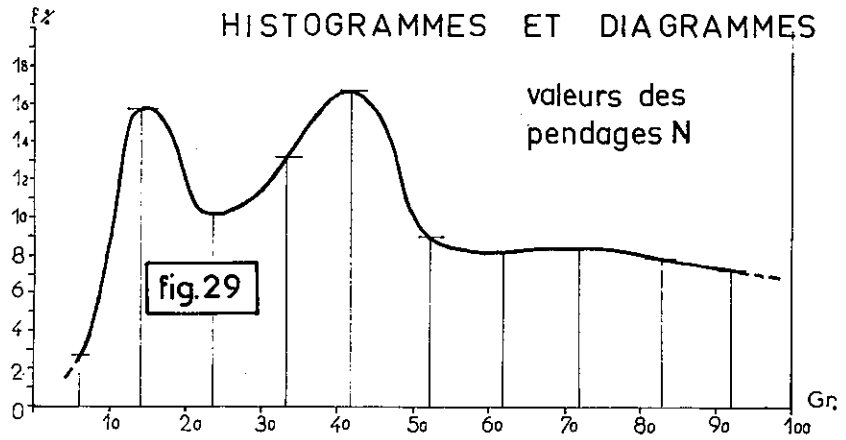
Les courbes obtenues sont toutes nettement bimodales ; (fig. 29-30-31 et 32-33-34) deux valeurs des pendages sont les plus fréquents : 15 gr. ; il est à remarquer que 45 gr. domine dans le sous-ensemble des pendages vers le Sud, ce qui traduit une dissymétrie de structure.

La distribution bimodale montre la discontinuité existant entre les aires tabulaires chevauchantes et les aires peu déformées des fonds de bassins d'une part, et les aires où se développent des plis d'autre part.

Malgré une bonne visualisation de l'intensité des déformations régionales, ces histogrammes, relatifs à la valeur des pendages, sont d'un intérêt plus limité que les courbes de répartition des directions du plan stratigraphique.



HISTOGRAMMES ET DIAGRAMMES DES VALEURS DE PENDAGES



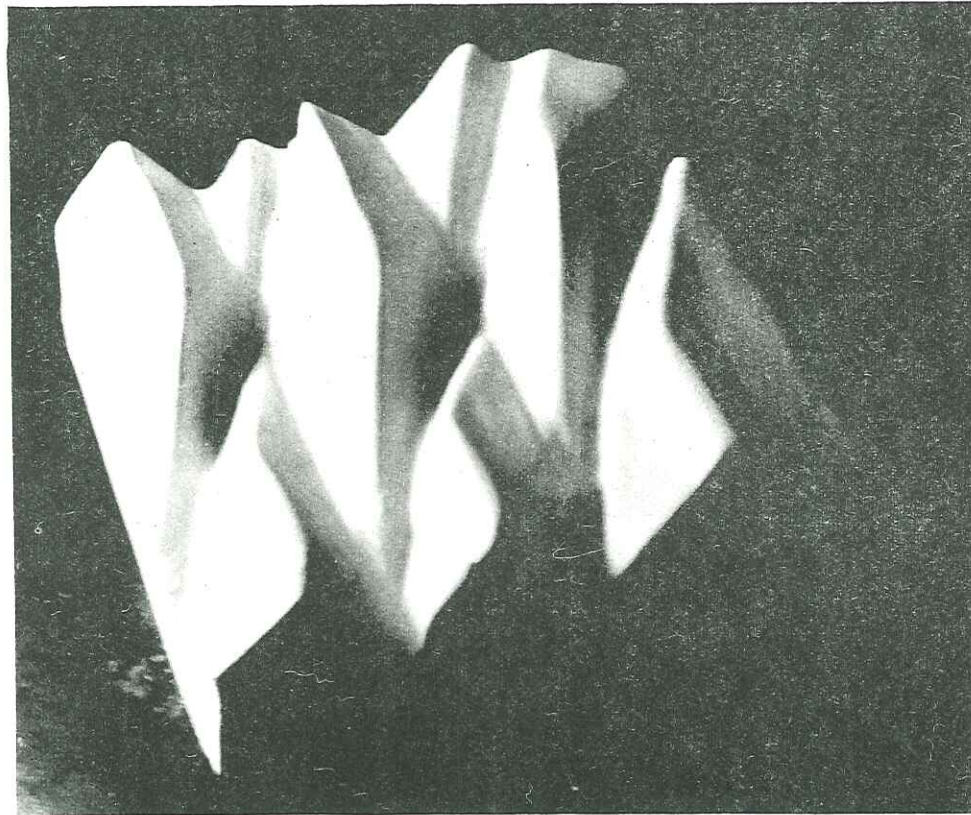


Photo 1 : Maquette construite par la superposition de deux plissements faisant entre eux un angle de 25 gr. On remarque le manque d'extension axiale des anticlinaux qui se terminent par des périclinaux coniques.

CHAPITRE IV

LA BORDURE NORD DU BASSIN D'AIX (LA SAINTE-VICTOIRE) ET PLUS AU NORD L'ANTICLINAL DE CONCORS ET L'ANTICLINAL DE PONT DE MIRABEAU

Puisque l'on ne considère que la partie orientale du bassin (à l'Est d'Aix), on peut admettre que la bordure nord est constituée par une seule grande structure : la Sainte-Victoire au sens large. Schématiquement on se trouve en présence d'un anticlinal de Jurassique supérieur qui se déverse vers le Sud sur le remplissage Crétacé supérieur et Eocène du bassin ; ce caractère tend à donner son individualité à cette bordure nord.

Néanmoins l'unité structurale n'est qu'apparente. L'histoire géologique régionale est complexe ; plusieurs déformations se sont superposées et se sont combinées avec des érosions pour aboutir à de nombreuses complications dans le détail. Actuellement, et malgré les nombreuses tentatives, il n'existe pas de synthèse admise par tous.

Une nette opposition entre l'Est et l'Ouest de la chaîne a été remarquée. A l'Ouest, l'anticlinal (dit anticlinal de Bimont) est très érodé et d'importantes formations - datées du Danién et de l'Eocène - envahissent le bassin ; actuellement cette région est morphologiquement basse et supporte une sédimentation miocène de faible épaisseur restée pratiquement horizontale.

Par contre, vers l'Est, l'anticlinal est moins érodé et les formations bréchiqes daniennes et éocènes sont beaucoup moins développées. Morphologiquement la chaîne s'élève jusqu'à une altitude de 1 000 m ; le Miocène disparaît mais une surface d'érosion très continue jalonne remarquablement le sommet. Cette partie haute de la chaîne constitue plus restrictivement la Sainte-Victoire - anciennement Mont Venture -.

La relation entre la partie haute et la partie basse de la chaîne n'est pas encore complètement élucidée mais il est admis que l'anticlinal de Sainte-Victoire relaie l'anticlinal de Bimont par un chevauchement de faible importance *.

A L'OUEST, L'ANTICLINAL DE BIMONT

C'est surtout le Lias qui affleure dans cette partie érodée, et les carrières qui l'exploitent dans la banlieue d'Aix permettent de bonnes observations.

* - De nombreuses études ont été faites et sont actuellement en cours dans cette bordure nord du synclinal d'Aix. Il apparaît que cette zone a toujours été tectoniquement très active, relativement à l'aire qui la borde au Sud. Il semble que prochainement on pourra mettre en évidence des déformations très récentes ; on a montré, par exemple, qu'un éboulis quaternaire du flanc sud de Sainte-Victoire (éboulis de Saint-Antonin) était tectonisé. Des études en cours essaient de dater la surface d'abrasion sommitale qui pourrait être Miocène malgré sa forte déformation. De plus cette région est séismique.

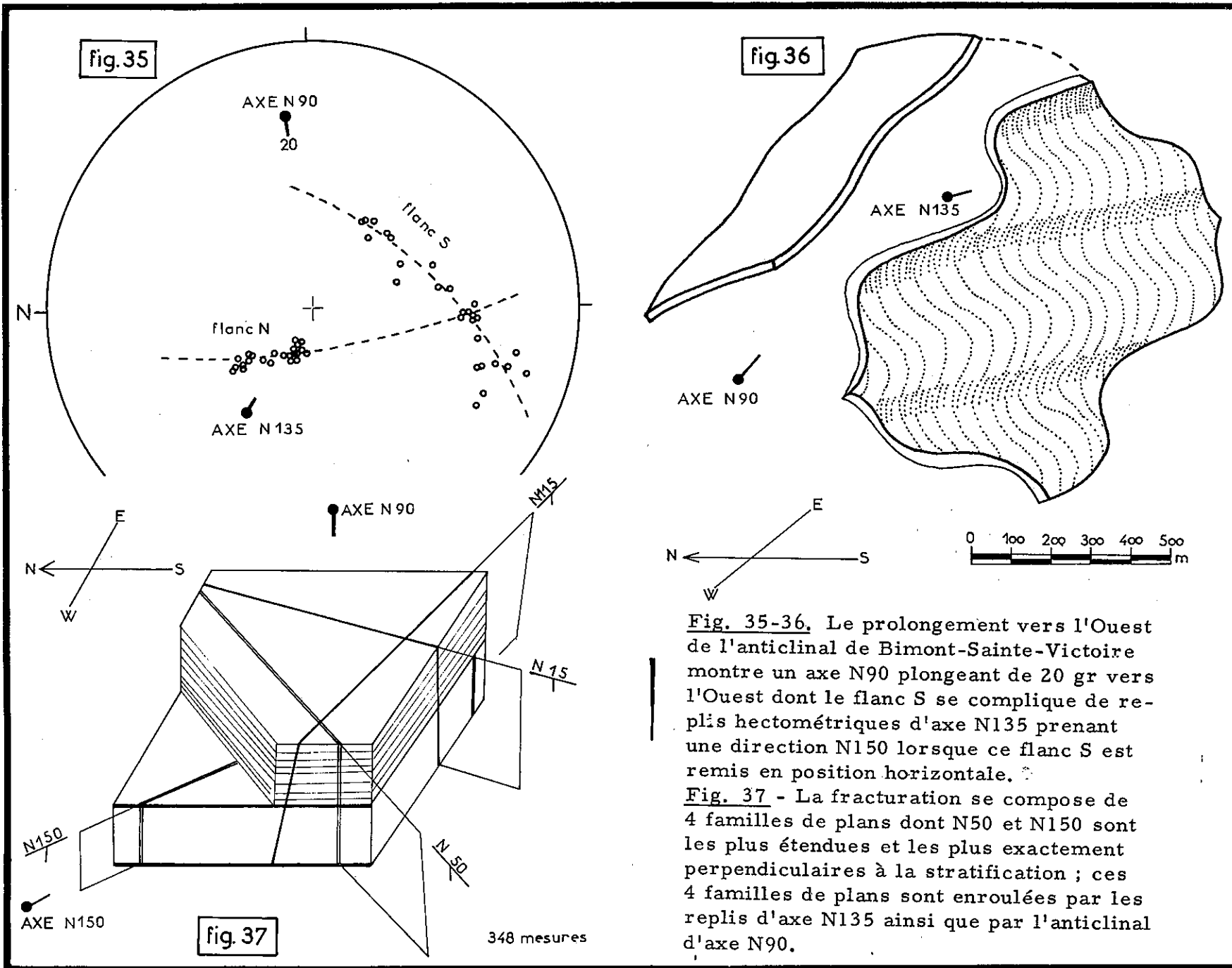


Fig. 35-36. Le prolongement vers l'Ouest de l'anticlinal de Bimont-Sainte-Victoire montre un axe N90 plongeant de 20 gr vers l'Ouest dont le flanc S se complique de replis hectométriques d'axe N135 prenant une direction N150 lorsque ce flanc S est remis en position horizontale.

Fig. 37 - La fracturation se compose de 4 familles de plans dont N50 et N150 sont les plus étendues et les plus exactement perpendiculaires à la stratification ; ces 4 familles de plans sont enroulées par les replis d'axe N135 ainsi que par l'anticlinal d'axe N90.

DESCRIPTION DES DEFORMATIONS DU PLAN DE STRATIFICATION

En grand, on se trouve dans le prolongement vers l'Ouest de l'anticlinal de Sainte-Victoire avant son ennoyage sous l'Oligocène et le Miocène. L'axe peut être construit et les figures 35 et 36 le montrent orienté N 90 et plongeant de 20 gr vers l'Ouest.

Les strates ont une épaisseur métrique.

Le flanc sud de cet anticlinal se complique de replis bien développés et dont l'axe construit présente une orientation N 135 avec un plongement de 50 gr vers le Sud Est. Ces replis sont de longueur hectométrique et se superposent donc à la grande structure avec une orientation sensiblement différente (fig. 35 et 36).

DESCRIPTION DE LA FRACTURATION

Les carrières situées dans la banlieue est d'Aix ont permis une étude assez fine sur une étendue voisine de 1 kilomètre carré. Dans tous les cas, et quel que soit le plan considéré, cette fracturation est systématiquement enroulée par les déformations du plan de stratification (c'est-à-dire par le grand pli d'axe N 90 et par les replis d'axe N 135). Puisque l'on connaît les axes de plis il est possible de remettre les diagrammes dans une position comparable ; par exemple - et c'est ce qui a été fait - en remettant les stratifications horizontales. Les plans de fracturation se répartissent alors selon quatre familles (fig. 37) :

Les familles N 50 et N 150

Ces deux plans sont toujours présents dans les formations calcaires ; leur extension est décamétrique à hectométrique et leur espacement sensiblement métrique. Le plan N 50 présente un meilleur réglage que le plan N 150. Un niveau marneux du Lias montre que le plan N 150 ne s'y développe pas. Après le déroulement qui remet la stratification horizontale ces deux familles sont verticales (fig. 37) ; ces deux plans sont donc perpendiculaires à la stratification et perpendiculaires entre eux.

Les familles N 15 et N 115

Ces deux familles ne sont pas systématiquement présentes dans la formation ; leur développement est local avec une extension plus limitée que pour les familles précédentes. De plus, après le rabattement de la stratification, ces deux plans ne sont pas rigoureusement verticaux ; en particulier N 115 prend une inclinaison de 75 gr vers le Nord Nord Est (fig. 37).

INTERPRETATION DE CETTE FRACTURATION

Dans l'opération de déroulement des plans de stratification l'axe des replis, initialement dans une direction N 135, se trouve entraîné et prend une position horizontale tandis que son orientation devient N 150. On voit alors que cet axe vient se superposer à la fracturation la plus étendue. Le fait que cette fracturation soit très étendue laisse supposer qu'elle est primaire et qu'elle a pu être développée par l'état de contrainte associé à la formation de l'isthme durancien. Peut-on conclure que les replis N 150 ont une même origine durancienne ? Ce n'est pas vraisemblable car ces replis enroulent la



Photo 2 : montre un pli hectométrique d'axe N 135 dans le Lias du flanc Sud de l'anticlinal de Sainte Victoire immédiatement à l'Est d'Aix. Les diaclases sont nettement "enroulées" par cette déformation oblique relativement à l'axe N90 de la grande structure.

fracturation secondaire N15 - N115 dont on peut penser qu'elle résulte des déformations majeures de la fin de l'Eocène ; ces replis apparaissent s'être installés, sinon postérieurement à l'épisode éocène, du moins dans son évolution tardive (voir synthèse des déformations). Le plus important reste cette superposition des états de contrainte qui provoque deux plissements orientés N90 et N150, et qui se retrouve dans une double fracturation orientée N50 - N150 et N15 - N115.

L'ANTICLINAL DE BIMONT PLUS A L'EST DANS LES ENVIRONS DU BARRAGE DE BIMONT

Les affleurements sont dans le Jurassique supérieur ; la carrière d'où ont été tirés les matériaux de construction du barrage permet l'observation d'une fracturation très évoluée.

Le plan de stratification

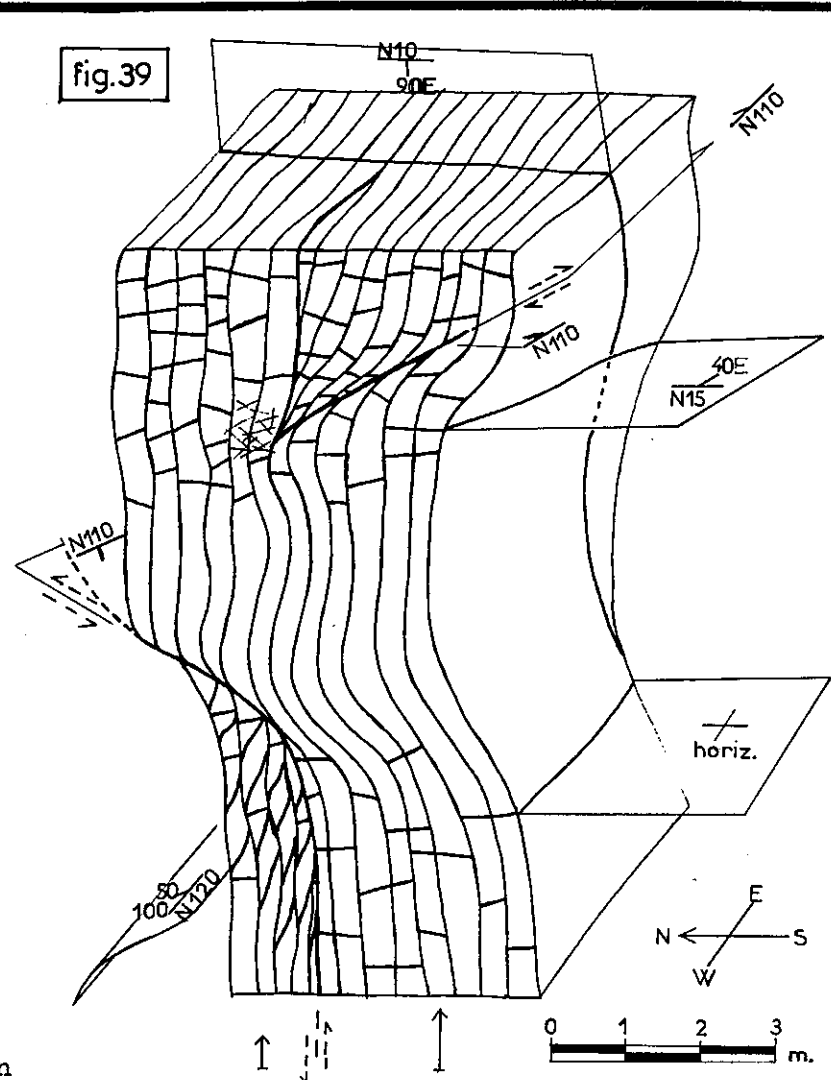
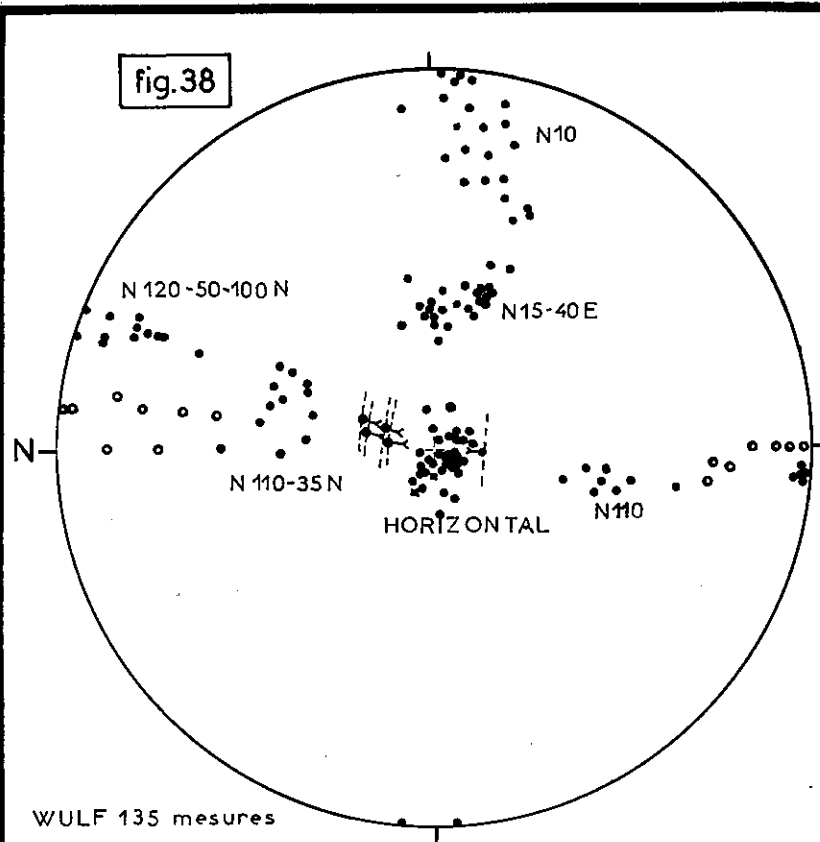
Les strates de ce Jurassique supérieur ont une épaisseur allant de 10 cm à 1 m - Séquanien en petits bancs - et une inclinaison verticale (en grand) avec une direction N110. Cette verticalité des couches résulte d'un serrage important de l'anticlinal de Bimont dans cette zone. Dans le détail le plan de litage stratigraphique change fortement de pendage ; de telles observations aux flancs de la gorge de l'Infernet et dans les environs du barrage, où ce phénomène est particulièrement intense, pourraient être interprétées comme un simple fauchage des couches. En fait il s'agit d'une déformation intime de la masse rocheuse litée. Les strates subissent un laminage qui peut aller jusqu'à la striction complète. Ces déformations sont particulièrement inhomogènes et s'accumulent dans certains secteurs de la masse ; à ce stade de l'étude il n'a pas été possible de mettre en évidence les facteurs qui déterminent ces accumulations de déformations (fig. 38 - 39).

LES PLANS DE FRACTURATION

Le couple de plans N110 pentés Nord et Sud

Ces deux familles s'imposent à l'observation par leur extension qui va du mètre au kilomètre. A l'échelle de la carrière ce sont les plans les plus étendus après la stratification ; ici ce sont les plans pentés vers le Sud qui dominent, mais il ne s'agit que de variations locales car, dans les environs, le plan penté vers le Nord peut devenir prépondérant. Les déformations des strates sont en relation directe avec ces plans comme le montre la figure 39. Le laminage leur est aussi très visiblement associé. Ces deux plans portent des stries dont la direction et le sens sont repérés (fig. 39). Une courbure caractéristique termine ces plans en les faisant passer dans la stratification où, dans leur prolongement, le cisaillement couche sur couche est fortement accumulé *.

* - On verrait plus à l'Est, dans le flanc inverse de la Sainte-Victoire proprement dite, que des plans de cisaillement analogues - essentiellement pentés vers le Nord - prennent une extension plusieurs fois hectométrique. Ces plans contribuent fortement au chevauchement vers le Sud de la structure. Il est probable que le plan par lequel la Sainte-Victoire chevauche l'anticlinal de Bimont est de ce type, avec seulement une extension devenue kilométrique. On a là un phénomène balayant une gamme importante d'échelle (de 1 à 1 000) : depuis la fracturation métrique jusqu'à la discontinuité kilométrique classiquement cartographiable.



Cette fracturation montre une déformation des strates en relation avec un couple de plans de cisaillement de direction N110 ; ces plans peuvent prendre une extension kilométrique et participer au chevauchement de la structure ; le plan N10. 90E est très karstifié ; son remplissage karstique peut être plissé ; l'origine de ce plan est donc antérieure au serrage tardif de l'anticlinal de Bimont ; par contre les plans obliques N110 résultent vraisemblablement de ce serrage tardif car l'angle aigu qu'ils font entre eux admet l'horizontale pour bissectrice qui, théoriquement définit la position de la contrainte principale ; le sens des stries observées confirme cette position horizontale de la contrainte principale.

L'angle aigu que ces deux plans déterminent varie en raison de leur forme en S ; (il est bien évident que parler de "plans" dans un ensemble géologique n'est permis qu'avec une certaine approximation sous l'angle de la géométrie). Mises à part ces terminaisons courbées l'inclinaison est stable et permet de définir un angle aigu d'environ 80 gr qui admet approximativement l'horizontale pour bissectrice.

Le plan oblique N120 - 50 à 100 N

Il se distingue des grands plans précédents par une extension limitée à l'épaisseur d'une seule strate ; de plus ce plan ne se développe que dans les zones visiblement très laminées (fig. 39).

Le plan horizontal

Il est lui aussi très peu étendu et ne traverse en continuité que une ou deux strates.

Le plan N15 - 40E

Présente le même aspect que le plan horizontal précédent mais donne lieu à un groupement nettement individualisé sur le diagramme de la figure 38.

Le plan N10

Est pratiquement vertical et d'extension plus que décamétrique ; les rejeux de la stratification le désorganisent ; la karstification s'y introduit systématiquement.

ESSAI D'INTERPRETATION DE CETTE FRACTURATION

Les plans obliques et de grande extension, dont l'angle aigu a une grandeur de 80 gr., peuvent s'interpréter comme étant les discontinuités cinématiques résultant du développement d'un état de contrainte ayant déformé la formation rocheuse jusqu'à l'état de plasticité. (L'important laminage des strates est un autre argument en faveur de la mise en plasticité de la masse rocheuse). Cet état de contrainte peut être repéré par rapport aux plans de cisaillements observables ; la bissectrice de l'angle aigu situe la contrainte majeure. On a alors :

- la contrainte principale nord-sud et pratiquement horizontale (bissectrice de l'angle aigu) ;
- la contrainte mineure verticale ;
- la contrainte intermédiaire est-ouest et horizontale.

On voit que la contrainte principale est perpendiculaire aux strates ; ce couple de plans obliques serait apparu lors d'un serrage tardif de l'anticlinal de Bimont.

- Le plan oblique N120-50 à 100, en raison de sa localisation dans une zone très cisailée, doit correspondre à un "strain slip cleavage".
- Le plan horizontal peut être interprété de deux façons ; il représente, soit une fracturation ancienne, enroulée et dont la continuité du plan a été désorganisée par les glissements couche sur couche, soit une rupture fragile des bancs entraînée par leur serrage sous une très faible charge ; cette faible charge ayant résulté de la forte érosion de l'anticlinal de Bimont.

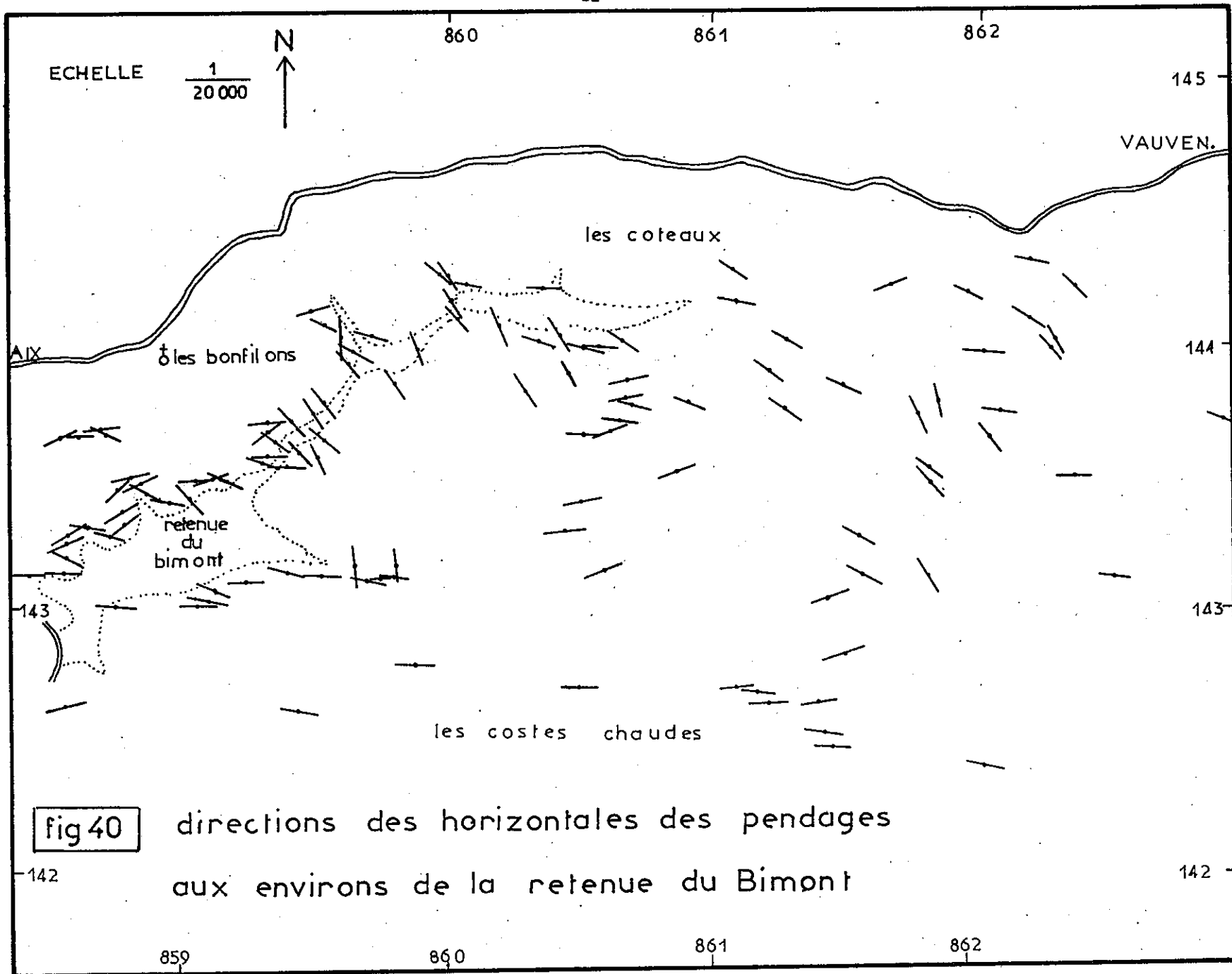


fig 40

directions des horizontales des pendages
aux environs de la retenue du Bimont

- Le plan N15 - 40E : son interprétation détaillée nécessiterait une analyse plus précise des environs où se développent des cisaillements méridiens, c'est-à-dire transverses aux structures ; (ceci particulièrement aux abords immédiats du barrage de Bimont). Un aperçu de ces accidents transverses est donné au paragraphe suivant.
 - Le plan N10 - 90E, de grande extension, apparaît nettement comme un élément d'une fracturation ancienne ; ce plan est sensiblement perpendiculaire à l'axe de l'anticlinal. Non seulement la karstification du massif utilise très préférentiellement ce plan, mais le remplissage karstique se trouve très fréquemment tectonisé (écrasé ou plissé) ; de tels plis, décimétriques à métriques, ont été mesurés ; leurs axes présentent une orientation N130 qui rappelle celle des plis hectométriques qui, plus à l'Ouest, flanquent l'anticlinal. On observe également des désajustements de ce plan par les rejeux ultérieurs des stratifications.
- En résumé ce plan de fracturation met en évidence la chronologie suivante :
- fracturation ancienne,
 - karstification suivant ce plan,
 - déformation du karst.

REMARQUES SUR QUELQUES DEFORMATIONS BIEN REPRESENTÉES AU BIMONT ET DANS LES ENVIRONS

- Une carte des directions (mesurées) des pendages a été établie dans la région Bimont - Sainte-Victoire : fig. 40. Alors que la carte géologique ne fait clairement apparaître que des structures orientées est-ouest, la carte des pendages met en évidence de nombreuses "exceptions" directionnelles dans le détail de ces structures. A la limite, en s'appuyant sur le fait que les pendages de direction est-ouest sont peu représentés sur cette carte, on pourrait faire l'hypothèse que les grandes structures sont la somme de structures plus petites orientées différemment ; et il existerait donc une ambiguïté liée non à la réalisation de la carte géologique mais à son principe même.
- Argumentation concrète : la structure située en X : 858,5 et Y : 143,5, c'est-à-dire au Nord Est du barrage, est représentée sur la figure 41. L'interprétation des contours stratigraphique (carte géologique) conduit à faire de cet affleurement jurassique supérieur un lambeau de flanc nord de l'anticlinal de Bimont. En fait cet affleurement présente une charnière synforme dans le ravin de la Ginestelle ; il s'agit très probablement d'un synclinal puisque du Lias inférieur et du Trias bordent au Nord et au Sud les flancs de cette structure ; vers l'Ouest l'affleurement se termine après que se soient développées des complications sur le flanc nord, seul visible (fig. 41) : schématiquement le flanc du synclinal est-ouest passe à un anticlinal d'axe nord-sud. Le repli intermédiaire, d'axe pratiquement vertical, appartient visiblement à la famille des déformations sensiblement méridiennes ; (un autre pli d'axe vertical est très visible dans le site même du barrage à l'aval de l'appui rive gauche). La carte des pendages fig. 40 fait donc apparaître la quasi généralité de ces déformations sur une aire de plusieurs kilomètres carrés dans le cœur des structures Bimont - Sainte-Victoire.
- Les mesures de pendages effectuées plus à l'aval entre le barrage du Bimont et Le Tholonet, dans l'étendue des brèches éocènes, montrent la superposition de déformations nord-sud et est-ouest ; mais, à part quelques axes privilégiés, les anticlinaux et synclinaux sont de faible amplitude et leurs flancs ne s'inclinent que de 10 à 20 gr ; le torrent de l'Infernet traverse cette région avec un cours en ligne brisée faisant une suite d'angles droits ; les mesures sur le terrain ont montré que ce tracé emprunte une suite de dépressions synclinales peu marquées qui se répartissent selon deux directions sensiblement perpendiculaires.

fig.41

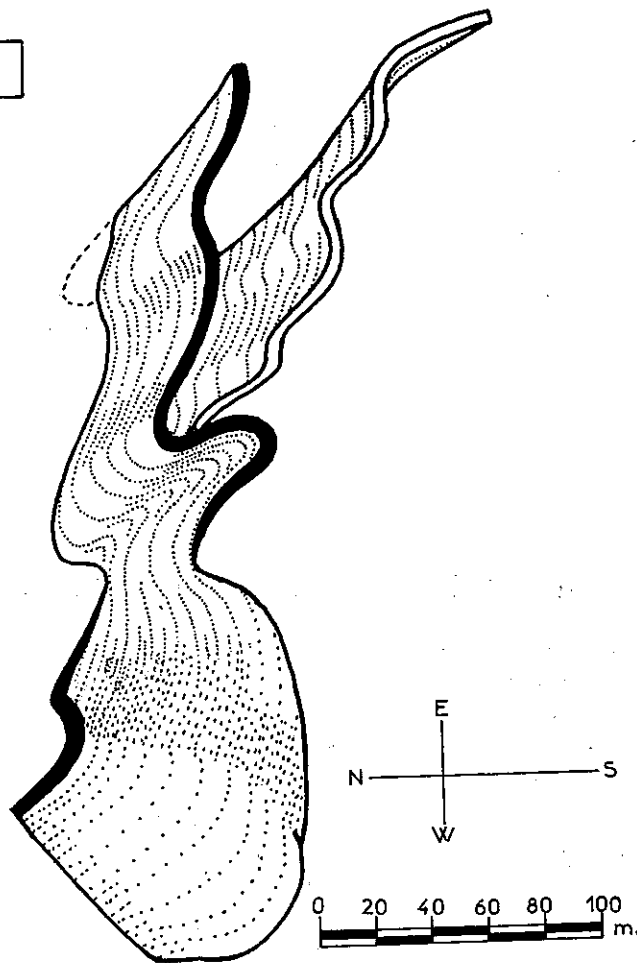


fig.42

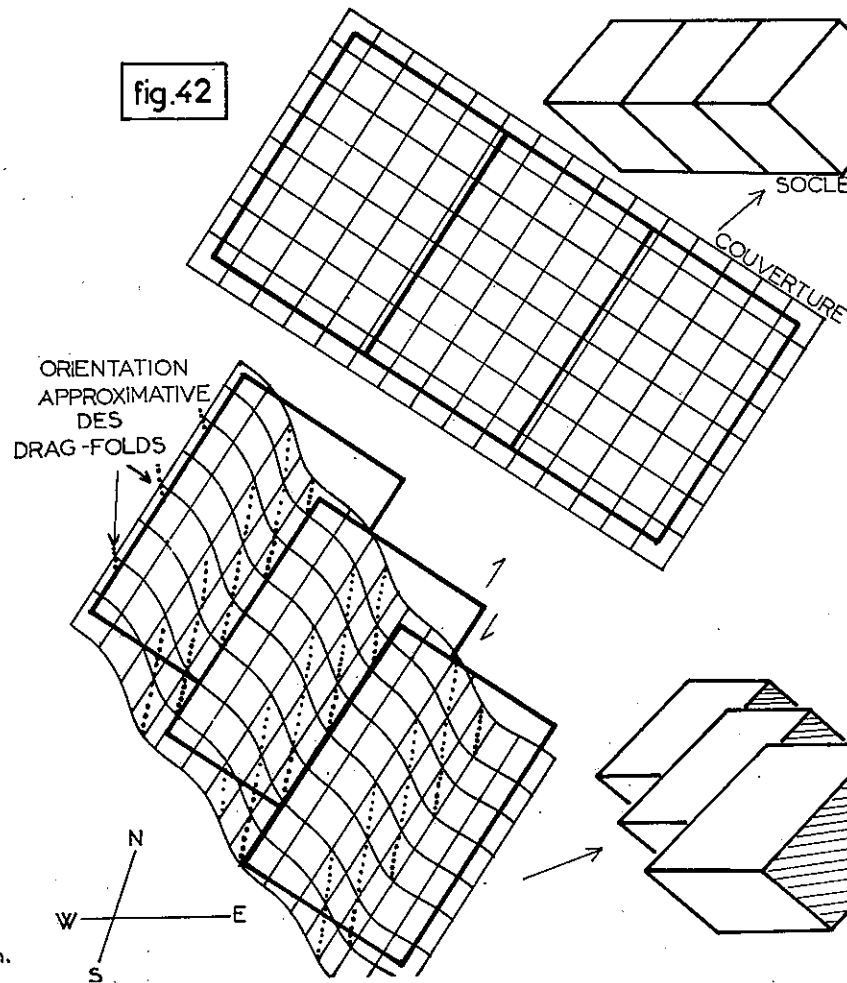


Fig. 41 - Cette structure montre un lambeau de Jurassique supérieur ; ce synclinal très pincé et déversé vers le S a son flanc N qui se complique d'un repli d'axe pratiquement vertical et d'un autre repli d'axe méridien ; une telle structure suppose la superposition de 2 déformations pratiquement perpendiculaires ; de plus elle se situe sur un faisceau de déformations transverses qui traverse la carte géologique au 1/80 000.

Fig. 42 - Donne l'image d'une couverture déformée par des failles profondes (socle) jouant à la fois en failles inverses et en décrochement. Dans cette hypothèse les failles ont la direction N30-40 des grands faisceaux ; de tels accidents produisent des "drag-folds" au front des voussoirs ; ces plis ont des directions axiales qui sont figurées et qui correspondent aux directions méridiennes observées.

- Si les déformations transverses apparaissent avec une certaine généralité, l'intensité du phénomène se localise assez nettement. Dans cette zone du Bimont des formations bréchiqes daniennes et éocènes sont séparées par un contact méridien. Cette limite correspond à une déformation qui abaisse fortement le domaine des brèches éocènes ; il ne s'agit pas d'une simple faille mais d'une déformation méridienne complexe (plissement + rejet + décrochement) qui, en même temps qu'elle affecte les brèches éocènes, paraît liée à l'individualisation du bassin de ces mêmes brèches. Cette déformation transverse aurait donc localement une forte tendance à se perpétuer.
- Un faisceau d'accidents analogues traverse pratiquement la carte au 1/80 000 avec une direction N20-30, depuis l'anticlinal de Pont-de-Mirabeau, au Nord jusqu'au massif de l'Etoile, au Sud (voir synthèse des déformations).
- A titre d'hypothèse : ces déformations méridiennes, individuellement peu étendues mais disposées en grands faisceaux obliques, suggèrent une adaptation de la couverture à des déformations plus profondes. Les plis transverses traduisent une contraction ; le relai de plis méridiens en un grand faisceau semble traduire un décrochement profond. Si en pure hypothèse on cumule contraction + décrochement dans le cadre des failles de socle, on arrive à la solution de failles inverses (orientées N20-30) suivant lesquelles l'Ouest s'abaisse avec un décrochement vers le Nord. La figure 42 propose un tel modèle où le décrochement se combine avec un rejet vertical de failles inverses dans des compartiments de socle ; l'image donnée de la déformation est celle d'une couverture s'adaptant à ces rejeux profonds.

LA SAINTE-VICTOIRE PROPREMENT DITE

S'il suffisait de faire quelques coupes sériees pour situer en grand la structure, ce grand anticlinal légèrement déversé vers le Sud ne poserait pas trop de difficultés d'interprétation. Mais à son allure en grand se superposent de nombreuses "complications de détail" qui, observées elles aussi dans le détail, révéleraient vraisemblablement de nombreuses informations sur l'histoire géologique régionale et son style.

De ces petites structures, seules quelques unes sont décrites ici :

- Les plans obliques N 120 pentés Nord et Sud ont déjà été analysés dans la fracturation de Bimont (couple de plans N110). Des plans semblables se développent dans le flanc redressé de la Sainte-Victoire et le cisaillement) correspondant à l'un de ces plans passe à de véritables chevauchements cartographiques d'extension kilométrique : c'est par un plan de ce type que la Sainte-Victoire chevauche l'anticlinal de Bimont.
- La figure 43 montre une coupe, la plus réelle possible (pendages mesurés dans le Jurassique supérieur de la gorge Vauvenargues-Jouques) ; on y voit une opposition assez nette entre l'allure en grand de la structure qui résulterait d'une simple interprétation cartographique des affleurements, et la réalité des pendages.
- La figure 44 montre une déformation avec une charnière particulièrement angulaire. Une fracturation anarchique jalonne cette charnière orientée N95. La fracturation qui est enroulée par cette déformation, présente trois plans orientés : N25, N125, N160.
- La figure 45 montre un pli décamétrique avec laminage des bancs en relation avec un plan où s'accumule nettement le cisaillement. Ce pli n'affecte que les strates situées au-dessus du plan de "rabotage". Cette déformation se différencie de la précédente par sa plasticité (laminage) - la figure 44 ne montrant qu'une rupture fragile au niveau d'une charnière angulaire -. Cette association avec un plan de cisaillement est à rapprocher de la fracturation du Bimont antérieurement analysée.
- Les plans de fracturation d'orientation N70 et N170 sont "enroulés" par ce pli.
- Les figures 47 et 48 montrent également une déformation qui affecte une fracturation antérieure ; la mise en plasticité des bancs calcaires lors du plissement est mise en évidence par le laminage (jusqu'à la striction complète) mais aussi par le cisaillement parallèle aux couches qui bascule le plan de fracturation N90 vers le plan axial du pli de plus ce cisaillement s'est accumulé autour du plan de stratification d'où résulte la forme en S attribuable à un début de "strain slip cleavage".

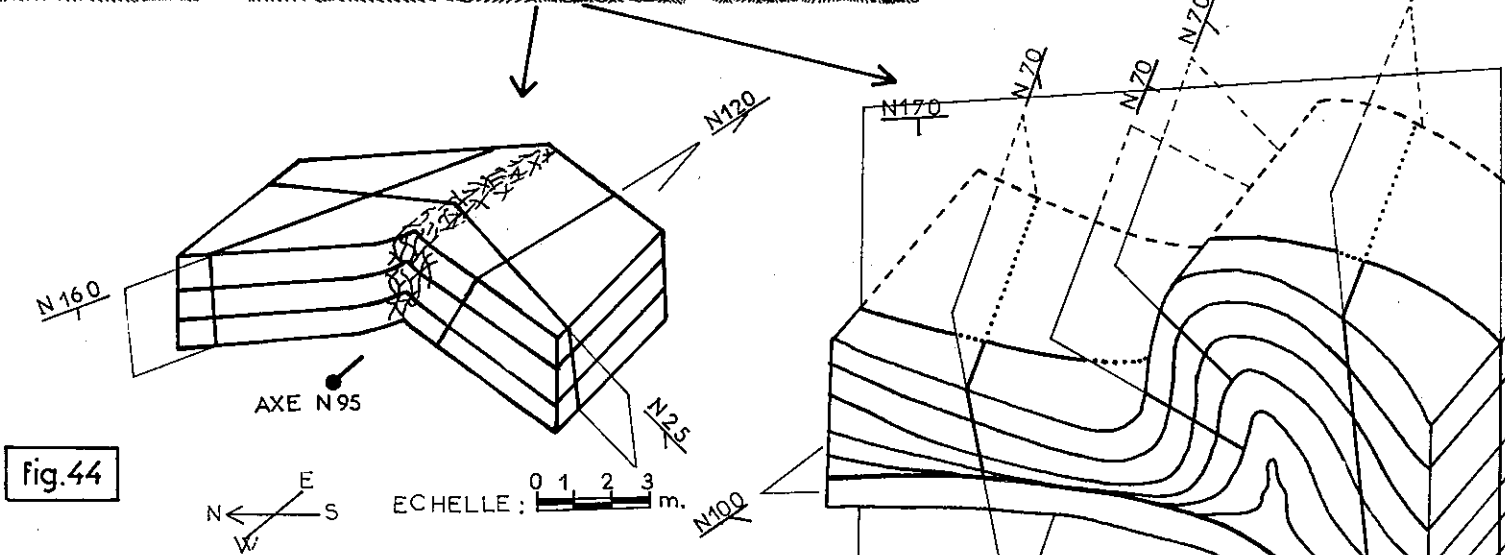
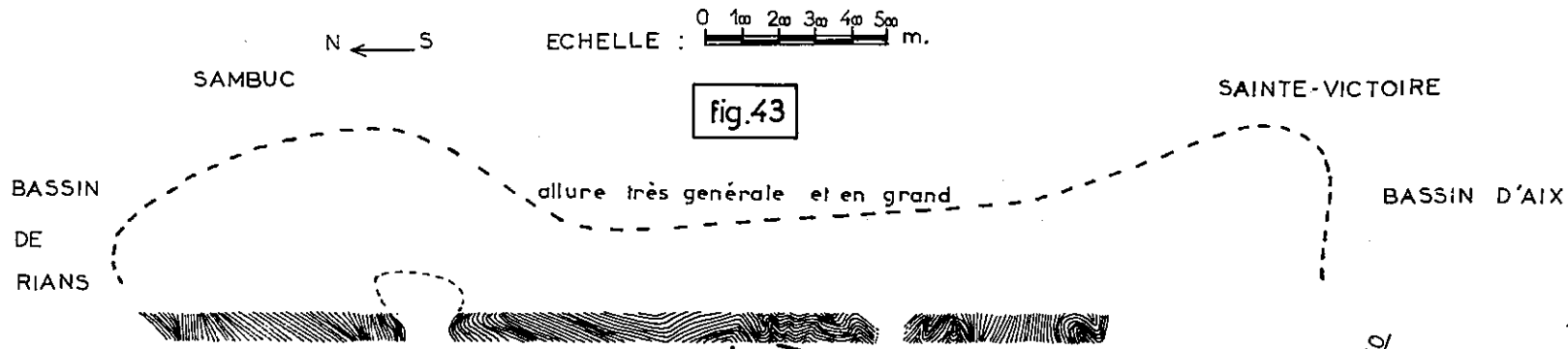
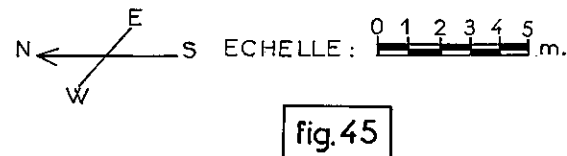


Fig. 43 - Opposition entre l'interprétation cartographique des affleurements et les pendages réels.

Fig. 44 - Charnière angulaire associée à une fracturation anarchique (rupture fragile).

Fig. 45 - Déformation souple du plan de stratification enroulant les plans N70 ; un rabotage basal permet une accumulation de la déformation dans les strates supérieures.



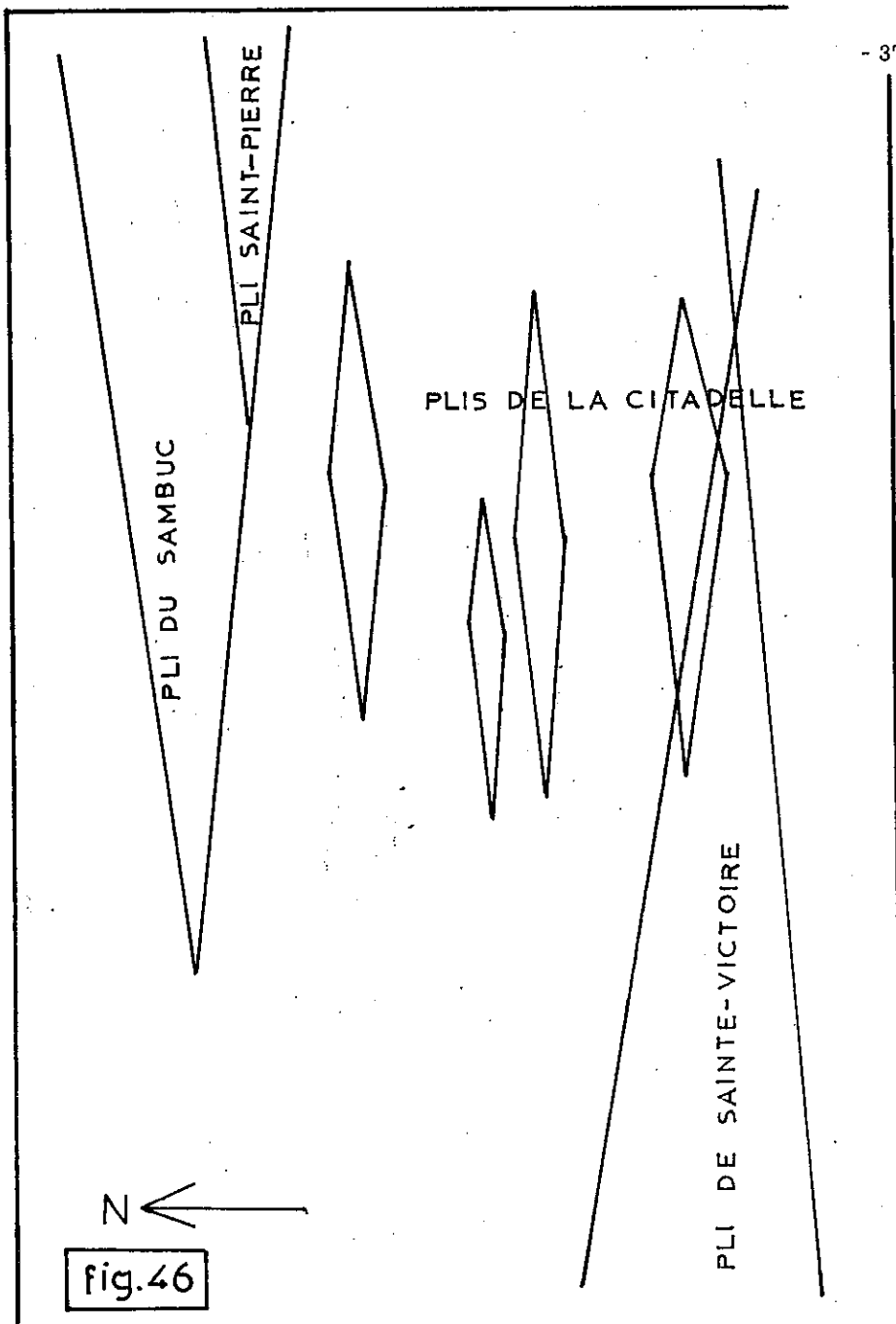


fig.46

La fracturation générale n'a pu être étudiée dans son ensemble en raison de la forte "microtectonique" qui envahit ce domaine ; il s'y ajoute le manque de continuité des affleurements. Néanmoins la fracturation générale semble rester sur le thème déjà mis en évidence, à savoir :

- . deux plans N60-70 et N160-170, les plus étendus et les plus généraux ;
- . deux plans N190-10 et N90-110, d'un développement plus local et d'une extension moindre que les précédents.

(Ces plans étant enroulés par les plis et replis et engagés dans les déformations plastiques, il est difficile de remonter à leur position initiale).

Quant aux déformations décamétriques, les exemples décrits font apparaître une opposition entre celles qui traduisent un état de plasticité et celles qui traduisent une rupture fragile de ces bancs compétents. La rupture fragile traduit une déformation pour laquelle une des contraintes reste pratiquement nulle ; c'est le cas lorsque la charge est très faible, c'est-à-dire au voisinage de la surface topographique. Dans ce schéma il est vraisemblable que les déformations plastiques ont été réalisées avant érosion, et les ruptures fragiles après ; sans qu'il soit possible ici de préciser de quelle période d'érosion il s'agit.

La relation entre petites et grandes structures se pose dans la Sainte-Victoire : dans la partie ouest on avait rencontré un anticlinal dont la longueur est de 2 km ; en se déplaçant axialement vers l'Est on voit le développement transverse du pli diminuer progressivement en même temps que se développent des replis décamétriques ; encore plus à l'Est, mais seulement à 5 km de la coupe montrant une longueur de pli de 2 km, on ne rencontre plus que des plis décamétriques à hectométriques. On a donc une structure kilométrique qui, en 5 km, se résorbe en replis 20 à 100 fois plus petits : cela traduit la conicité des terminaisons périclinales et une schématisation du phénomène est fournie par la figure 46. Il est évident que l'extension de cette conicité en-dehors des périclinaux et à l'ensemble des structures reste largement à démontrer.

Du reste, cette région mériterait une étude géométrique beaucoup plus serrée pour comparer le raccourcissement de la couverture selon plusieurs transversales nord-sud. On en tirerait vraisemblablement des données décisives pour établir les relations entre les différentes structures régionales.

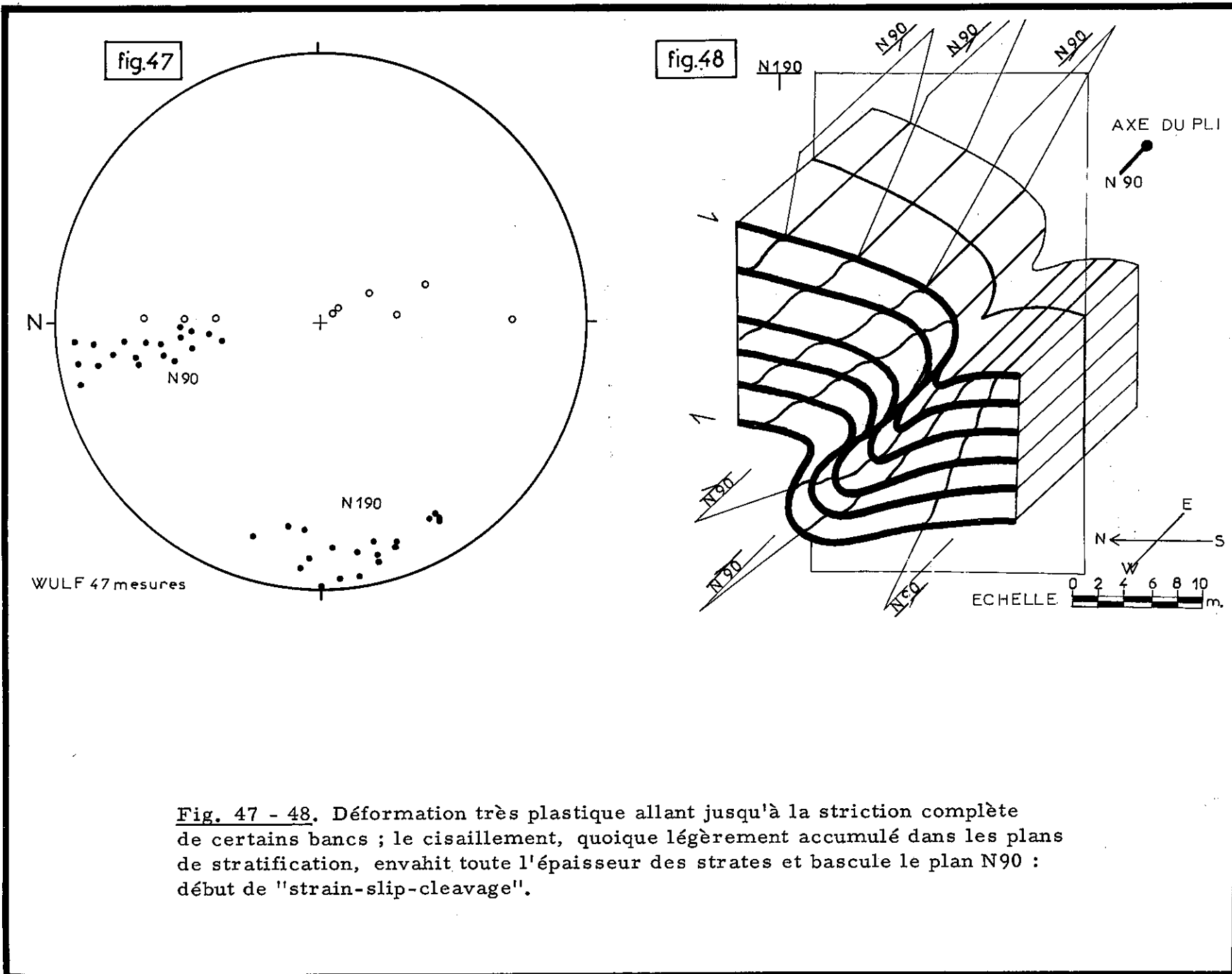


Fig. 47 - 48. Déformation très plastique allant jusqu'à la striction complète de certains bancs ; le cisaillement, quoique légèrement accumulé dans les plans de stratification, envahit toute l'épaisseur des strates et bascule le plan N90 : début de "strain-slip-cleavage".

ANTICLINAL DE CONCORS

LA SITUATION GENERALE

L'étude suivante a été réalisée dans la galerie du Canal de Provence depuis 3200 m à l'amont de la fenêtre de Trempasse jusqu'à 2000 m à l'aval.

Les niveaux sont stratigraphiquement Jurassique supérieur et Crétacé inférieur.

Il s'agit d'un anticlinal dissymétrique dont les couches inclinées de 80 - 90 gr vers le Nord, amorcent une retombée vers le Sud localisée au voisinage de l'axe du pli, puis se rétablissent à l'horizontale plus au Sud. Le développement axial du pli est d'environ 10 km. L'orientation de cet axe est N140.

LA FRACTURATION

- Le flanc nord :

La galerie traverse obliquement ce flanc et en permet l'étude sur 3200 m. Des diagrammes partiels ont été relevés de 100 m en 100 m et repérés sur les P. M. de la galerie. Ce travail détaillé a pu être regroupé car tous les diagrammes partiels admettent une superposition qui conduit au diagramme synthétique (fig. 49) où sont portés les pôles des plans de stratification, les pôles des diaclases, et les stries dont une majorité se complète par un sens de déplacement relatif. Malgré la dispersion que présente ce premier diagramme, un comptage statistique fait nettement apparaître les principaux groupements des pôles de diaclases (fig. 50)

. Le plan de stratification :

Les bancs traversés ont une épaisseur qui varie de 0,5 m à 5 m.

Des stries, calciteuses ou non, mettent en évidence les glissements relatifs de ces bancs ; l'orientation des stries montre que ces glissements se sont effectués avec une dispersion très importante (fig. 49) allant d'une direction perpendiculaire à une direction parallèle à l'axe du pli ; mais le sens de ces stries montre systématiquement une remontée en direction du Sud Ouest du banc supérieur relativement au banc sous-jacent ; c'est-à-dire un mouvement tout à fait attendu dans une déformation anticlinale et correspondant au raccourcissement relatif que subit la surface externe d'une couche soumise à une courbure.

. Le plan N50 (perpendiculaire à la stratification et vertical)

Ce plan est constant, sans que l'on puisse lui attribuer un espacement régulier ; bien réglé il découpe la stratification avec une extension plus que décimétrique que l'observation en galerie ne permet pas de mieux préciser. Les stries y sont très rares et leur sens peut être contradictoire d'une observation à l'autre. Toutefois un nodule sédimentaire traversé par un plan N50 montre un cisaillement centimétrique sans aucune strie (photo 2).

C'est dans ce plan que l'altération karstique s'introduit et se développe systématiquement.

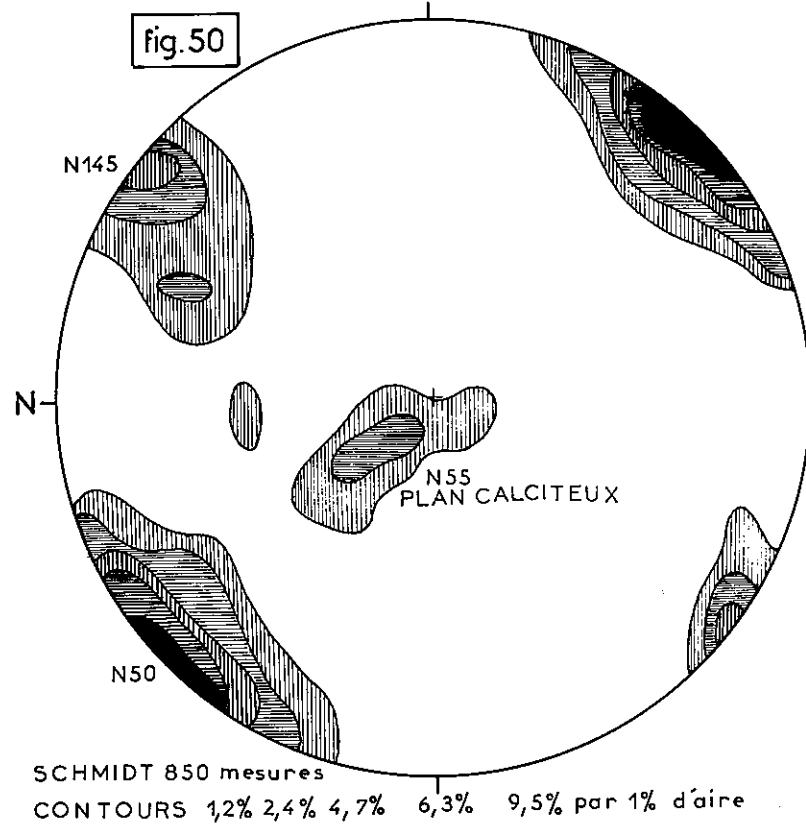
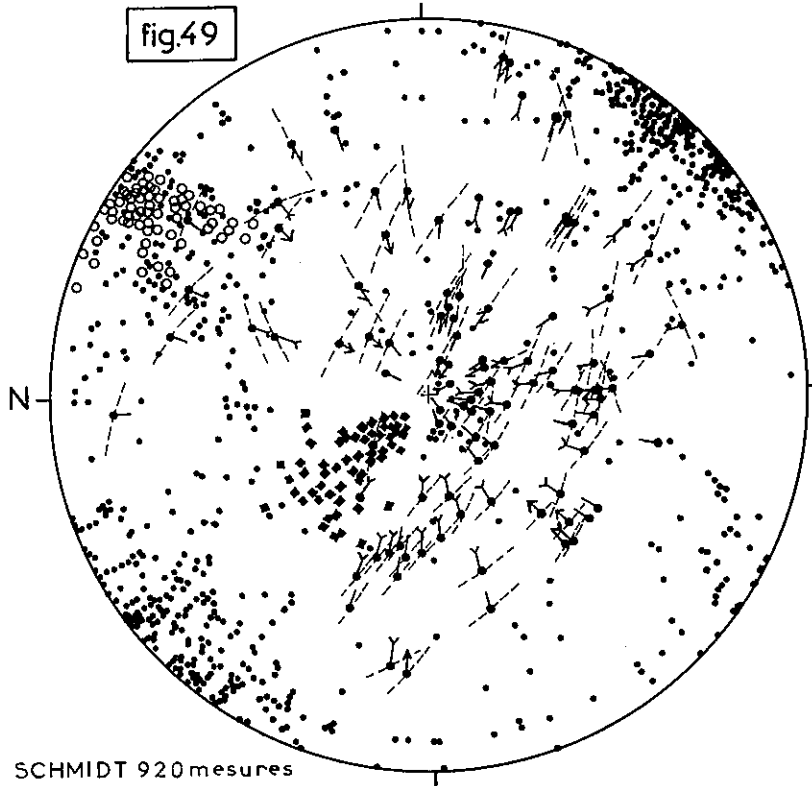


Fig. 49-50 : Fracturation relevée en 3200 m de galerie dans le flanc N de l'anticlinal de CONCORS ; cet anticlinal présente un axe de direction N140 (actuellement) ; le plan N50, sensiblement perpendiculaire à cet axe, est très développé et joue un rôle dominant dans l'introduction de la karstification ; les plans obliques font entre eux un angle aigu qui admet la stratification pour bissectrice mais donnent de mauvais groupements statistiques. Des stries matérialisent les cisaillements couches sur couches qui peuvent s'engager dans les plans obliques ; ces stries ont une forte dispersion de leur direction mais traduisent toutes une remontée des couches supérieures vers la crête de l'anticlinal.

. Les plans obliques par rapport à la stratification

Ces deux plans sont sensiblement d'orientation N140-145 et l'angle aigu qu'ils font entre eux admet schématiquement la stratification pour bissectrice. L'un de ces plans apparaît peu nettement sur les diagrammes synthétiques (fig. 49 et 50) ; cette fugacité sera interprétée ultérieurement par l'évolution de la fracturation. Malgré ce flou synthétique, des observations localisées montrent nettement la réalité de ces deux plans autour de la stratification. Les stries qui se développent ont fréquemment deux orientations superposées ; dans certains cas privilégiés, des stries d'orientation voisine ont montré des sens opposés ; l'une recoupant l'autre, leur chronologie relative a été établie (voir évolution de cette fracturation).

. Le plan horizontal

Ce plan se développe très irrégulièrement avec une densité très variable. Il est toujours associé à un important remplissage calciteux.

Dans un niveau berriasien ce plan présente des caractéristiques remarquables ; les nodules siliceux sédimentaires de 20 cm de diamètre, cisailés par le plan N50, s'effilent sur 10 à 15 cm dans ce plan horizontal (photo 3). Cette observation permet de dater la formation de ce plan qui apparaît durant la diagenèse berriasienne.

- Interprétation et évolution de la fracturation de ce flanc nord

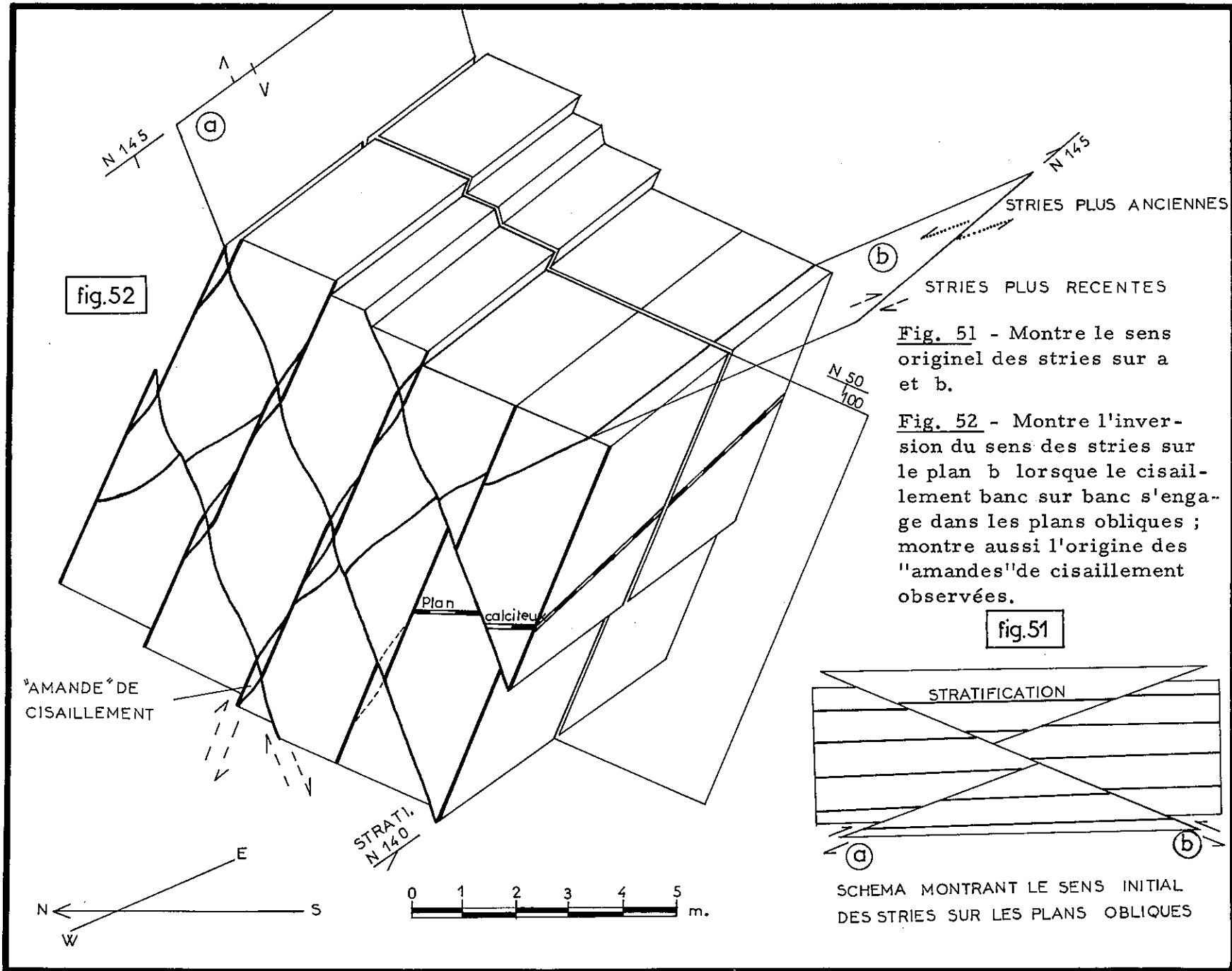
La possibilité de dater localement l'apparition du plan calciteux pratiquement horizontal ne permet pas, en toute rigueur, de généraliser l'époque de sa formation ; d'autant que l'on verra ce plan avoir une aire de développement limitée au Concors. Mais cette apparition est à mettre en parallèle avec une remarque stratigraphique ; en effet, c'est dans cette zone que le Berriasien apparaît, ou plus exactement, qu'il s'individualise ; plus au Sud il n'existe pas ou n'a pas pu être distingué du Jurassique supérieur. Par contre, au niveau du Concors le Berriasien est daté paléontologiquement et présente un aspect noduleux ; comme ces nodules apparaissent liés au plan calciteux, on peut faire l'hypothèse que des déformations locales s'installent au Berriasien (plus exactement au cours de sa diagenèse) dans cette zone, en y développant une fracturation fruste. On sait que des déformations berriasienne ont été mises en évidence plus au Nord dans le Dévoluy.

Si l'on restitue aux couches leur position horizontale par rotation autour de l'axe du pli, ce plan calciteux devient pratiquement vertical avec une direction N155 que l'on peut supposer initiale.

Abstraction faite de ce plan calciteux, l'ensemble de la fracturation de ce flanc nord présente une disposition cohérente relativement à l'axe du pli ; elle lui est parallèle ou perpendiculaire. Mais le développement de stries, dont les orientations sont très obliques, révèle d'importantes distorsions dans le développement du pli et résultent probablement de translations très inégales en grandeur.

Les sens contradictoires des stries sur un des plans obliques peuvent être facilement interprétés en faisant l'hypothèse suivante (et discutée ailleurs) : "les plans obliques apparaissent précocement, avant tout changement d'orientation des plans stratigraphiques" ; les stries qui apparaissent alors sont représentées sur la figure 51. Puis la déformation anticlinale intervient entraînant un continu remaniement de l'état de contrainte par rapport aux bancs. Le glissement couche sur couche se développe ; si une partie de ce mouvement s'engage dans le plan oblique noté a, fig. 52, le sens des stries primaires est identique à leur sens initial (fig. 51) ; mais si le glissement s'engage dans le plan oblique noté b, fig. 52, le sens des stries secondaires est inverse du sens initial (fig. 51).

Une autre conséquence de la superposition du cisaillement couche sur couche sur les plans obliques est la formation des "amandes" écrasées qui jalonnent les plans stratigraphiques. Les plans obliques ayant initialement décalé les plans de stratification, le glissement couche sur couche, en se développant, cisaille ces désajustements ; le phénomène est illustré par la figure 52.



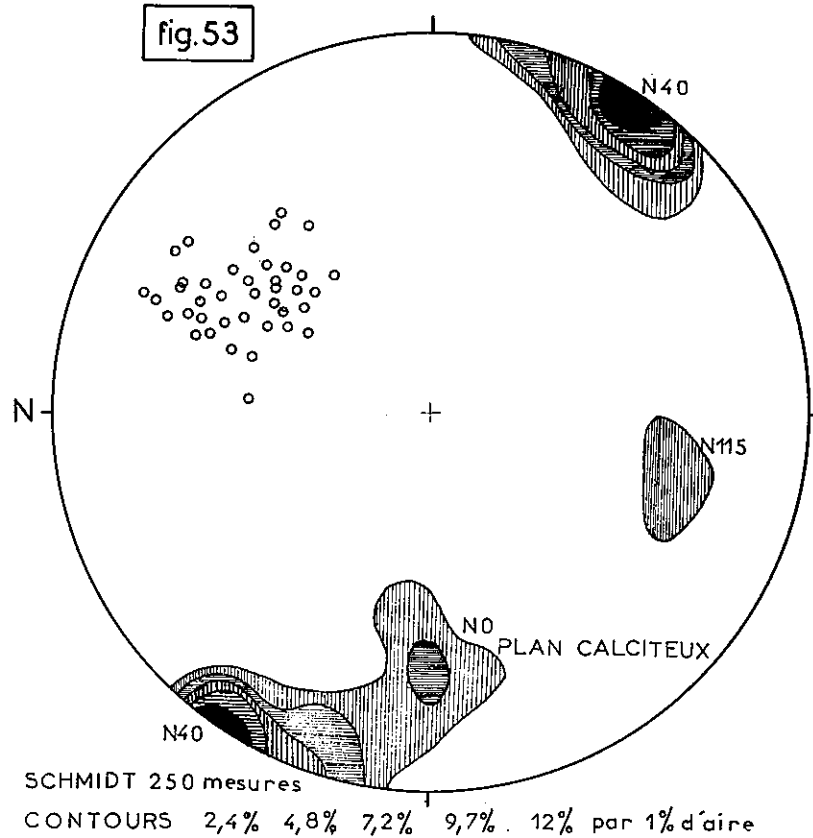


Fig. 53 - A l'approche du plan axial le plan N40 se maintient mais apparaît un autre plan perpendiculaire aux strates avec une direction N 115 ; noter aussi le changement de direction du plan calciteux qui évolue indépendamment du reste de la fracturation.

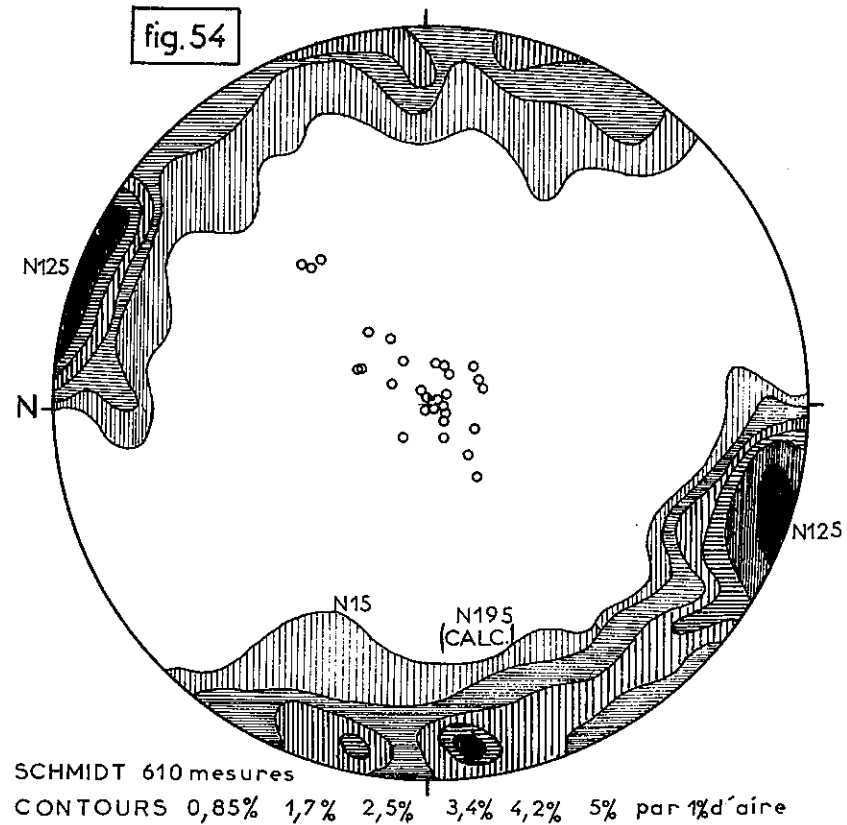
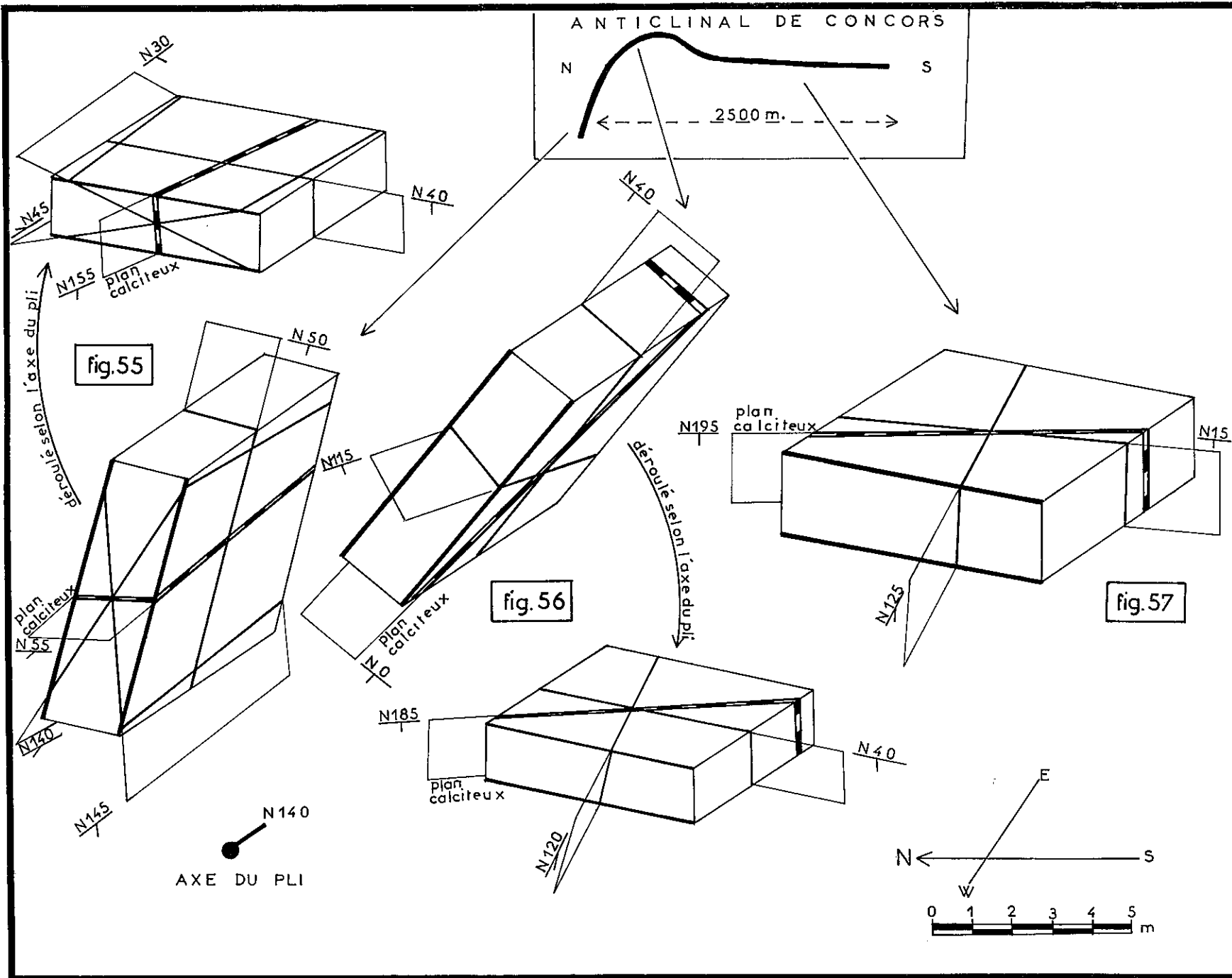


Fig. 54 - Dans ce flanc S qui devient horizontal la fracturation change : les plans obliques disparaissent, le plan vertical N40 également ; il se développe un plan vertical de direction N125 ; le plan calciteux continue son évolution et devient méridien.



- Le flanc nord au voisinage du plan axial (fig. 53)

- . Le plan perpendiculaire à l'axe est toujours bien représenté.
 - . Un des plans obliques disparaît complètement, accentuant une évolution amorcée et décrite précédemment ; il ne subsiste que le plan noté : a, sur la figure 52.
- Le plan calciteux change sensiblement d'orientation.

- Le flanc sud (fig. 54)

- . L'évolution se complète par la disparition presque complète des plans obliques dont on n'observe plus que des portions très éparses ne donnant plus de groupement statistique sur le diagramme.
- . Le plan antérieurement perpendiculaire à l'axe se réoriente et passe à N15.
- . Le plan calciteux augmente de densité mais toujours sans régularité, et surtout change d'orientation et tend à devenir perpendiculaire à l'axe du pli.
- . Un plan apparaît avec une orientation N115-125 et une forte densité.

- Interprétation et évolution de cette fracturation

- . Le plan calciteux se réoriente donc indépendamment du reste de la fracturation ; ceci est probablement dû à son origine précoce déjà signalée.
- . L'apparition du plan N125 est peut-être à rapprocher de la réorientation du plan calciteux ; lorsque celui-ci occupe une direction voisine de celle de l'axe, celui-là n'apparaît pas ; cas du flanc nord (fig. 55) ; mais lorsque cette position n'est plus occupée, la famille des plans orthogonaux réapparaît ; cas du flanc sud (fig. 57).
- . Par contre, le plan perpendiculaire à l'axe ne semble pas sensible à la présence du plan calciteux puisque ces deux plans coexistent avec seulement un écart de 20 gr .

Les figures 55 - 56 - 57 résument cette évolution de la fracturation entre le flanc nord et le flanc sud de l'anticlinal de Concors.

Fig. 55-56-57 : montrent synthétiquement la fracturation dans l'anticlinal de Concors ; on y voit la localisation du couple de plans obliques à la stratification dans le flanc Nord de l'anticlinal ; on peut également suivre la réorientation du plan calciteux apparu précocement au cours de la diagenèse berriasienne. Ce plan calciteux voisine avec le plan N15 dans le flanc Sud de l'anticlinal alors que dans le flanc Nord sa présence semble avoir empêché le développement, par ailleurs très général, d'un plan de direction N100 à N150, plan qui apparaît lorsque le plan calciteux libère cette position.

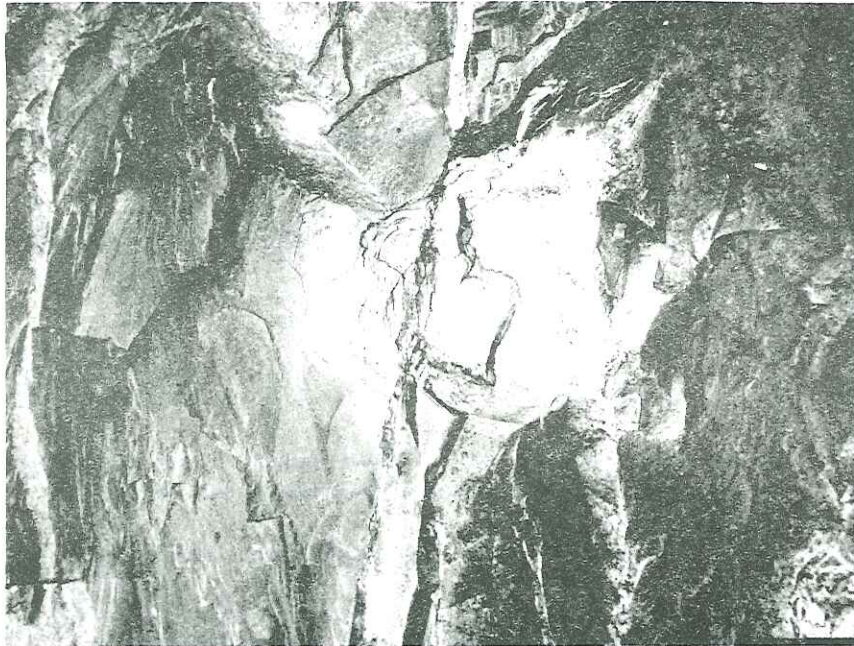


Photo 3 : Nodule sédimentaire légèrement cis aillé par un plan N50 dans les formations berriasiennes du Concors.

Photo 4 : Nodule sédimentaire dans le Berriasien se développant dans le "plan calciteux", pratiquement horizontal.

FRACTURATION DE L'ANTICLINAL DE PONT DE MIRABEAU

A la limite nord de la feuille d'Aix au 1/80 000 se développe l'anticlinal de Pont de Mirabeau. La Durance traverse cette voûte par une cluse orientée N50. L'Argovien-Rauracien apparaît au cœur de l'anticlinal ; sur les flancs la série se complète jusqu'à l'Urgonien. Une érosion ancienne a attaqué cette structure puisque de la bauxite a été observée sur l'Hauterivien du flanc sud ; cette voûte a donc été amorcée avec la formation de l'isthme durancien.

Les observations et les mesures ont été effectuées dans le flanc sud de l'anticlinal, en bordure de la voie ferrée qui suit la rive droite de la Durance, à l'aval du Pont de Mirabeau. Dans ces couches qui vont du Jurassique supérieur à l'Urgonien, la fracturation est remarquable tant par sa densité que par sa régularité.

- Les déformations

. Le plan de stratification

Les couches ont une épaisseur qui varie de 20 cm à 5 m avec une épaisseur beaucoup plus fréquente de 1 à 2 m.

En plus de la voûte principale de l'anticlinal, qui est de dimension kilométrique, le flanc sud se complique de replis d'amplitude réduite et d'espacement décimétrique. Trois de ces replis sont reportés sur la figure 58. On remarque immédiatement qu'ils ont une orientation variable, leur axe oscillant entre N90 et N130 ; ils sont responsables de la dispersion du plan stratigraphique - en direction et en inclinaison - dans cette retombée vers le Sud de la voûte principale. La charnière anticlinale de ces replis présente systématiquement une brusque augmentation de la courbure accompagnée d'un écrasement : le plan axial de ces replis est jalonné par un broyage intense mais localisé (fig. 59).

- La fracturation

. Le plan de fracturation N50

L'espacement métrique et la grande extension (décimétrique à hectométrique) de ce plan, le font apparaître équivalent au plan de stratification au niveau de l'affleurement. A ce plan sont associées des stries, calciteuses ou non, qui, par leur sens, indiquent systématiquement une translation vers le Nord Est du compartiment sud est (fig. 58).

Le plan N50 est "enroulé" par les replis décimétriques et par l'anticlinal principal.

. Le plan N150

Moins réglé et d'espacement plus variable, ce plan ne présente pas de stries mais une forte dissolution stylolitique ; il est remarquable de voir que l'intensité de la dissolution sur le plan N150 apparaît liée à l'intensité de la calcification sur le plan N50 ; tout comme si la calcite prélevée sur un plan avait migré sur le plan perpendiculaire.

Cette fracturation est composée par deux plans perpendiculaires entre eux et perpendiculaires au plan de stratification ; ces deux plans sont repris par les déformations du plan de stratification et sont obliques par rapport à l'axe actuel de l'anticlinal du Pont de Mirabeau qui est orienté N100-110 au niveau de la cluse de la Durance.

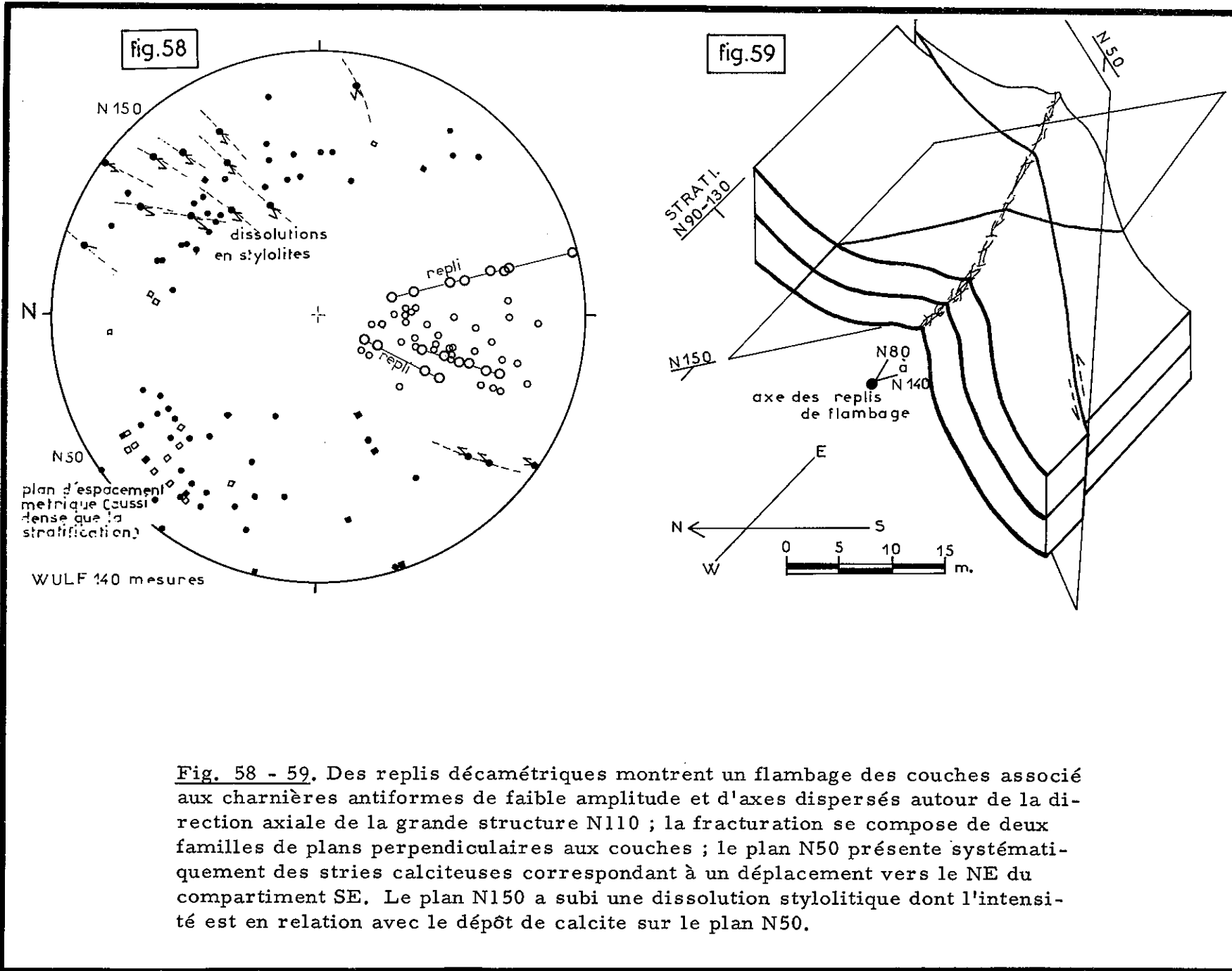


Fig. 58 - 59. Des replis décamétriques montrent un flambage des couches associé aux charnières antiformes de faible amplitude et d'axes dispersés autour de la direction axiale de la grande structure N110 ; la fracturation se compose de deux familles de plans perpendiculaires aux couches ; le plan N50 présente systématiquement des stries calciteuses correspondant à un déplacement vers le NE du compartiment SE. Le plan N150 a subi une dissolution stylolitique dont l'intensité est en relation avec le dépôt de calcite sur le plan N50.

- Interprétation et évolution de cette fracturation

. L'origine des replis décamétriques à hectométriques

Ils se distinguent de la "grande structure" et s'y opposent par les caractères suivants :

- 1 - une dimension 10 à 50 fois moindre ;
- 2 - une dispersion importante de l'orientation des axes d'un repli à l'autre ;
- 3 - un écrasement des charnières anticlinales pour une faible amplitude du pli.

Les caractères 1 et 2 sont typiques de "plis en goussets" au flanc d'une grande structure. Le caractère 3 traduit une très faible charge au-dessus de la couche au moment de son replissement, faible charge ayant permis l'écrasement au niveau des charnières pour une amplitude réduite du repli ; on aurait un véritable flambage des couches.

Mais s'il y a faible charge, c'est qu'il y a eu érosion d'une partie de la couverture et que ces replis sont postérieurs à ce dénudement ; cette érosion de l'anticlinal serait créacé puisqu'on observe là des témoins bauxitiques ; l'anticlinal étant amorcé durant l'épisode durancien c'est sa reprise par une déformation ultérieure - probablement à la fin de l'Eocène - qui a provoqué ces replis. Ces replis traduisent un raccourcissement des couches, et c'est très normal, car toute cette zone se situe en fait sous l'inflexion de l'anticlinal c'est-à-dire dans une courbure synforme ; or une telle courbure entraîne un raccourcissement de la face supérieure des couches*. Autrement dit et en dernière analyse ces replis sont le résultat d'une morphotectonique ; dans l'amorce de l'anticlinal initial, où toute la couverture participait à la déformation, la courbure antiforme devait avoir un grand développement avec des points d'inflexion très éloignés de la charnière ; lorsque, après érosion, la déformation reprenait, la courbure antiforme s'accumulait dans la partie érodée et l'anticlinal évoluait vers une forme "en accent circonflexe". Cette migration des points d'inflexion vers la charnière entraînait le développement d'une courbure synforme au flanc de l'anticlinal ; le raccourcissement des couches superficielles entraînait alors la déformation des replis avec flambage.

. Les plans N50 - N150 et leur position par rapport à l'axe N100-110 du pli

Ces deux plans sont donc antérieurs à la formation de l'anticlinal - mais ils peuvent être liés à l'état de contrainte qui va développer la première déformation -. Cette fracturation est donc antérieure - peut-être de très peu - à la formation de l'isthme durancien qui amorce cet anticlinal. Comme cette fracturation est homogène depuis le Jurassique supérieur jusqu'à l'Urgonien, on peut faire l'hypothèse qu'elle s'est développée dans un même temps et qu'elle est liée à l'état de contrainte préluant à la formation de l'isthme durancien.

Mais alors cet état de contrainte était orienté N50 - N150 et l'amorce anticlinale aurait dû, logiquement, être orientée selon une de ces directions sans, qu'a priori, on puisse préciser laquelle. Actuellement l'axe anticlinal est N100-110 et la fracturation lui est oblique.

On peut tenter d'interpréter cette obliquité en remarquant que le plan N50 porte systématiquement des stries traduisant une tendance du compartiment sud est à se déplacer vers le Nord Est. En effet, quelle déformation d'ensemble de la structure peut entraîner ces déplacements relatifs sur le plan N50 et sur lui seul ?

* - Dans le cadre de la définition d'un pli par la courbure (antiforme ou synforme) comprise entre deux points d'inflexion (Ramsay) c'est par abus de langage que l'on parle d'anticlinal dans cette zone où le plan de stratification décrit une courbure synforme. En effet, les inflexions qui individualisent rigoureusement cet anticlinal sont "hautes" et relativement proches de la charnière (forme en accent circonflexe).

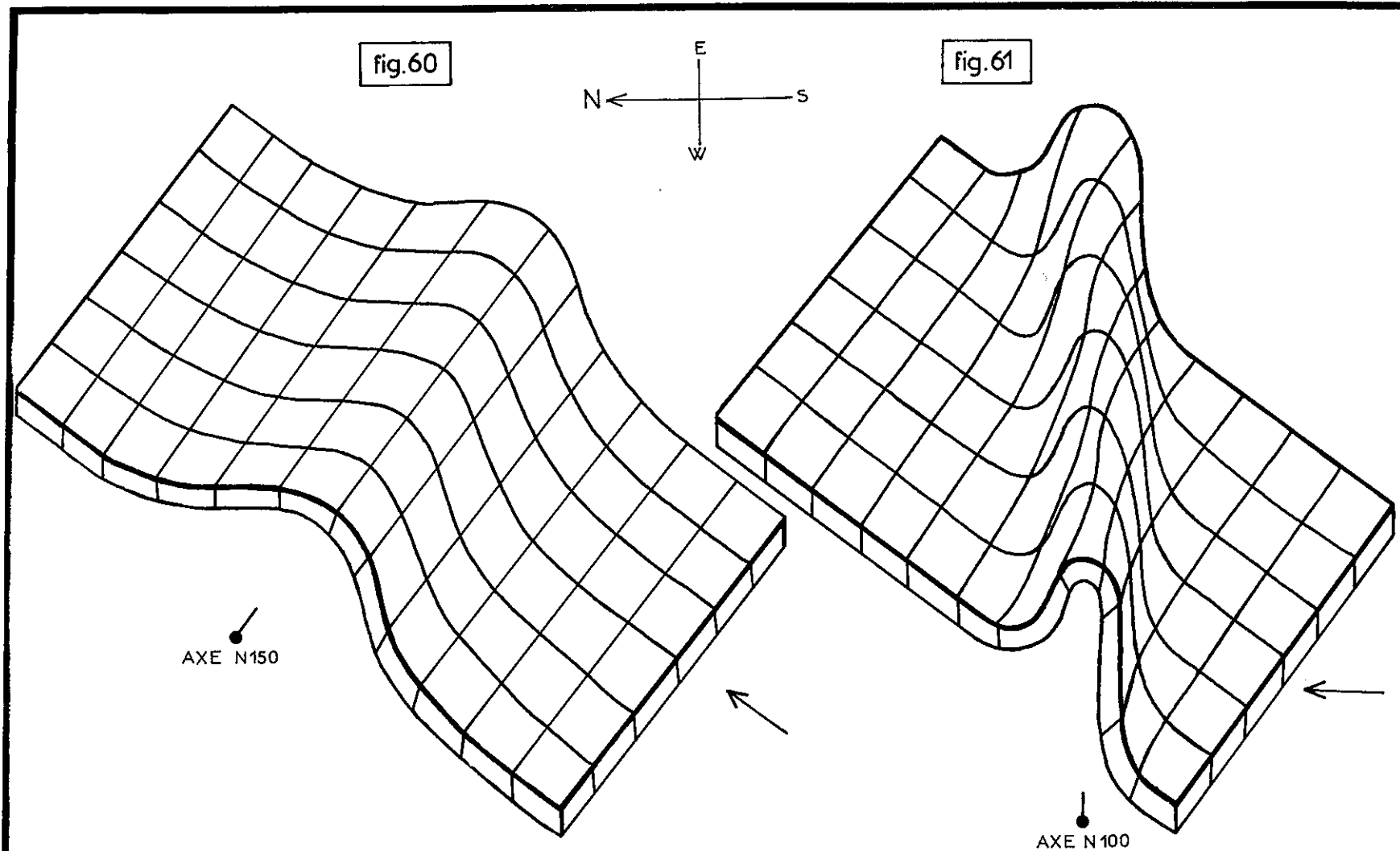
Ce mouvement est schématisé sur les figures 60 et 61. Sur la figure 60 l'axe de l'anticlinal durancien est hypothétiquement orienté N 150 et supporte les deux plans de fracturation N 50 et N 150. La figure 61 montre le résultat d'un serrage de l'anticlinal initial par un état de contrainte postérieur * et oblique sur le précédent. On voit qu'une telle redéformation a pour conséquence principales :

- un mouvement relatif sur le plan N 50 conformément au sens observé et reporté sur les figures 58 et 59 ;
- une réorientation de l'axe de l'anticlinal qui se rapproche de la direction actuelle N 100-110.

Cette interprétation de l'origine et de l'évolution de la fracturation, en relation avec les déformations, fait appel à quelques hypothèses simples ; elle permet néanmoins de situer les observations dans un cadre cohérent.

- Une remarque morphologique s'impose : la Durance qui traverse l'anticlinal du Pont de Mirabeau avec une orientation N 50, ne fait que prendre la direction du plan de fracturation qui, dans cette structure, est le plus dense et le plus étendu.

* - Cette déformation de l'architecture durancienne est facilement attribuable à l'épisode de plissement de la fin de l'Eocène.



HYPOTHESE SUR L'EVOLUTION AXIALE DE L'ANTICLINAL DE PONT-DE-MIRABEAU -

Fig. 60 - L'axe, dont l'origine est durancienne, montre une direction N150 et supporte des plans de diaclases apparus précocement au cours de cette déformation durancienne ;
Fig. 61 - Montre la réorientation de cet axe vers sa position actuelle (déformation éocène) ; cette rotation axiale expliquerait l'obliquité actuelle de la fracturation relativement à l'axe et surtout les cisaillements observés sur le plan N50 et sur lui seul.

CHAPITRE V

BORDURE SUD DU BASSIN D'AIX : L'AURELIEN, L'ARC TRIASIQUE DE L'HUVEAUNE, L'ETOILE

Cette bordure sud n'a pas l'unité apparente de la bordure nord ; en effet deux chevauchements s'individualisent : celui de l'Aurélien dans la partie est et celui de l'Etoile dans la partie ouest. Une zone intermédiaire les sépare dont les environs immédiats sont cartographiquement très complexes : c'est l'arc triasique de l'Huveaune *.

A L'EXTREMITE EST DU BASSIN, LA ZONE DES BRECHES DE POURCIEUX

Une bande de Jurassique supérieur (Portlandien) ceinture à l'Est les derniers affleurements de Crétacé supérieur transgressif du bassin. Une bréchification intense se développe localement, apparemment sans la présence de faille. Une fracturation exacerbée apparaît dans le calcaire qui se trouve fragmenté selon une maille qui peut être de l'ordre du centimètre cube (photo 4). L'altération karstique envahit les plans de fracture et colore vivement la formation qui a été anciennement exploitée dans des carrières.

LES DEFORMATIONS

Les mesures de pendages qui ont été effectuées dans cette zone permettent de construire une surface représentée sur la figure 62. On y voit se superposer nettement des déformations sensiblement nord-sud et est-ouest. Dans la tranchée de la voie ferrée on a pu observer un remplissage karstique plissé ; les axes de ces plis ont été mesurés : ils ont une direction N zéro (photo 5).

* Des interprétations géologiques assez contradictoires se maintiennent dans cette région. D'un côté on veut trouver une unité structurale dans une "nappe de basse Provence", secondairement plus ou moins démantelée, et dont les structures chevauchantes, actuellement individualisées, seraient les témoins : c'est l'interprétation la plus ouvertement allochtoniste ; d'un autre côté on essaye de trouver une relation entre les diverses structures sans les interpréter unitairement dans le cadre d'un chevauchement unique : c'est l'interprétation autochtoniste. Le B.S.G.F. de septembre 1968 traduit la vivacité de l'actuelle polémique sur ce sujet.

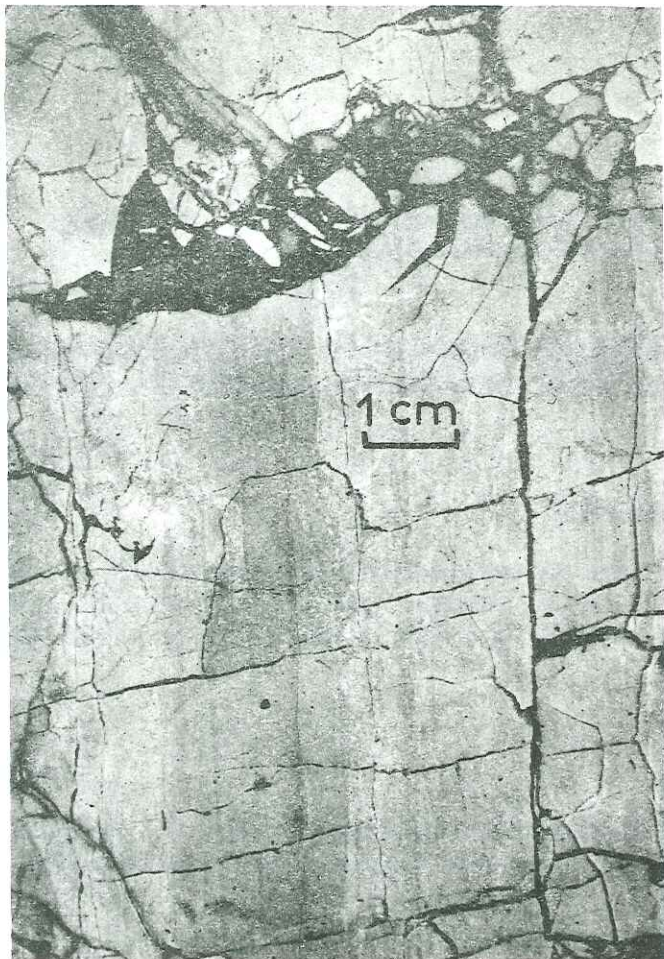
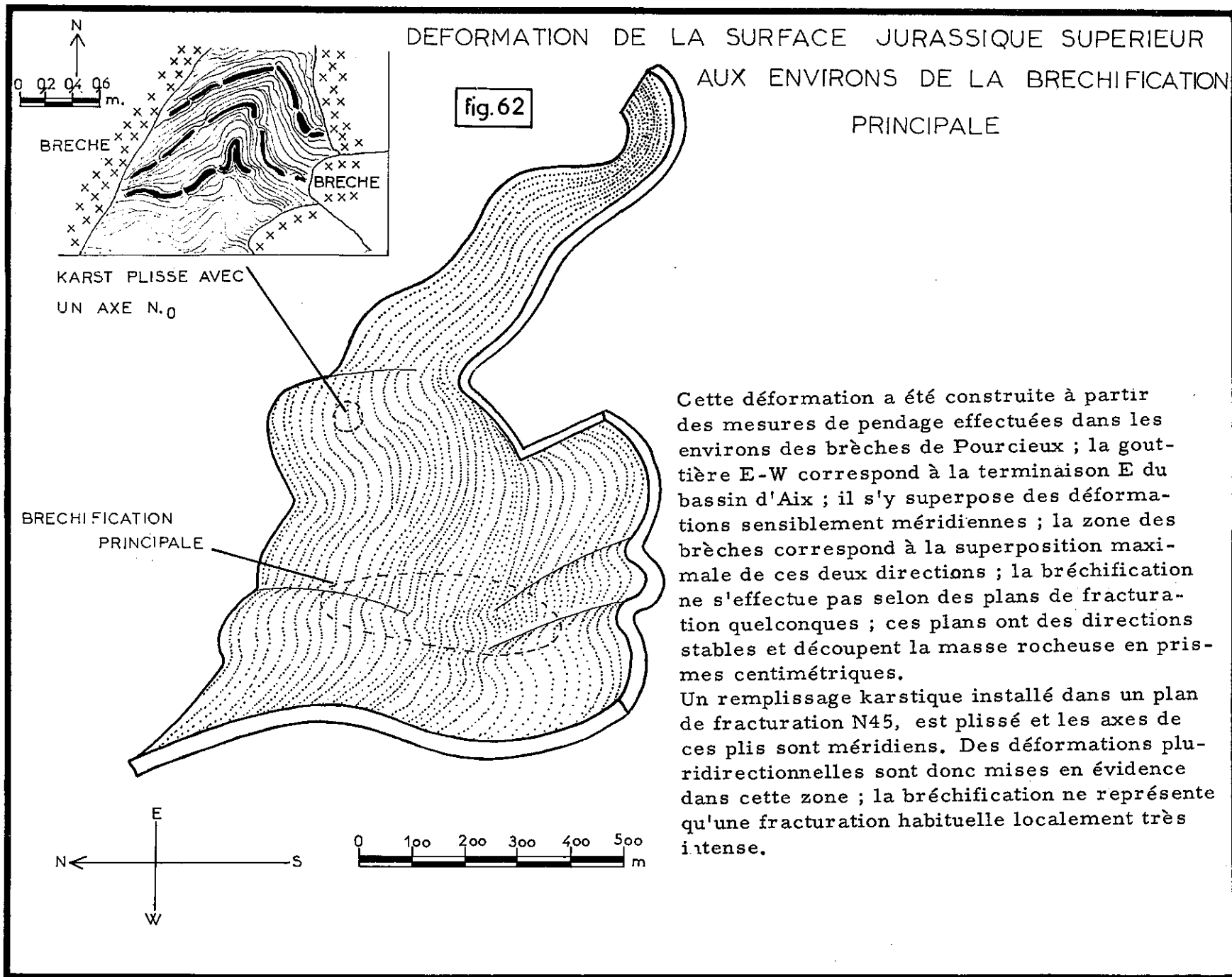


Photo 5 : La brèche de Pourcieux est due à une fracturation découpant la roche en prismes centimétriques. Des fragments se sont effondrés dans le remplissage karstique.

Photo 6 : Karst tectonisé montrant des plis d'axe NO.



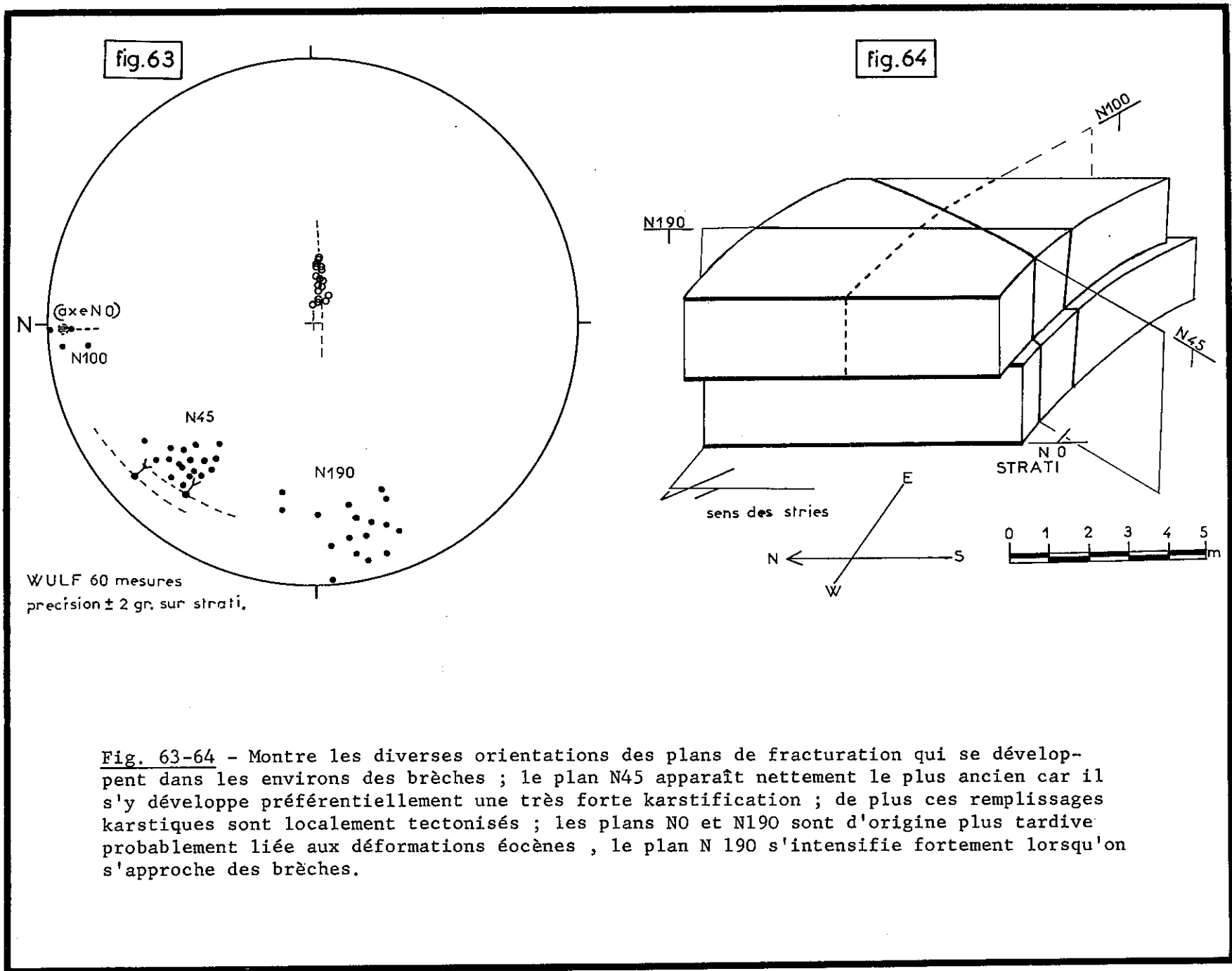


Fig. 63-64 - Montre les diverses orientations des plans de fracturation qui se développent dans les environs des brèches ; le plan N45 apparaît nettement le plus ancien car il s'y développe préférentiellement une très forte karstification ; de plus ces remplissages karstiques sont localement tectonisés ; les plans N0 et N190 sont d'origine plus tardive probablement liée aux déformations éocènes , le plan N 190 s'intensifie fortement lorsqu'on s'approche des brèches.

LA FRACTURATION : (fig. 63 - 64)

- Le plan N45 est d'une très grande extension - au moins hectométrique - ; une très forte karstification s'y est installée et a corrodé le calcaire en suivant préférentiellement ce plan ; de plus un dépôt de limonite s'est concrétionné aux épontes du remplissage karstique. Ces plans ne sont pas des failles puisqu'ils n'introduisent pas de désajustement des strates. Leur espacement varie de 1 à quelques mètres.
- Le plan N190 est d'extension toujours inférieure à 1 m ; mais son espacement varie beaucoup car ce plan joue un rôle important dans la bréchification où il devient très dense.
- Le plan N100 reste sporadique sauf peut-être dans les zones bréchiques où on le suit très mal.

INTERPRETATION DE CETTE FRACTURATION

Une étude fine des directions de plans n'a pas été possible dans les zones fortement bréchifiées où la maille, découpée par la fracturation, arrive à être centimétrique. Malgré cette extrême densité, il faut remarquer que la fracturation reste constituée de plans orientés (photo 4). Cette bréchification se présente donc comme une fracturation classique avec seulement un espacement entre les plans devenu localement très faible *.

Les plans de fracturation observés en bordure immédiate de la zone bréchifiée rappellent les orientations régionales qui sont sur le thème N45 - N145 et N zéro - N100 ; on aurait ici simplement une disparition de N145. D'autre part N45 apparaît relativement ancien en raison de sa karstification limoniteuse très développée. On peut faire l'hypothèse que N45 est une fracturation durancienne et que N190, N100 sont deux familles apparues avec les déformations éocènes. Par ailleurs on a vu que les déformations du plan de stratification (fig. 62) traduisaient un serrage selon deux directions. Le chapitre VII (synthèse des déformations regroupera les arguments en faveur d'un serrage bidirectionnel à la fin de l'Eocène.

LE FRONT DU CHEVAUCHEMENT DE L'AURELIEN : (X : 878, 879 - Y : 134, 135)

Ce chevauchement vers le Nord montre une cuesta régulière et monoclinale à son sommet avec une série normale et complète qui descend jusqu'au Lias inférieur au niveau où le Danien du remplissage du bassin se trouve chevauché. Dans ce Lias inférieur du soubassement, et en position frontale, des plis largement hectométriques et serrés se développent ; ils ont été mesurés et leurs axes construits (fig. 65) présentent une direction N100 très stable. Ces plis apparaissent en relation très directe avec l'avancement du chevauchement et par conséquent précisent la direction de la translation qui serait exactement N zéro.

Des lambeaux de Jurassique supérieur jalonnent la base frontale du chevauchement où ils se trouvent coincés entre le Lias inférieur du soubassement et le remplissage du bassin ; malgré l'écrasement qui est de règle, un de ces lambeaux a permis la réalisation de mesures qui sont portées sur les figures 66 et 67. On remarque surtout l'obliquité existant entre les plans pratiquement horizontaux associés à des stries N zéro d'une part, et la déformation du

* Dans cette brèche constituée de prismes, des complications d'agencement des éléments apparaissent liés à des rotations secondaires de prismes ou d'ensemble de prismes. Ces rotations ne peuvent apporter aucune précision supplémentaire sur les déformations ; il s'agit en effet d'un effondrement anarchique des prismes ou ensemble de prismes dans les vides introduits par l'altération karstique et que le remplissage a ultérieurement cimenté (photo 4).

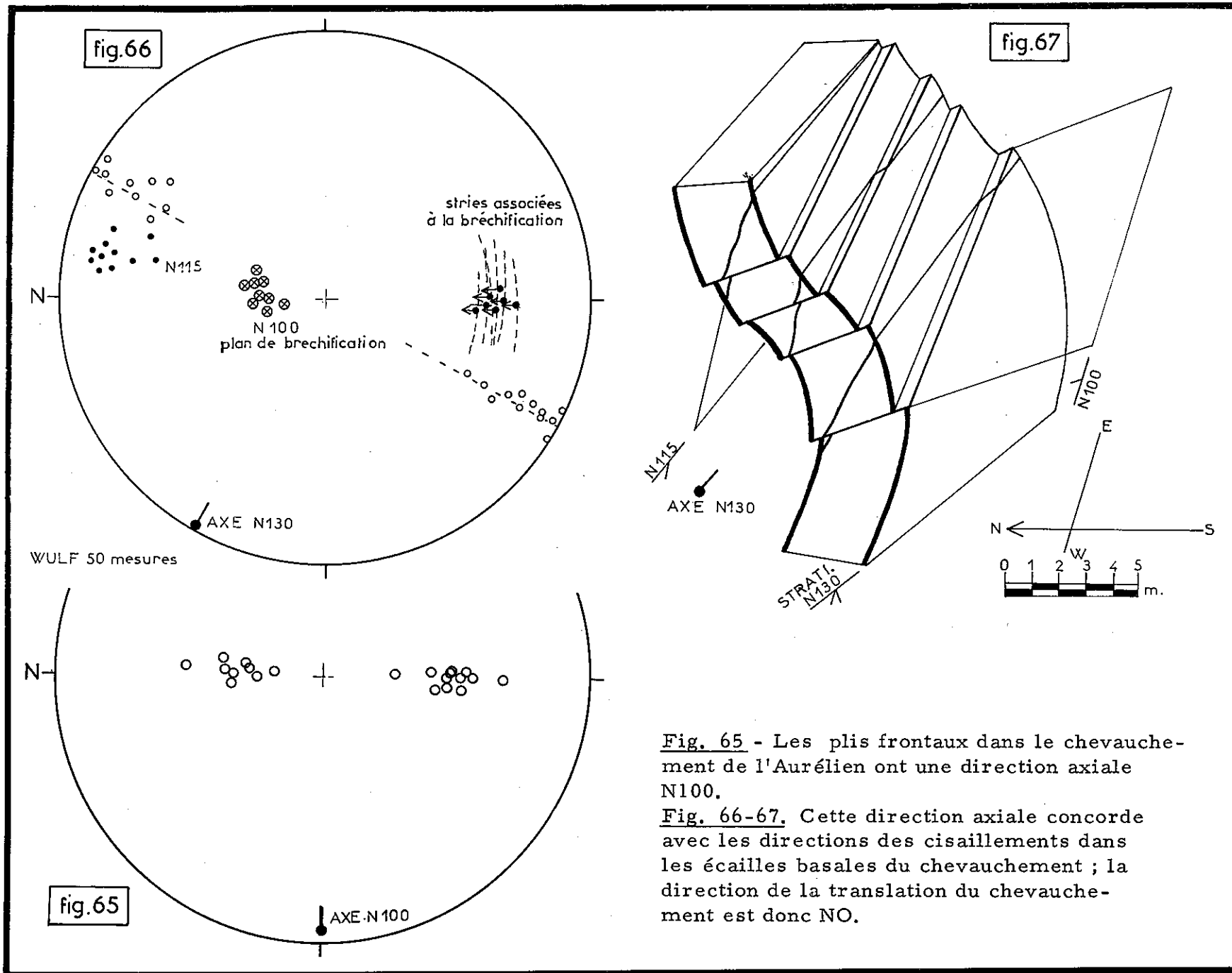


Fig. 65 - Les plis frontaux dans le chevauchement de l'Aurélien ont une direction axiale N100.

Fig. 66-67. Cette direction axiale concorde avec les directions des cisaillements dans les écailles basales du chevauchement ; la direction de la translation du chevauchement est donc NO.

plan de stratification qui amorce un axe de direction N130 d'autre part. Il faut ajouter que ces plans horizontaux supportent ici un début de bréchification (il s'agit d'une brèche d'écrasement, astructurale et très différente des brèches précédemment décrites) qui envahit complètement d'autres lambeaux en leur donnant l'aspect écrasé.

INTERPRETATION

La valeur de ces affleurements de Jurassique supérieur, à la base et au front du chevauchement, a déjà été discutée et deux hypothèses ont été émises :

- ce sont les témoins écrasés d'un flanc inverse de l'anticlinal ayant évolué en chevauchement ;
- ce sont des écailles rabotées sur l'avant pays lors de l'avancée du chevauchement.

L'histoire morphotectonique de la région, et les observations précédentes, s'accordent mieux avec la deuxième hypothèse ; les plans de cisaillement portant des stries N zéro seraient dus à l'avancée du chevauchement et l'on peut voir que cela s'accorde rigoureusement avec les axes des plis frontaux de direction N100. Les arguments concordent pour mettre en évidence une translation de direction N zéro pour cette partie de l'Aurélien. Quant à l'obliquité avec les stratifications de l'écaille, relativement à son cisaillement, il peut très bien s'agir d'une déformation antérieure à son rabotage par le chevauchement ; la simple translation ultérieure lui laissant un résidu de son ancien gauchissement.

LA BORDURE OUEST DE L'ARC TRIASIQUE DE L'HUVEAUNE

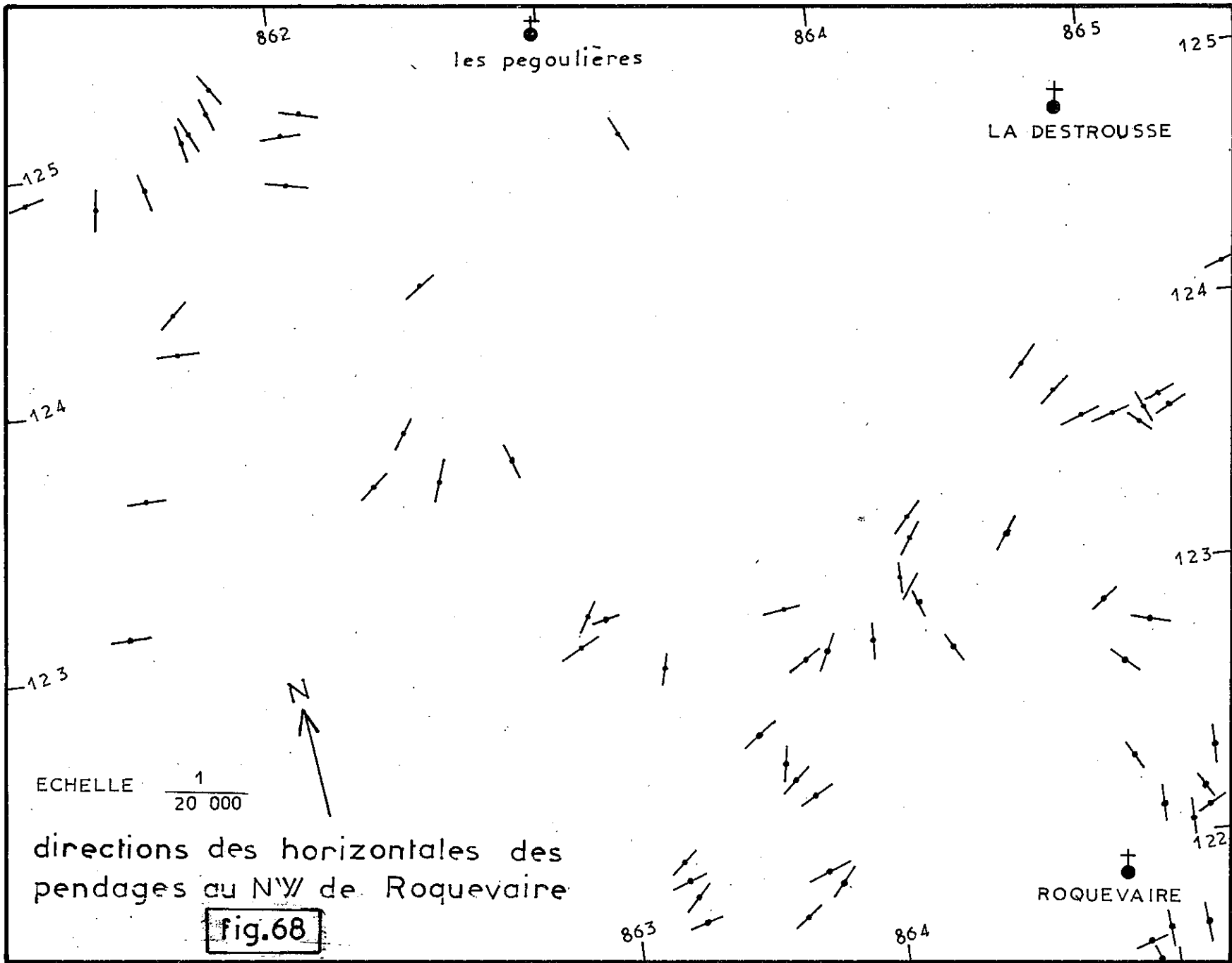
Les arcs triasiques de Provence sont d'importants affleurements de Trias qui, cartographiquement, apparaissent transversalement ou obliquement par rapport aux structures qu'ils semblent recouper ; un allongement courbé souligne leur forme caractéristique "d'arcs". A l'extrême nord est du bassin de Marseille se développe un tel dispositif que souligne une morphologie déprimée et où coule l'Huveaune (bordure sud de la carte au 1/80 000).

La périphérie de l'affleurement triasique fait apparaître une grande complexité cartographique. Deux structures majeures de la Provence sont interrompues à ce niveau : la Sainte-Beaume à l'Est et l'Etoile à l'Ouest, qui sont deux chevauchements importants. Au niveau de la synthèse régionale, la question de l'appartenance de ces deux chevauchements à une structure plus générale (nappe de basse Provence), secondairement compartimentée, n'est pas résolue ; des arguments semblent manquer pour faire décision.

Dans cette région d'étendue pourtant limitée, convergent un ensemble de problèmes dont la résolution sera déterminante pour une synthèse régionale. C'est une région clé.

Le travail présenté ici reste limité et constitue seulement une approche partielle (bordure ouest de l'arc) du problème géologique sous l'angle structuralogique.

Le parcours du terrain confirme l'apparence cartographique : l'enchevêtrement structural est très poussé et pratiquement aucune structure ne s'individualise. Le report cartographique des directions mesurées des pendages (dans le Jurassique et le Crétacé inférieur) illustre bien le phénomène : fig. 68. Néanmoins on remarque l'opposition très marquée de deux directions : la direction N150 des affleurements qui prolongent le front du chevauchement de l'Etoile, et la direction N50 parallèle à l'arc triasique.



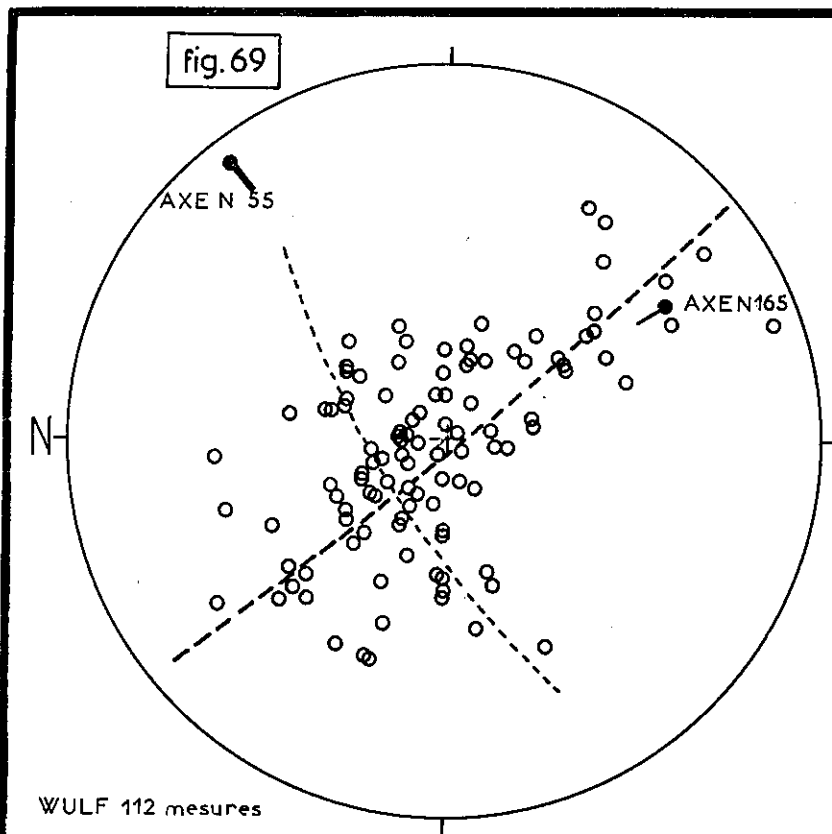


Fig. 69 - Les pendages mesurés dans la bordure ouest de l'arc triasique de l'Huveaune jusqu'à plusieurs kilomètres des affleurements de Trias se répartissent selon deux directions axiales dont la principale, N55, correspond à celle de l'arc alors que les affleurements cartographiques se rapprochent plus de la direction N165.

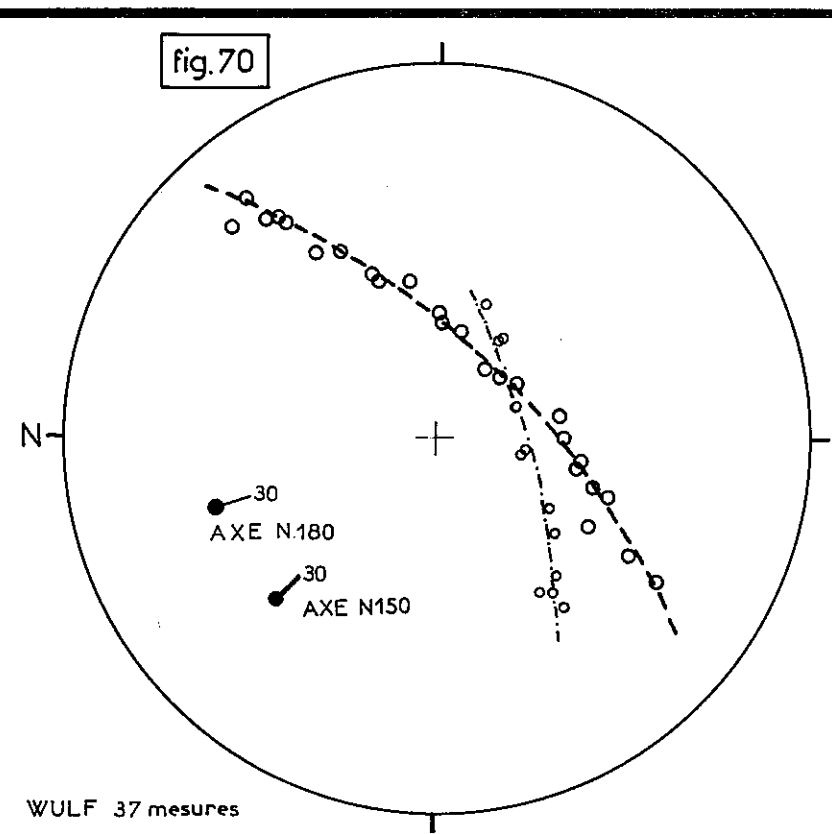


Fig. 70 - Met en évidence des axes N150 et N180; ces plis s'engagent sur le Trias en plongeant vers l'affleurement de Trias; ce plongement "anormal" vers le Trias s'accompagne d'une réduction importante de la série entre le Valanginien où ces plis ont été mesurés et le Trias sous-jacent; la couverture apparaît "biseauté".

Le report synthétique des pendages sur un diagramme de Wulf conduit à la figure 69. La dispersion du nuage de points traduit encore l'enchevêtrement structural ; mais cette dispersion n'est pas quelconque et deux étirements du nuage apparaissent. Le plus visible correspond à un axe * N55. Donc, conformément à la carte des directions de pendages (fig. 68), on voit s'imposer dans les affleurements qui bordent l'arc triasique la direction de l'arc lui-même.

L'autre étirement du nuage correspond à un axe plus confus de direction sensiblement N165 donc perpendiculaire au précédent et conforme à la direction cartographique des affleurements.

En résumé :

- . la figure 69 montre clairement la superposition de deux déformations, l'une axée N55 (la plus importante, parallèle à l'arc triasique), l'autre axée N165,
- . la figure 68 montre que les déformations axées N50 envahissent largement la bordure de l'arc jusqu'à plusieurs kilomètres de l'affleurement de Trias.

Ces approximations obtenues à partir de données "d'ensemble", restent maintenant à vérifier au niveau de la description d'une structure.

Des plis d'axe N150 et N180 ont été mesurés dans le Valanginien immédiatement au Nord Est de Roquevaire : X 865,2 - Y 122,1. Ces plis, qui sont décamétriques à hectométriques, n'ont pu être suivis dans leur prolongement axial mais il est à remarquer qu'au niveau des mesures le plongement axial est de 30gr vers le Sud Sud Est, c'est-à-dire vers l'affleurement de Trias (fig. 70).

La superposition de deux plissements se trouve réalisée dans une structure située au Nord Ouest du village d'Auriol : X 866,5 - Y 124,4 ; il s'agit de Jurassique supérieur en bancs de 30 cm d'épaisseur. Des plis décamétriques d'axe N190 se superposent à des replis métriques d'axe N105 (à quelques grades près ces plis sont donc perpendiculaires, les uns Nord-Sud, les autres Est-Ouest). Les axes de ces plis sont construits sur la figure 71 et la forme des strates est représentée sur la figure 72. Les plis les mieux développés sont d'axe méridien (photo 7). Pour compléter cette étude géométrique on notera que les plis est-ouest, malgré leur relative irrégularité, ont leur plan axial déformé car repris par le plissement nord-sud (photo 8), le pli nord-sud qui déforme le plan axial de l'autre pli serait postérieur et les irrégularités du pli est-ouest proviendraient de son replissement.

Malgré cette chronologie, il n'apparaît pas indispensable de faire intervenir deux "phases" distinctes de plissement pour aboutir à une telle structure (voir synthèse des déformations) ; étant donné le style géologique régional, on peut interpréter une telle structure comme résultant de la translation non exactement parallèle de deux compartiments de la couverture ; la composante principale de la translation commencerait par développer des plis est-ouest ; ensuite la convergence des deux translations devant être absorbée, des déformations nord-sud transverses auraient tendance à se superposer aux déformations antérieures est-ouest ; mais la couverture étant déjà plissée, cette déformation transverse (Nord-Sud) s'établirait de façon très inhomogène, c'est-à-dire s'accumulerait en zones méridiennes, ce qui expliquerait, ici, le surdéveloppement des plis nord-sud par rapport aux plis est-ouest. Ainsi la chronologie se trouve respectée dans le cadre d'une seule "phase tectonique".

* Il ne s'agit pas d'un axe au sens géométriquement défini comme pour un seul pli ; le diagramme est synthétique et correspond à la superposition de plusieurs structures et portions de structures. Il s'agit de ne mettre en évidence que l'allure du phénomène.

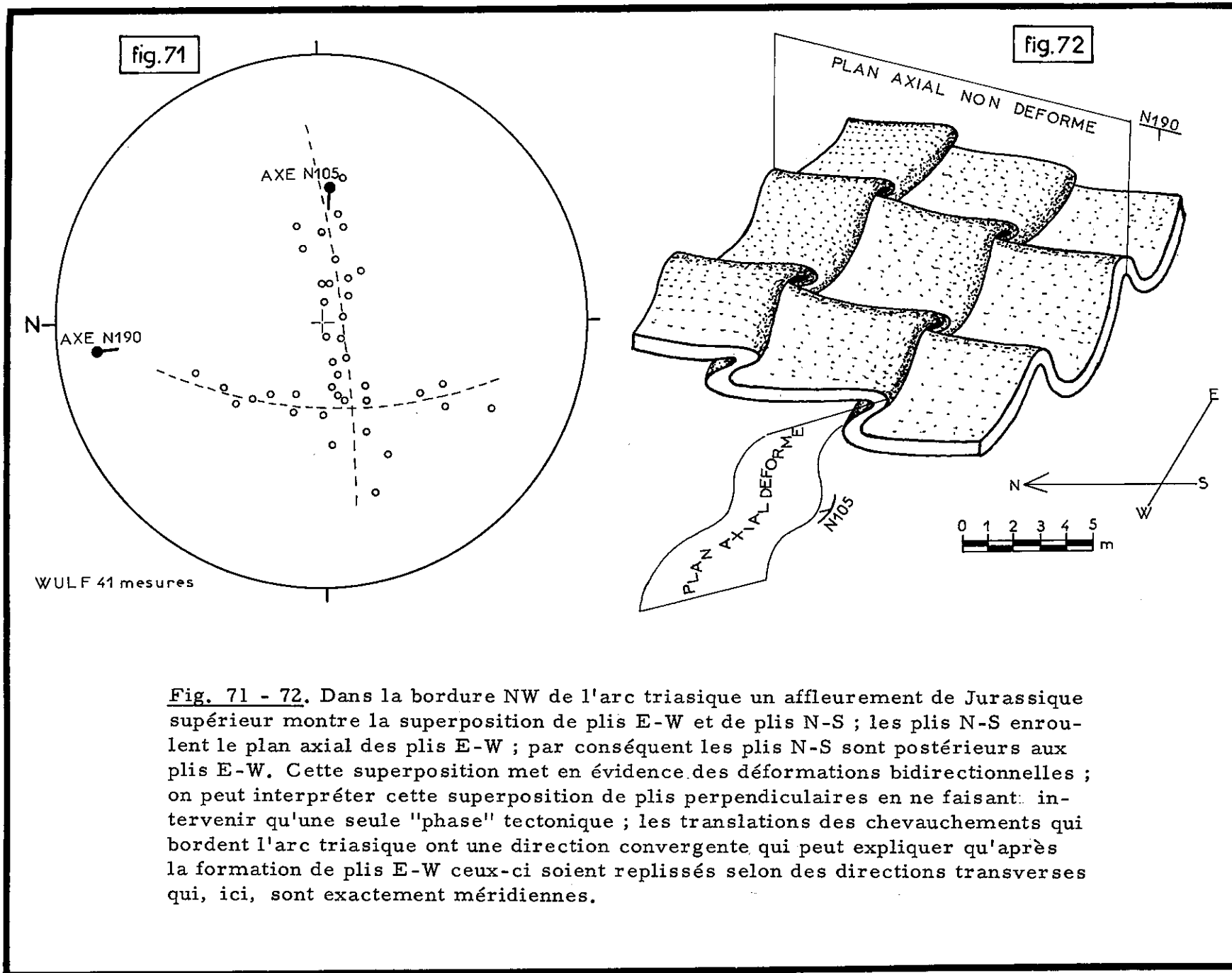


Fig. 71 - 72. Dans la bordure NW de l'arc triasique un affleurement de Jurassique supérieur montre la superposition de plis E-W et de plis N-S ; les plis N-S enroulent le plan axial des plis E-W ; par conséquent les plis N-S sont postérieurs aux plis E-W. Cette superposition met en évidence des déformations bidirectionnelles ; on peut interpréter cette superposition de plis perpendiculaires en ne faisant intervenir qu'une seule "phase" tectonique ; les translations des chevauchements qui bordent l'arc triasique ont une direction convergente qui peut expliquer qu'après la formation de plis E-W ceux-ci soient replissés selon des directions transverses qui, ici, sont exactement méridiennes.

En effet, on a constaté que les plis basaux et frontaux du chevauchement de l'Aurélien étaient orientés N100 ce qui traduit une translation de direction N zéro ; par contre la partie est du chevauchement de l'Etoile présente des plis équivalents orientés N130 c'est-à-dire une direction de translation N30. Dans ce cas, où deux compartiments de couverture (Est de l'Etoile et Aurélien - Sainte-Beaume) subissent deux translations qui convergent de 30 gr, la composante de rapprochement représente 45 % de la translation totale ; très schématiquement, on devrait trouver sur une aire donnée une tectonique nord-sud équivalente à la moitié de la tectonique est-ouest.

Néanmoins l'interprétation qui ferait intervenir deux "phases tectoniques" distinctes reste formellement admissible. Mais dans tous les cas la formation de ces plis à axes perpendiculaires met en évidence des déformations qui, régionalement, ne peuvent pas être considérées comme unidirectionnelles *.

LE FRONT DU CHEVAUCHEMENT DE L'ETOILE

Schématiquement, l'Etoile est une dalle de Jurassique supérieur et de Crétacé inférieur qui prolonge vers l'Est le pli de la Nerthe en chevauchant le remplissage du bassin d'Aix.

Fig. 73 - Les plis frontaux dans le NE de l'Etoile s'organisent autour d'un axe de direction N130.

Fig. 75-76, Un liséré de Gargasien jalonne le front de chevauchement de l'Etoile ; il y a des lambeaux d'Urgonien dont l'un a montré une charnière anticlinale d'axe N130 concordant avec les plis relevés dans le chevauchement.

Fig. 74 - Plus à l'Ouest la partie frontale de l'Etoile montre un changement d'orientation de plis qui passent à une direction N110 ; la courbure du front de ce chevauchement a donc une cause structurale et pas seulement morphologique ; de plus ce chevauchement ne correspond pas à des translations parallèles ; ces translations sont divergentes.

* Seule la bordure ouest de l'arc triasique a été étudiée. Néanmoins le parcours très rapide de la bordure est a montré de très beaux exemples de tectoniques superposées. L'envahissement de la Sainte-Beaume par des déformations méridiennes est bien visible dans le bas du col de l'Espigoulier ; il s'y développe une série de plis décamétriques, métriques et décimétriques avec deux directions axiales superposées.

fig.73

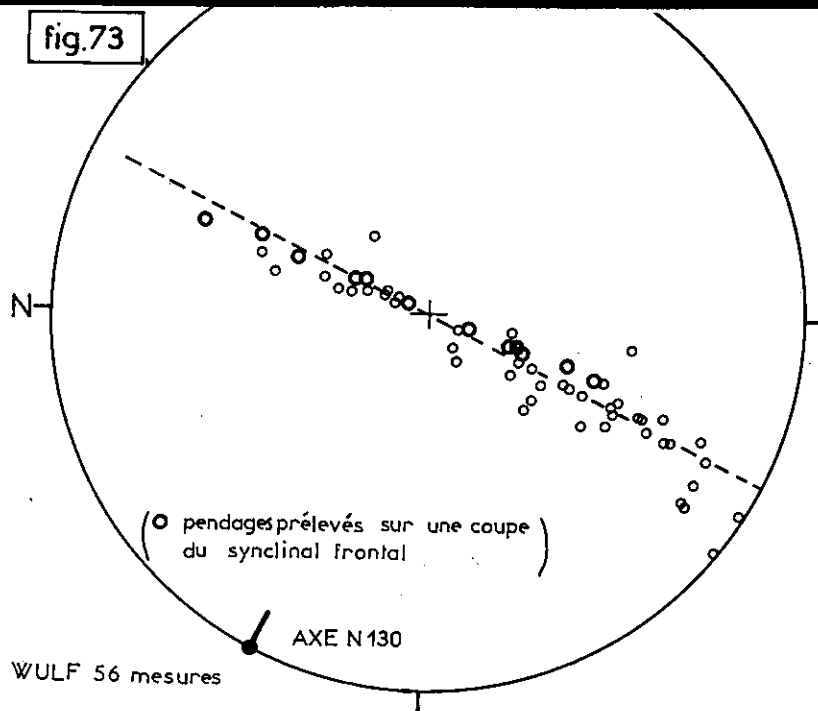


fig.75

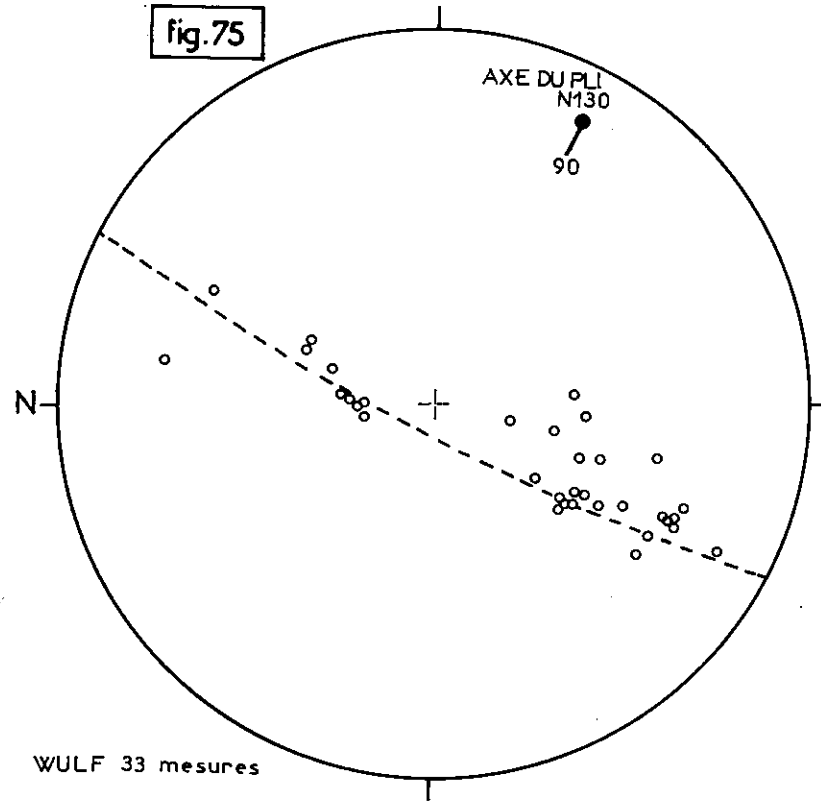


fig.74

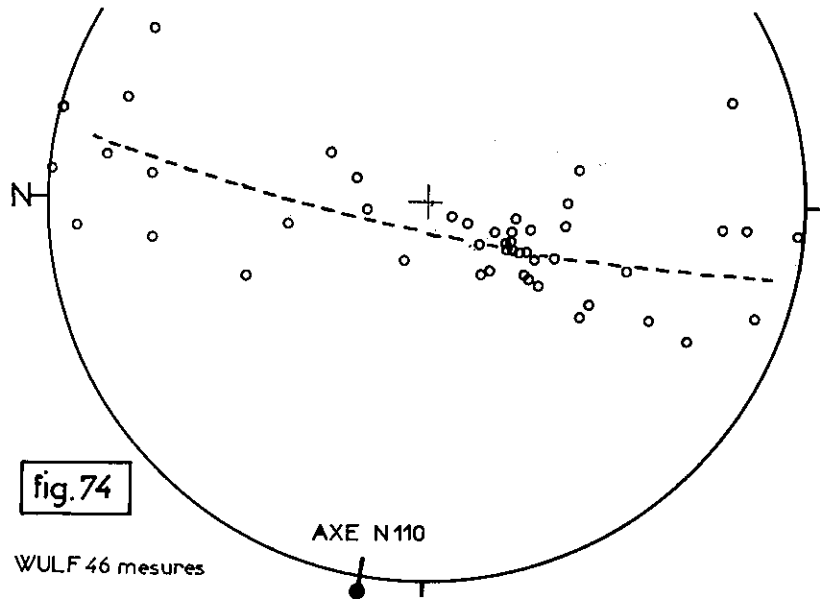
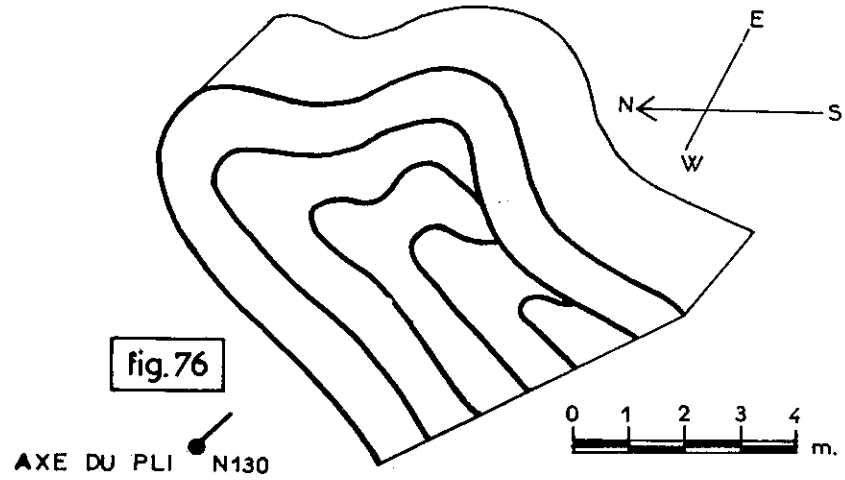


fig.76



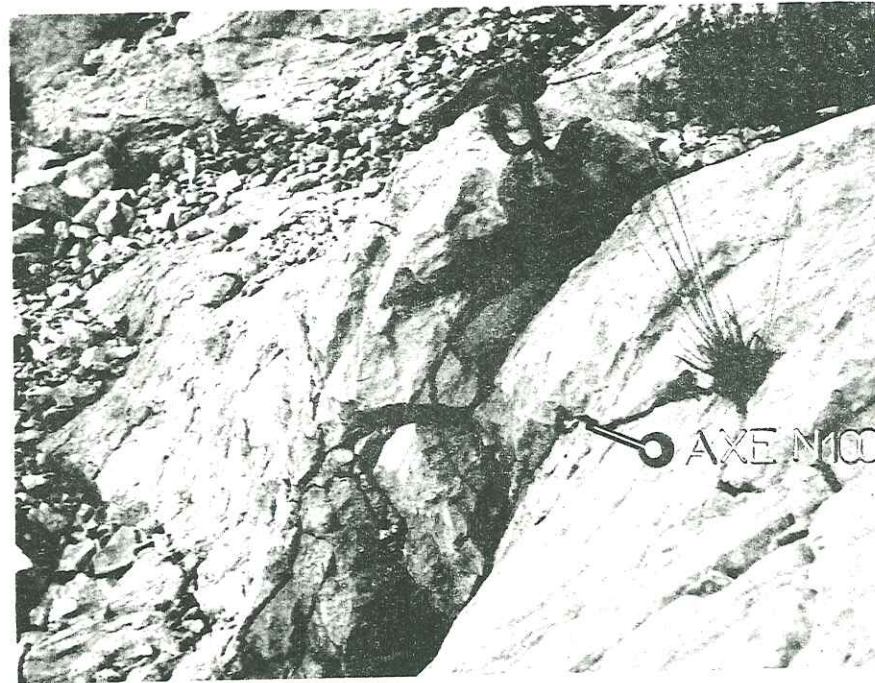


Photo 7 : Un pli méridien dans le Jurassique Supérieur bordant l'arc triasique de l'Huveaune à proximité d'Auriol.

Photo 8 : Pli d'axe N100 déformé par un pli d'axe NO près d'Auriol.

DANS LA REGION DE MIMET - SAINT-SAVOURNIN

les déformations

Des mesures ont été effectuées dans cette portion du chevauchement. A l'arrière du front de chevauchement, et par conséquent dans le chevauchement, il se développe un repli synclinal de longueur plusieurs fois hectométrique et de développement axial kilométrique puisqu'il s'agit du prolongement vers l'Est du synclinal du Pilon du Roi. L'axe mesuré ici montre une direction N130 (fig. 73). L'ensemble des mesures de pendages des couches effectuées dans cette région s'organise assez rigoureusement autour de cet axe N130 (fig. 73). Un sillon aptien, dont l'origine est liée à la formation de l'isthme durancien, se trouve engagé sous la partie frontale du chevauchement ; çà et là des pointements d'Urgonien, généralement fortement écrasés, sortent dans les affleurements d'Aptien. Dans le pointement urgonien situé immédiatement dessous Mimet, un pli anticlinal, décamétrique, a pu être mis en évidence. Son axe construit présente également une direction N130 (fig. 75) ; les couches y montrent des étirements importants ainsi qu'un déversement vers le Nord (fig. 76).

la fracturation

Le découpage des falaises en prismes est très spectaculaire au front du chevauchement, surtout dans les niveaux compétents du Crétacé inférieur : deux familles de plans constituent l'essentiel de cette fracturation qui est enroulée par les déformations du plan de stratification ; les figures 77 - 78 montrent ces deux plans perpendiculaires à la stratification et leur enroulement. Cet exemple est pris dans les dalles urgoniennes redressées au-dessus de Mimet. Les zones moins redressées montrent ces plans dans une position verticale avec une orientation N45 et N145 ; le plan N45 est assez systématiquement le mieux réglé ; son espacement est fréquemment métrique et son extension décamétrique à hectométrique ; le plan N145 est nettement moins réglé et son extension est plus limitée.

PLUS A L'OUEST ENTRE LE COL SAINTE-ANNE ET SIMIANE-COLLONGUE

les déformations

Les mesures effectuées ne s'ordonnent plus avec la même rigueur autour d'un axe et la dispersion devient plus forte (fig. 74). Néanmoins l'axe que l'on peut encore très valablement obtenir prend une orientation N110 ; relativement à sa position plus à l'Est (N130), on a donc une réorientation d'environ 20 gr. La courbure cartographique du front de chevauchement correspond donc à la réalité structurale.

la fracturation

Aux deux familles de plans (N45 et N145) qui composent l'essentiel de la fracturation plus à l'Est, il se superpose ici les deux familles orientées N15 et N115 qui sont elles aussi perpendiculaires à la stratification ; mais le plan N15 reste prépondérant tant par son extension que par son espacement ; il est même fréquent que le plan N115 soit absent.

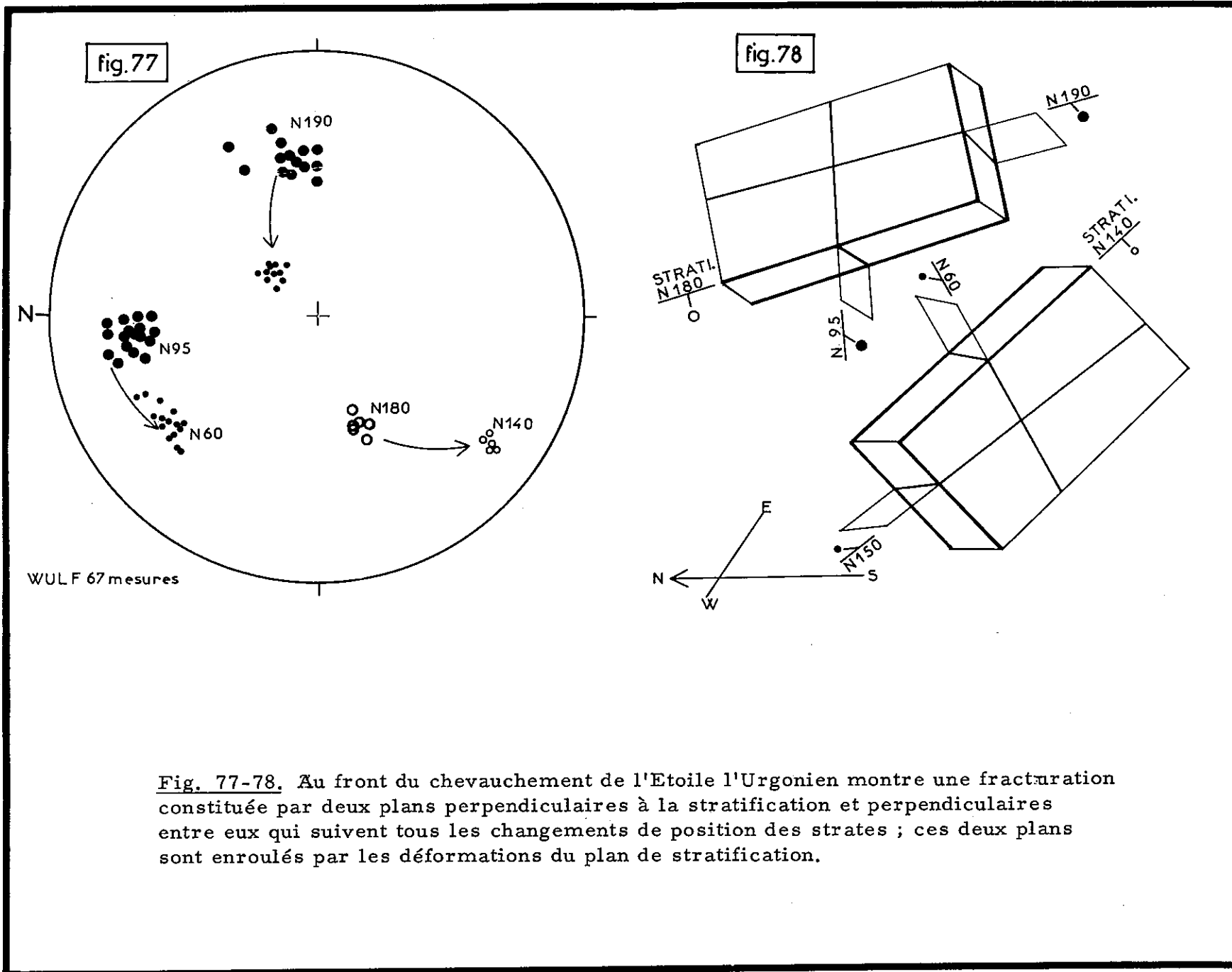


Fig. 77-78. Au front du chevauchement de l'Etoile l'Urgonien montre une fracturation constituée par deux plans perpendiculaires à la stratification et perpendiculaires entre eux qui suivent tous les changements de position des strates ; ces deux plans sont enroulés par les déformations du plan de stratification.

LA PARTIE SUD DE L'ETOILE

Dans la galerie du Canal de Provence

Cette zone tabulaire de la partie sud du massif de l'Etoile a surtout été étudiée dans la galerie du Canal de Provence qui fait la jonction entre les "Cayols" au Nord et le "Vallon Dol" au Sud ; cette traversée part du cœur triasique écrasé du pli et arrive dans la zone où la structure amorce son ennoyage sous les formations récentes du bassin de Marseille. Les extrémités de la galerie étant bétonnées, seule la partie intermédiaire, peu tectonisée, a pu être étudiée.

Les déformations du plan de stratification

Dans la partie sud de la coupe une forte dolomitisation envahit le sommet du Jurassique supérieur ainsi que le Crétacé inférieur. Ces dolomies arrivent à être complètement massives, sans aucune stratification mesurable. De plus, une importante karstification altère le massif et il devient très difficile de préciser ce qui peut se passer à certains endroits de la galerie, en particulier s'il s'y trouve ou non des failles. On peut simplement remarquer que, dans certains cas, des karsts importants sont uniquement guidés par des champs de diaclases ne décalant pas les plans de stratification ; par contre un cisaillement important a pu être observé dans la galerie (faille de La Mure) : aucune karstification ne s'y était installée.

Dans un premier stade de l'étude les mesures effectuées, qu'il s'agisse de l'orientation des couches ou de l'orientation des diaclases, ont été regroupées tous les 100 m en utilisant le repérage des P.M. de la galerie.

Cette étude analytique n'apportant que des précisions très secondaires, toutes les mesures effectuées sur 5 km de galerie ont été regroupées sur la figure 79. En ce qui concerne l'orientation des couches, on remarque un étirement du nuage de points selon un axe orienté sensiblement N 85-90. On constate alors que ce massif de l'Etoile présente une rotation de son axe des déformations, axe dont on a mis en évidence l'évolution suivante : N 130 au Nord Est du massif, N 110 au Nord, N 85-90 au Sud Ouest ; soit une rotation de 40-45 gr en se déplaçant vers l'Ouest.

Mais si la figure 79 montre un allongement du nuage de points regroupant le plus grand nombre des mesures, certaines valeurs de pendage s'écartent notablement du centre du nuage et par conséquent de la direction axiale N 85 matérialisée par le pointillé. Ce fait a pu être observé dans la galerie où, au niveau des bancs moins compétents de la base du Jurassique supérieur, les pendages oscillent autour de deux directions axiales : une première oscillation autour d'un axe est-ouest (conforme à l'axe de la grande structure) et une deuxième oscillation autour d'un axe sensiblement Nord-Sud.

la fracturation

Les pôles des diaclases ont donné lieu à un comptage statistique représenté sur la figure 80. En effet cette zone tabulaire de l'Etoile montre une fracturation à forte dispersion ; l'envahissement de la série par le faciès dolomitique jouant un rôle dispersif dans la fracturation. Le diagramme met en évidence trois maxima de densité de pôles qui correspondent aux orientations : N 75, N 175, N 45. Le maximum N 175 présente un allongement qui peut être attribué à deux raisons complémentaires : la première, c'est un certain enroulement du plan par le balancement de la stratification autour de l'axe N 85, la deuxième serait la présence d'un maximum mal individualisé vers la direction N 145 complémentaire de N 45 ; sur le terrain on observe en fait la coexistence de ces deux directions (N 175 et N 145) et c'est la forte dispersion des orientations qui est responsable de ce flou synthétique.

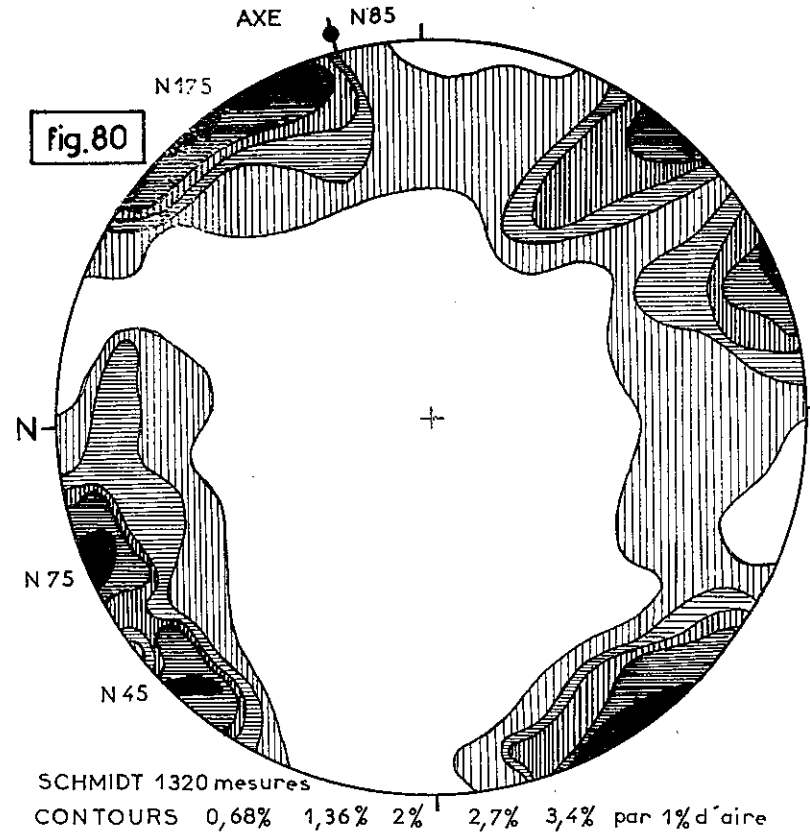
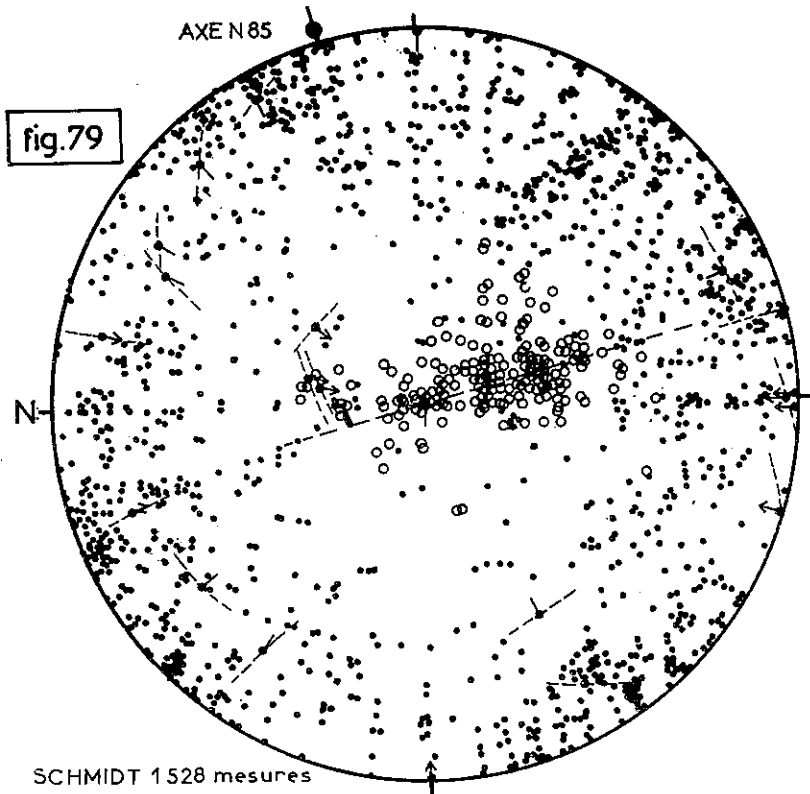


Fig. 79-80. Cette fracturation a été relevée en 5 km de galerie dans le flanc S du massif de l'Etoile ; le développement des faciès dolomitiques est responsable de la forte dispersion des orientations des diaclases ; néanmoins le comptage statistique fait apparaître les directions régionales N75 et N175 QUI GUIDE PREFERENTIELLEMENT LA KARSTIFICATION ; N45 est un plan d'origine antérieure au reste de la fracturation ; N145 se trouve masquée par le flou synthétique. Les pendages se répartissent principalement sur un axe N85 qui montre qu'entre le NE et le SW du chevauchement de l'Etoile il existe une rotation axiale de 45 gr ; ceci met en évidence l'inhomogénéité des translations dans ce chevauchement de l'Etoile.

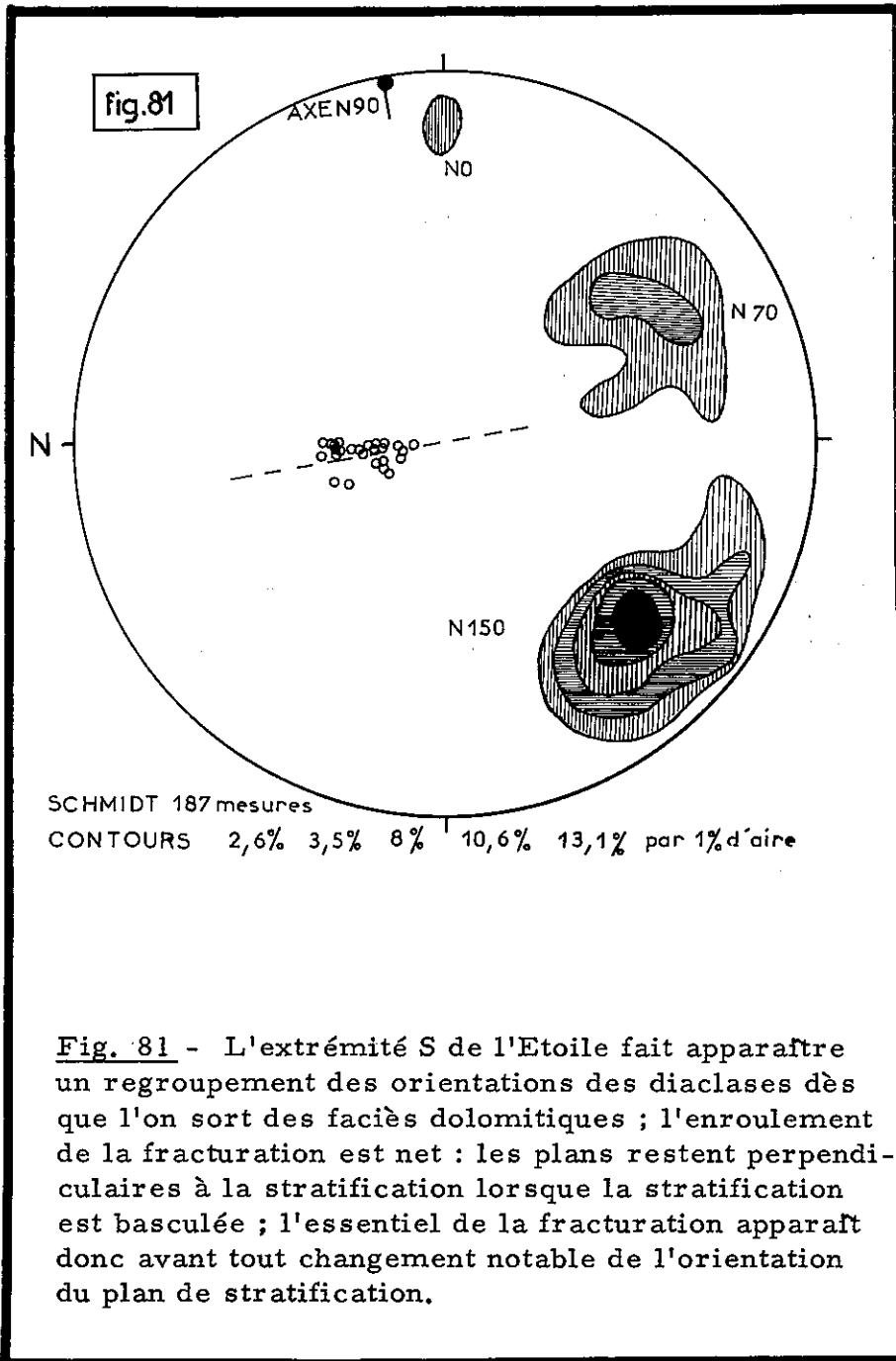


Fig. 81 - L'extrémité S de l'Etoile fait apparaître un regroupement des orientations des diaclases dès que l'on sort des faciès dolomitiques ; l'enroulement de la fracturation est net : les plans restent perpendiculaires à la stratification lorsque la stratification est basculée ; l'essentiel de la fracturation apparaît donc avant tout changement notable de l'orientation du plan de stratification.

Interprétation de cette fracturation

Le plan N45 se singularise par son extension apparemment importante (il est difficile de la préciser par des observations en galerie) et son remplissage de calcite poudreuse mélangée d'argile karstique jaune ; de plus il joue un rôle dominant dans la karstification du massif qu'il guide très nettement. C'est une raison pour lui attribuer une origine antérieure aux deux familles N75 et N175 qui sont d'extension plus limitée avec une altération karstique secondaire qui paraît nettement commandée par celle du plan N45. De plus cette altération karstique secondaire s'installe préférentiellement dans le plan N75.

On aurait en résumé :

- une fracturation ancienne composée surtout du plan N45 et peut être de son complémentaire N145,
- une fracturation apparue postérieurement et composée des plans N75 et N175.

La première pouvant correspondre aux déformations duranciennes, la seconde aux déformations de l'Eocène.

AU DEBOUCHE DE LA GALERIE

A l'extrémité sud de la galerie de l'Etoile, la Société du Canal de Provence réalise une retenue dans le calcaire Urgonien. Les impératifs d'étanchéité étant stricts et la fracturation importante, la solution envisagée consiste à étancher la retenue par un revêtement continu du réservoir. Pour la mise en œuvre de cette technique, un "décapage" du site a été entrepris ; lors de la présente étude, seule la rive gauche du vallon Dol était dégagée de son altération de surface. Des mesures géométriques y ont été réalisées mais sans approfondir le rôle que cette fracturation peut jouer vis à vis de l'ouvrage entrepris. Pourtant le décapage du site dans cette zone, si riche du point de vue fracturation, mériterait une étude fine qui, vraisemblablement, serait un modèle pour la compréhension des implications géotechniques de la fracturation ; des relations déformation-fracturation, fracturation-anisotropie de perméabilité, fracturation-karstification, fracturation-morphologie et altération de surface, pourraient s'y trouver utilement précisées, autant sur le plan théorique que sur le plan pratique.

La fracturation

Les mesures effectuées sont reportées sur la figure 81. La dispersion est beaucoup moins importante que celle relevée plus au Nord dans les faciès dolomitiques ; du reste le passage à ces faciès est observable en bordure du décapage et la déstabilisation des directions de diaclases est très nette. La figure 81 montre :

- un plan N150 qui a une extension plus que décimétrique et un espacement variant de 10 à 50 cm ; c'est donc un plan très dense ; une forte altération lui est associée ;
- un plan N70 d'extension métrique à décimétrique avec un espacement de 15 à 20 cm ; l'altération y est nettement inférieure à celle de N150 ;
- un plan méridien se développe localement mais avec une grande extension.

Interprétation de cette fracturation

Ces trois plans sont perpendiculaires à la stratification et leur basculement apparaît nettement commandé par la stratification qui les enroule. Si l'on remet la stratification à plat selon l'axe N90, ces plans de fracturation prennent une position verticale avec les orientations respectives : N145, N70, N10. La comparaison avec la fracturation de la galerie plus au Nord met en évidence :

- une nette individualisation de N145 (précédemment mal distinct de N175 en raison de la forte dispersion) ;
- une dispersion de N45 ;
- une apparition de N10 ;
- une permanence de N70-75.

Les deux systèmes de fracturation, mis en évidence par ailleurs, ne seraient plus représentés chacun que par une seule famille de plans. L'apparition de N10 n'est pas interprétable. Il est possible que ce plan soit en relation avec les cisaillements qui sont régionalement responsables de l'individualisation du bassin de Marseille.

Sous l'angle géotechnique on peut remarquer que les familles N150 et N70 pentées Sud avec un espacement qui peut être décimétrique, donnent au site une anisotropie de perméabilité très défavorable qui explique la mesure radicale prise pour étancher la retenue.

AU SUD-OUEST DE L'ETOILE

Une déformation

La tranchée de l'autoroute sortant de Marseille (X : 844,9 - Y : 126,7) ravive des affleurements cartographiés Argovien - Oxfordien - Callovien indifférenciés. Des plis décimétriques à hectométriques s'y développent dont deux ont pu être mesurés ; leurs axes construits montrent des directions N170 et N195 avec des plongements vers le Sud de 40 et 50 gr (fig. 82). Ce sont de bons exemples de plis transverses aux grandes structures. Il est remarquable que leur situation n'est pas quelconque mais se situe sur la transversale où le chevauchement de l'Etoile s'individualise par rapport au pli complexe de la Nerthe qui, plus à l'Ouest, n'est pas (ou peu) chevauchant, mais il y a plus car cette transversale correspond, au-delà du massif de l'Etoile, au faisceau de déformations méridiennes déjà aperçu dans la bordure nord du bassin au niveau du Bimont. On verra aussi au chapitre suivant que ces accidents transverses affectent le remplissage du bassin.

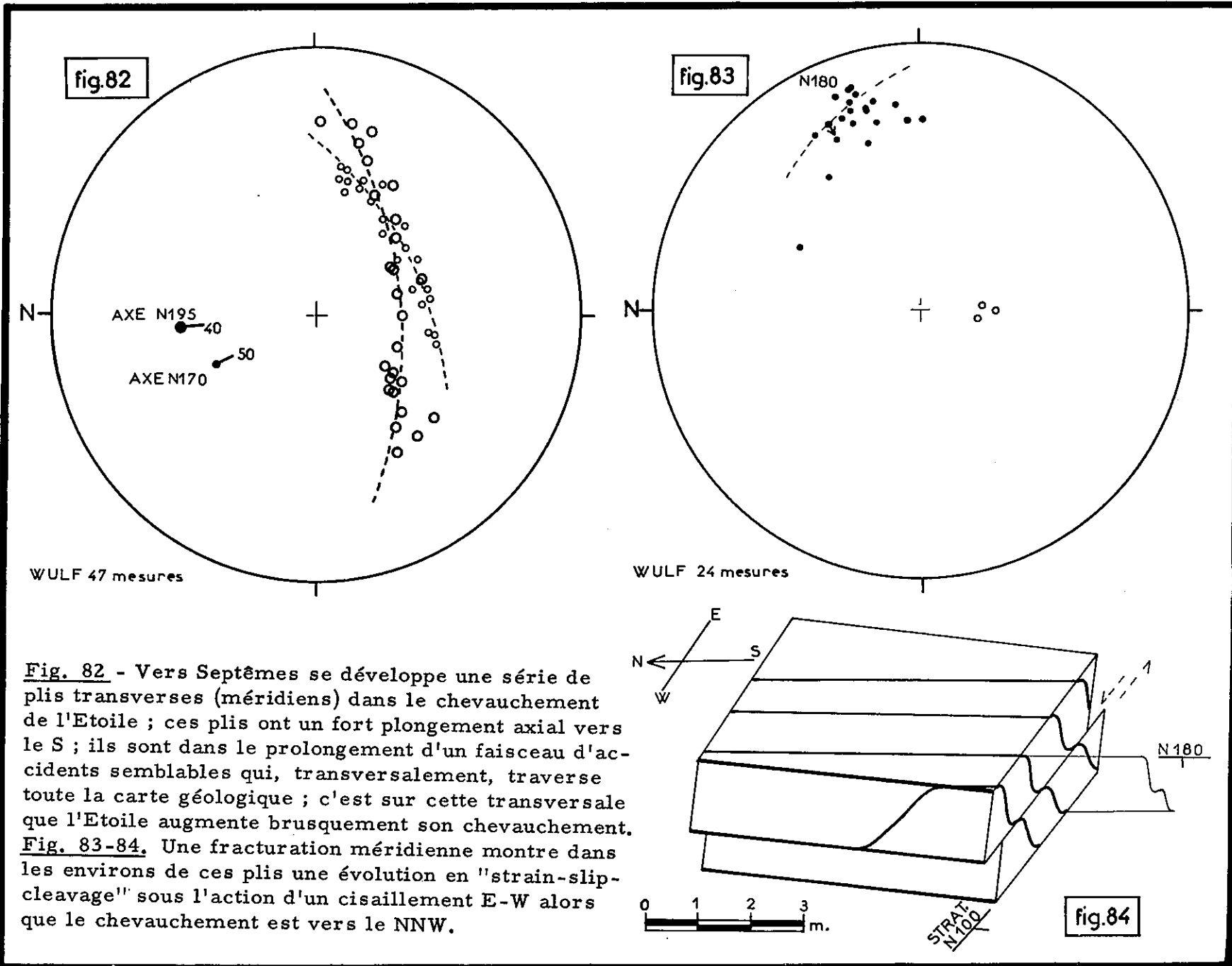


Fig. 82 - Vers Septèmes se développe une série de plis transverses (méridiens) dans le chevauchement de l'Etoile ; ces plis ont un fort plongement axial vers le S ; ils sont dans le prolongement d'un faisceau d'accidents semblables qui, transversalement, traverse toute la carte géologique ; c'est sur cette transversale que l'Etoile augmente brusquement son chevauchement. **Fig. 83-84.** Une fracturation méridienne montre dans les environs de ces plis une évolution en "strain-slip cleavage" sous l'action d'un cisaillement E-W alors que le chevauchement est vers le NNW.

Une fracturation

a été relevée dans les environs (X : 845,8 - Y : 127) et se trouve représentée sur les figures 83-84. Cette famille de plans a une orientation N180 qui deviendrait N175 (avec une position verticale) si l'on remettait la stratification horizontale ; le plus intéressant est de voir que cette fracturation est déformée par un cisaillement couche sur couche ; or ce cisaillement est de sens est vers ouest pour le banc, supérieur relativement au banc sous-jacent. Cette fracturation a commencé d'évoluer vers un "strain slip cleavage" mais le sens de la déformation est, là encore, transversal aux grandes structures.

CHAPITRE VI

LE REMPLISSAGE DU BASSIN D'AIX

Après l'émergence consécutive aux déformations de l'isthme durancien, la transgression du Crétacé supérieur s'installe dans cette gouttière au Santonien ; suivent les faciès régressifs du Campanien et du Maestrichtien. Puis une sédimentation se poursuit en continuité durant l'Eocène. Dans la partie est du bassin qui est considérée ici, la transgression oligocène n'est pas intervenue ou n'a pas laissé de sédimentation ; le Miocène non plus *.

LES DEFORMATIONS DU PLAN DE STRATIFICATION

Cette partie orientale du bassin est actuellement une aire synclinale ayant une quinzaine de kilomètres d'un bord à l'autre, enserrée entre des domaines dont on a vu la tendance à chevaucher le bassin (Sainte-Victoire au Nord, Aurélien et Etoile au Sud). La carte géologique met en évidence un lent basculement de la gouttière vers le Nord : la transgression du Crétacé supérieur s'est d'abord installée au Sud puis a gagné vers le Nord ; l'axe de plus grande subsidence se trouve de plus en plus décalé vers le Nord. Il est possible que ce basculement, apparemment assez continu, ait subi des accélérations et des perturbations à certaines époques. Un "slump" de grande dimension a été observé au-dessus de Valabre (X : 851,7 - Y : 135,3) dans la barre calcaire du Thanétien ; il est représenté sur la figure 86 ; son axe construit présente une orientation assez surprenante : N145. Ce glissement en cours de sédimentation, dont on peut penser qu'il a suivi la plus grande pente, s'est donc effectué obliquement au bassin et franchement vers le Nord Est. Toute l'épaisseur de la dalle est affectée ; ces phénomènes ne semblent pas très répandus car c'est le seul observé. Il s'agit probablement d'un glissement d'ensemble de la couche déterminé par des mouvements embryonnaires **. Un épais soubassement d'argilites rouges a dû grandement faciliter ce glissement.

D'autre part, ce slump est situé sur le faisceau de déformations méridiennes qui s'individualise à l'Ouest de cette partie orientale du bassin et qui a déjà été rencontré dans les bordures nord et sud. Or actuellement cette zone a plutôt un pendage général vers l'Ouest ou le Nord Ouest ; si elle a subi des déformations dont témoigne le slump, ces déformations étaient orientées différemment : glissement vers le Nord Est au Thanétien, alors qu'actuellement le basculement est vers le Nord Ouest. Ceci met en évidence, d'une part la pérennité de ces déformations transverses, d'autre part la diversité des mouvements qu'elles engendrent.

* Cette étude n'ayant aucune visée stratigraphique, le problème de l'âge du sommet du plateau du Cengle, notamment des gypses, n'est pas abordé.

** Un phénomène sédimentaire est associé à ce slump sous la forme d'un relai de la barre calcaire par une autre barre : au Nord du slump la barre inférieure, slumpée, se termine rapidement en s'effilant ; elle se trouve relayée par une autre barre, non slumpée, qui s'effile au niveau du slump ; ainsi l'épaisseur de la barre se trouve à peu près constante (fig. 86).

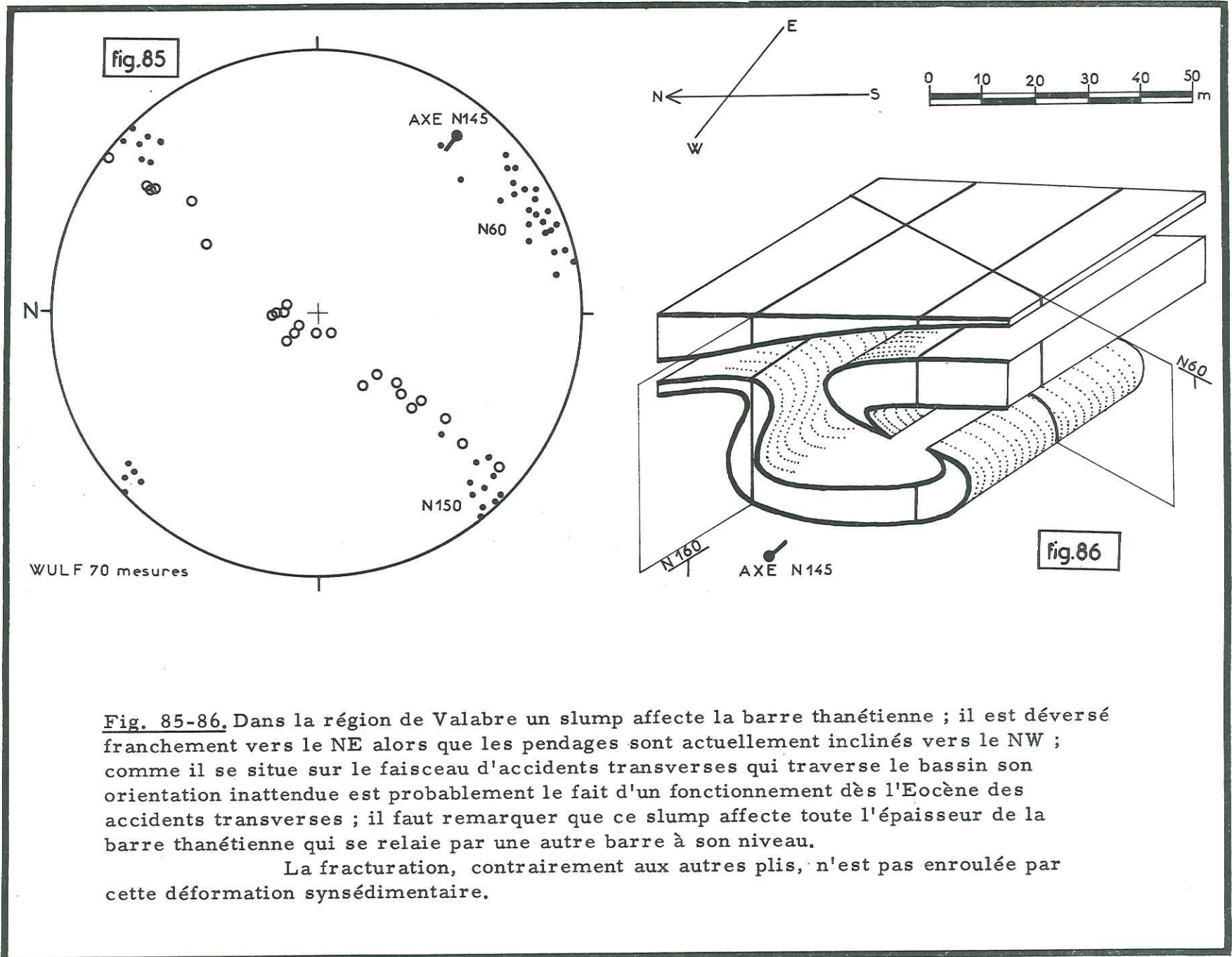


Fig. 85-86. Dans la région de Valabre un slump affecte la barre thanétienne ; il est déversé franchement vers le NE alors que les pendages sont actuellement inclinés vers le NW ; comme il se situe sur le faisceau d'accidents transverses qui traverse le bassin son orientation inattendue est probablement le fait d'un fonctionnement dès l'Eocène des accidents transverses ; il faut remarquer que ce slump affecte toute l'épaisseur de la barre thanétienne qui se relaie par une autre barre à son niveau.

La fracturation, contrairement aux autres plis, n'est pas enroulée par cette déformation synsédimentaire.

fig.87

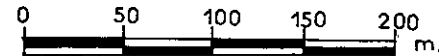
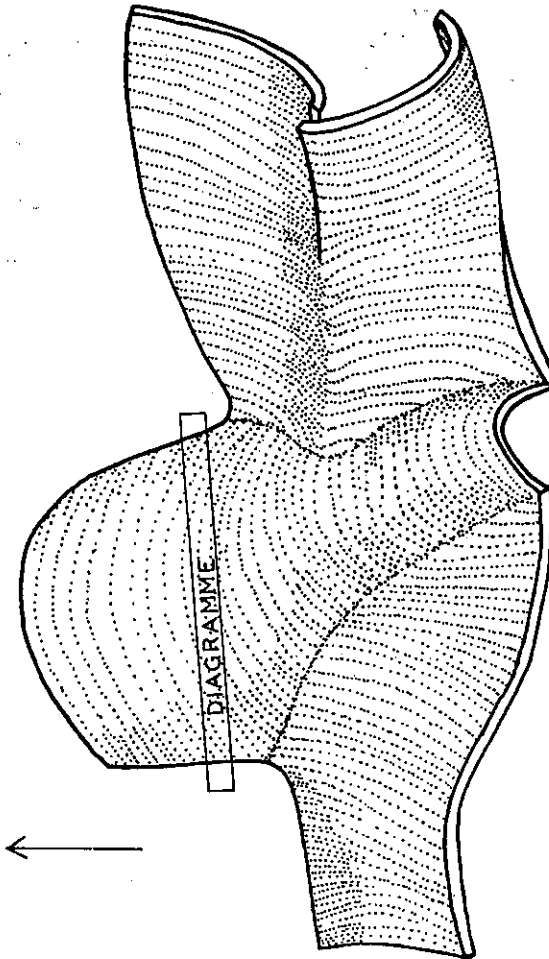
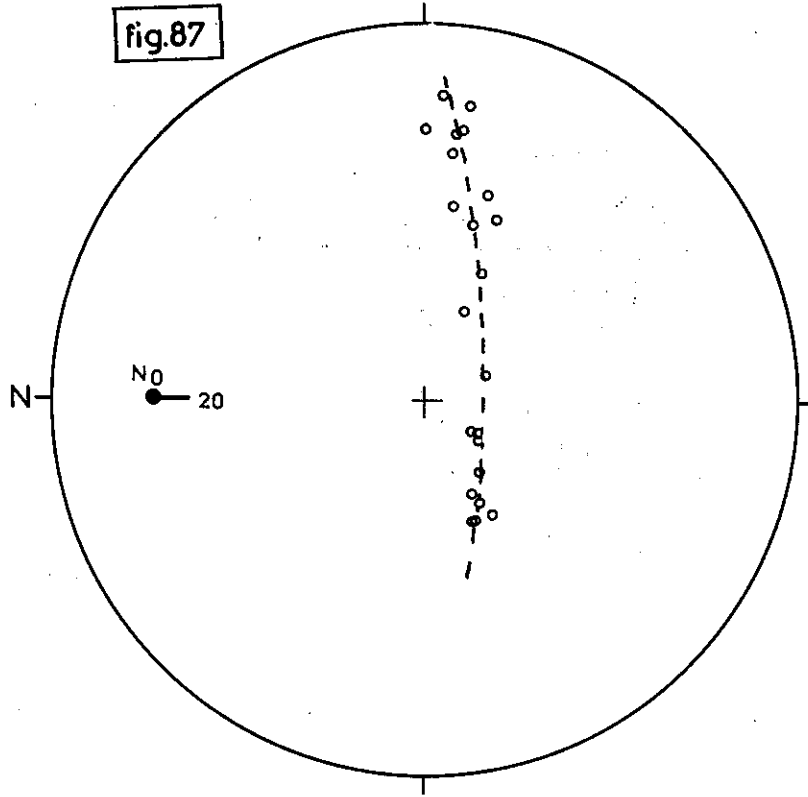


fig.88

Fig. 87-88. Cette figure montre la convergence et même la superposition d'un anticlinal exactement méridien avec une déformation E-W qui est ici une réplique de l'écaïlle de Gardanne ; l'anticlinal NO est situé sur le faisceau d'accidents transverses qui traverse le bassin ; on peut voir que les déformations bidirectionnelles se répercutent dans le remplissage du bassin.

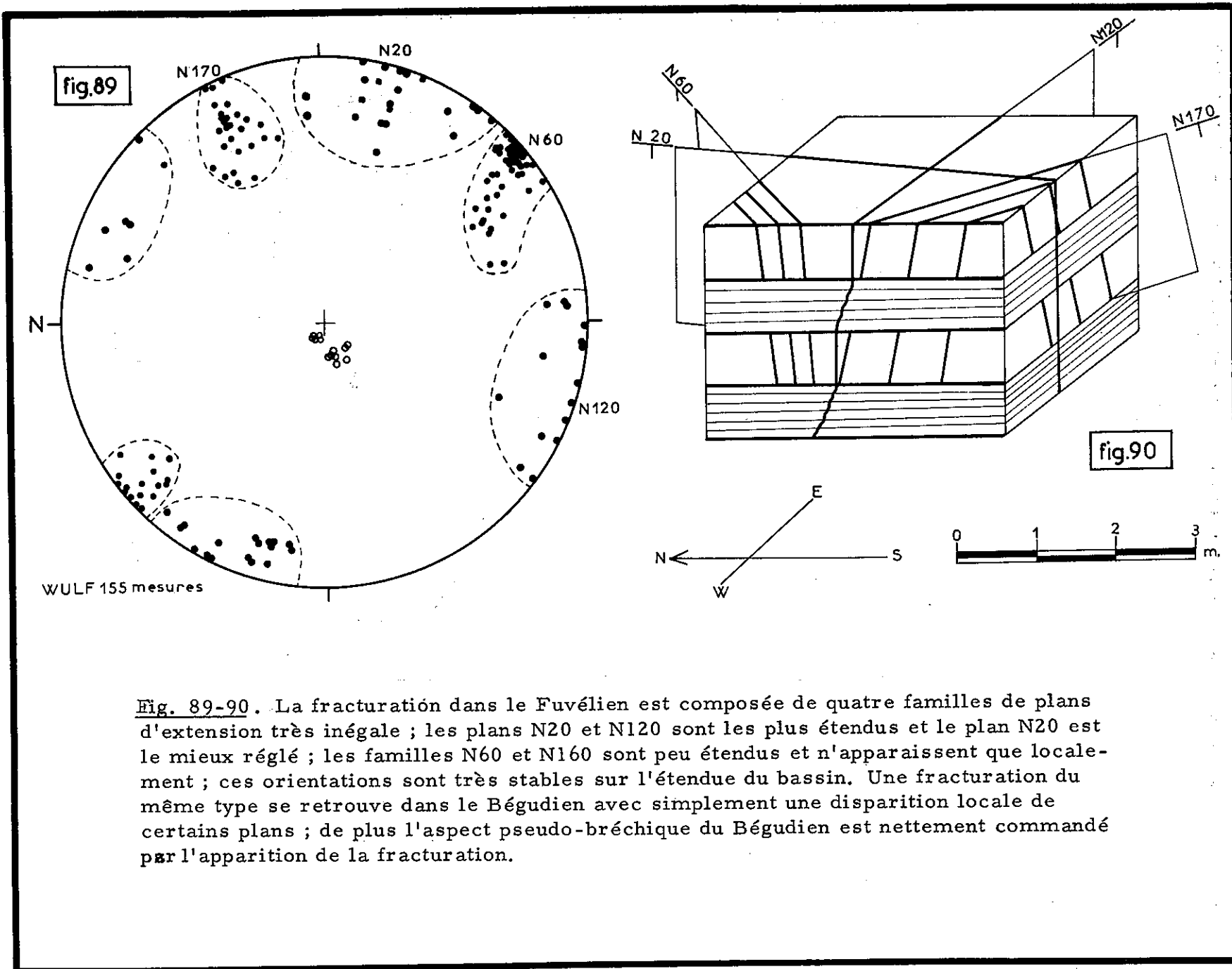


Fig. 89-90. La fracturation dans le Fuvélien est composée de quatre familles de plans d'extension très inégale ; les plans N20 et N120 sont les plus étendus et le plan N20 est le mieux réglé ; les familles N60 et N160 sont peu étendus et n'apparaissent que localement ; ces orientations sont très stables sur l'étendue du bassin. Une fracturation du même type se retrouve dans le Bégudien avec simplement une disparition locale de certains plans ; de plus l'aspect pseudo-bréchique du Bégudien est nettement commandé par l'apparition de la fracturation.

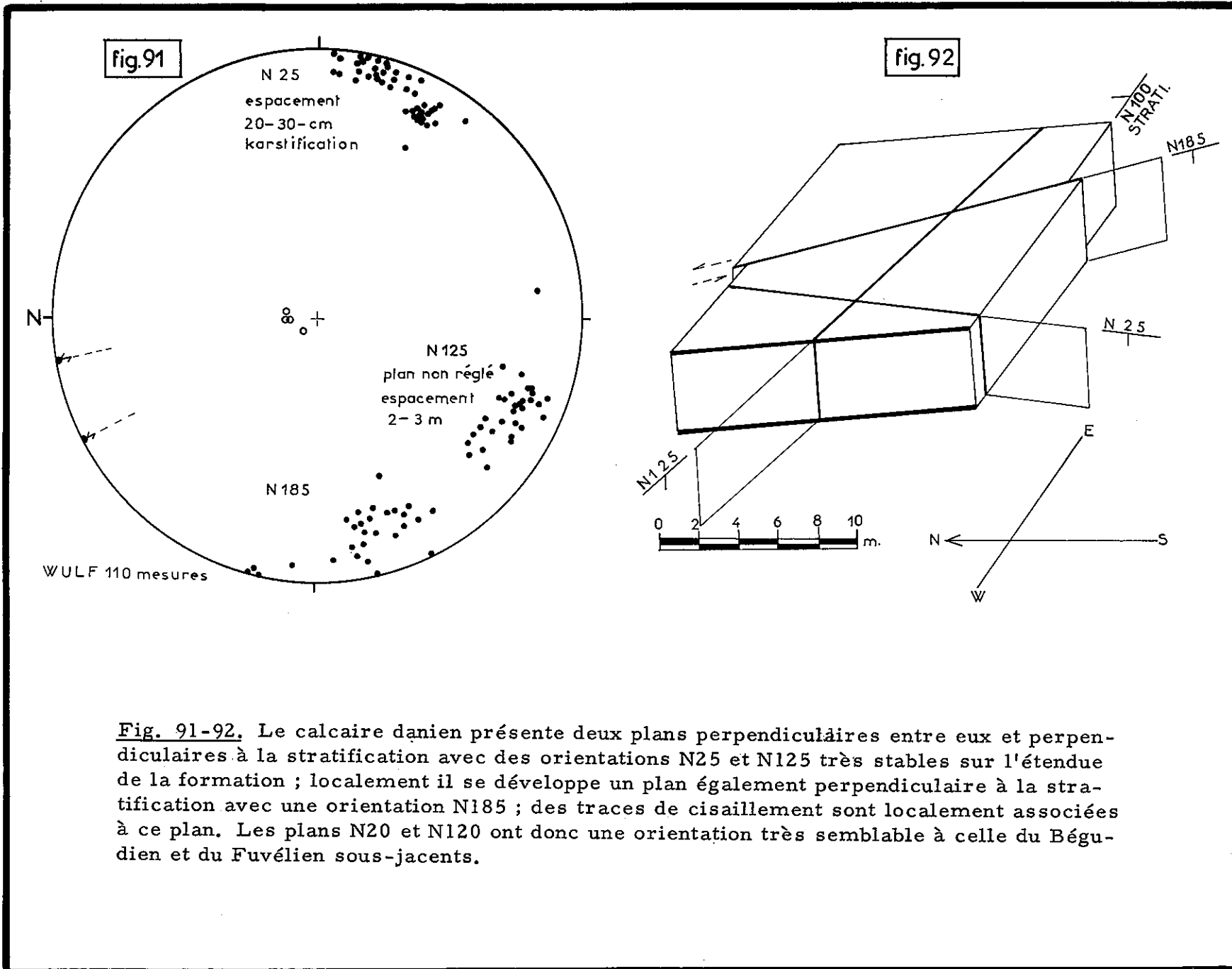


Fig. 91-92. Le calcaire danien présente deux plans perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la stratification avec des orientations N25 et N125 très stables sur l'étendue de la formation ; localement il se développe un plan également perpendiculaire à la stratification avec une orientation N185 ; des traces de cisaillement sont localement associées à ce plan. Les plans N20 et N120 ont donc une orientation très semblable à celle du Béguvien et du Fuvélien sous-jacents.

Une déformation transverse appartenant à ce même faisceau et affectant le remplissage éocène (Thanétien - Sparnacien - Yprésien) a été observée immédiatement au Sud-Ouest de Bouc-Bel-Air. A cet endroit il y a convergence et même superposition de déformations est-ouest et nord-sud. La déformation est-ouest est représentée par une réplique de l'écaillage de Gardanne ; écaillage dans les niveaux du Crétacé supérieur du remplissage et qui résulte du chevauchement vers le Nord par la chaîne de l'Etoile. Quant à la déformation nord-sud, il s'agit d'un anticlinal plusieurs fois hectométrique et dissymétrique dont les pendages vers l'Est sont les plus accusés (90 gr). A l'endroit mesuré, l'axe construit présente une direction N zéro et un plongement vers le Sud de 20 gr. Les figures 87 et 88 donnent une représentation schématique de cette déformation bidirectionnelle.

LA FRACTURATION

FRACTURATION DANS LE CAMPANIEN SUPERIEUR (= FUVÉLIEN) fig. 89-90 et photo 9

Cette formation typique du bassin d'Aix a une épaisseur variant de 300 m au Sud du bassin, à 20 m au Nord. Dans ce calcaire marneux, s'intercalent des couches ligniteuses productives et étendues.

Les carrières ouvertes au Sud du bassin permettent de bonnes observations ; la fracturation est très remarquable car très dense et très constante.

. N20 est le plan le mieux réglé, avec une extension décamétrique ; il ne se déforme pas en traversant les niveaux marneux et peut devenir calciteux sans stries observées ;

. N120 est stable en direction mais se déforme en traversant les bancs marneux pour reprendre, mieux réglé, dans les bancs calcaires.

Ces deux plans perpendiculaires sont des éléments stables de la fracturation dans le Fuvélien.

. N60 est un plan se développant localement mais toujours avec une forte densité, l'espacement pouvant devenir centimétrique. Son extension est, au maximum, métrique.

Par contre, dans un champ de ces plans, la dispersion d'orientation est très faible - inférieure à 5 gr par exemple - mais un autre champ fera apparaître une autre direction moyenne, légèrement décalée, réintroduisant dans l'ensemble une dispersion habituelle.

. N170 possède les mêmes caractéristiques que N60.

Ces deux plans étant d'apparition locale, un site peut n'en présenter aucun, un seul ou les deux.

Fig. 93-94-95-96. Dans le poudingue du Danien terminal l'essentiel de la fracturation est encore constitué par deux plans perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la stratification ; mais tout en restant perpendiculaires entre eux la direction de ces plans change sur l'étendue de la formation. Il se peut qu'à cette époque de sédimentation perturbée et de remaniement paléogéographique l'état de contrainte régional soit déstabilisé. Mais à la différence habituellement rencontrée entre les deux plans perpendiculaires (le plan le plus méridien est généralement le plus étendu et le mieux développé) s'ajoute ici une précision : le plan méridien tronçonne les galets cristallins (sans décaler les tronçons de façon observable) alors que l'autre plan les contourne.

fig.93

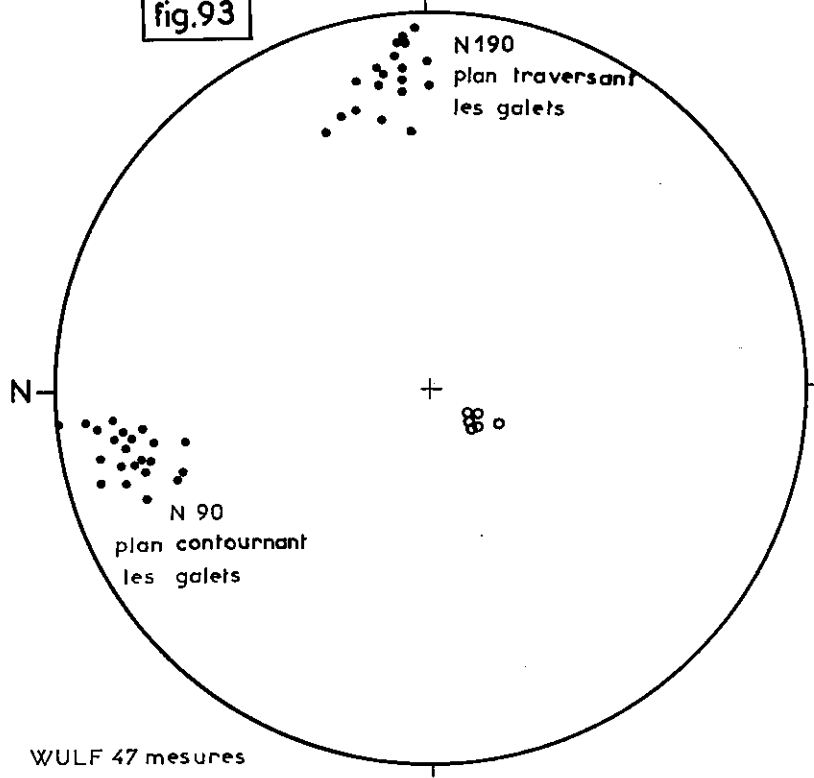


fig.95

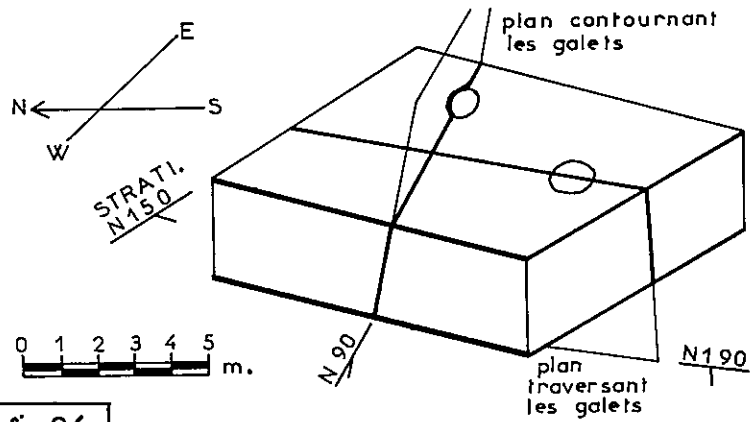
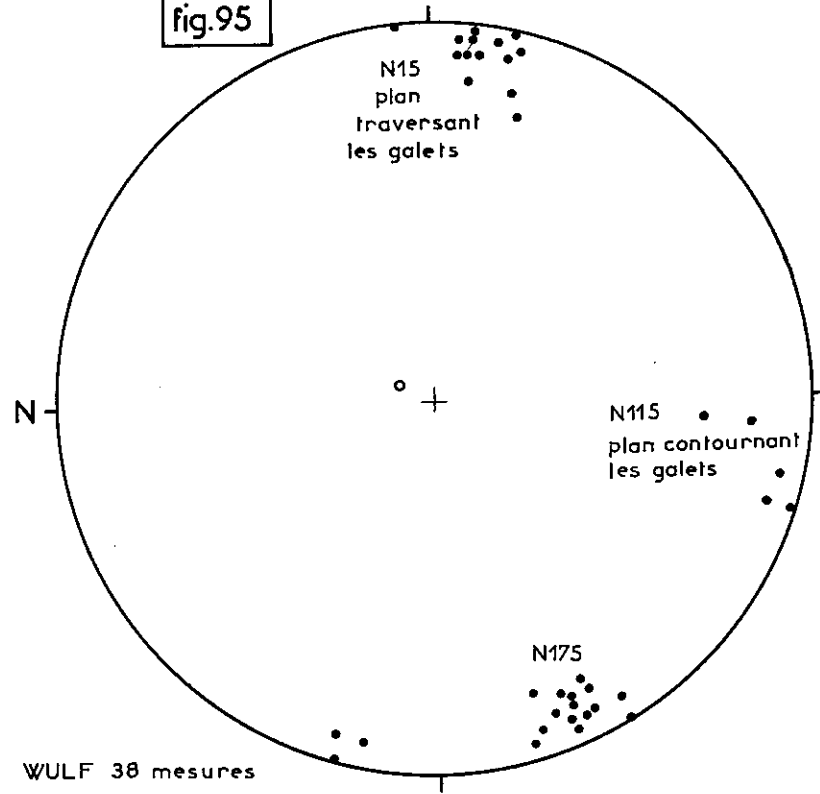


fig.94

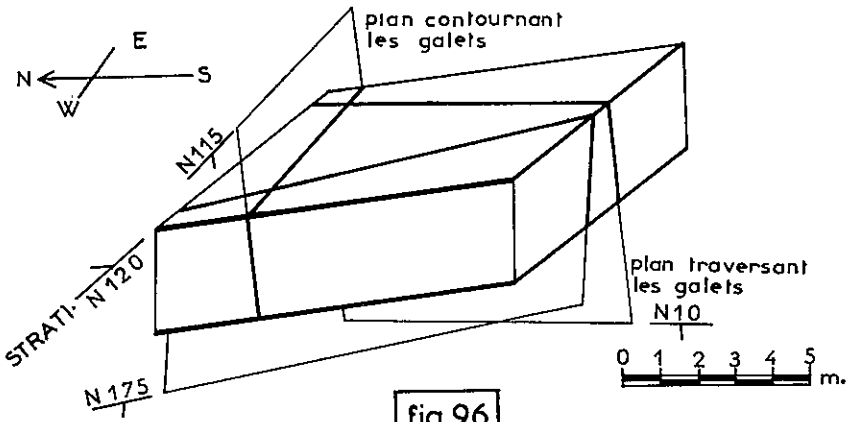


fig.96

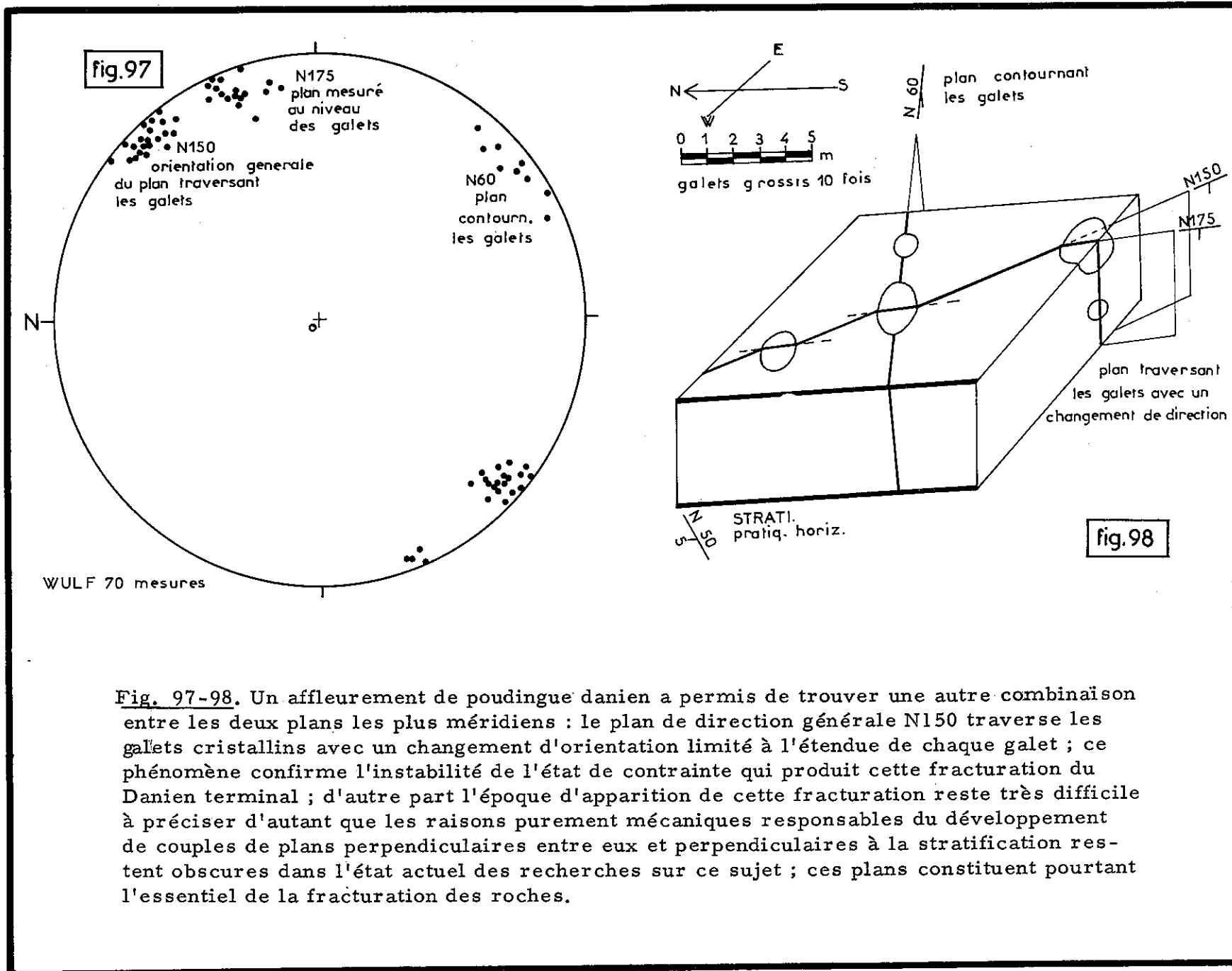


Fig. 97-98. Un affleurement de poudingue danien a permis de trouver une autre combinaison entre les deux plans les plus méridiens : le plan de direction générale N150 traverse les galets cristallins avec un changement d'orientation limité à l'étendue de chaque galet ; ce phénomène confirme l'instabilité de l'état de contrainte qui produit cette fracturation du Danien terminal ; d'autre part l'époque d'apparition de cette fracturation reste très difficile à préciser d'autant que les raisons purement mécaniques responsables du développement de couples de plans perpendiculaires entre eux et perpendiculaires à la stratification restent obscures dans l'état actuel des recherches sur ce sujet ; ces plans constituent pourtant l'essentiel de la fracturation des roches.

FRACTURATION DANS LE MAESTRICHTIEN (= BEGUDIEN)

Cette formation alternée de calcaires et de marnes, d'une épaisseur maximale de 320 m présente une fracturation qui se ramène au type Campanien supérieur par la disparition de plans selon des combinaisons variables mais où N20 est le plus fréquent avec N170 ; en plus de leur orientation, ces plans conservent leurs caractéristiques campaniennes.

Il est fréquent, dans cette formation, de voir les plans N20 et N120 se déformer en petit en développant un aspect bréchique.

FRACTURATION DANS LE CALCAIRE DANIEN (=ROGNACIEN) fig. 91-92

La dalle du Danien calcaire a une épaisseur de 15 - 25 m avec un pendage N100 - 10N dans le soubassement du plateau du Cengle où elle forme la cuesta topographique la plus basse en bordure immédiate de l'Arc.

Les mesures sont continues entre X : 858 - Y : 137,4 et X : 861 - Y : 136,5.

. N25 est le plan le mieux réglé, d'extension décamétrique et le plus dense avec un espacement de 30 - 50 cm.

La karstification s'installe uniquement dans ce plan.

. N125 est moins réglé avec un espacement de 2 - 3 m.

Ces deux plans, qui sont les plus constants, permettent un démantèlement spectaculaire de la falaise.

. N185 est un plan apparaissant localement mais avec une grande extension - supérieure à celle de N25 - fracturant toute l'épaisseur de la dalle.

N185 semble en relation avec N25 : lorsque N185 apparaît, N25 diminue relativement de densité passant à un espacement de 3 - 5 m au lieu de 30 - 50 cm. Il peut porter des stries calciteuses (diagramme) traduisant la tendance à un déplacement relatif de l'Est vers le Nord.

FRACTURATION DANS LE POUDINGUE DANIEN TERMINAL (POUDINGUE DE LA GALANTE)

Cette formation, épaisse de 1 à 5 m, termine le Crétacé et forme le soubassement du plateau du Cengle. Ce poudingue est surtout constitué de galets de roches cristallines dans un ciment gréseux.

- A L'EST (X : 867,2 - Y : 141,5) fig. 93-94 et photo 10

La dalle a 3 m d'épaisseur et son pendage est de 10 gr vers le Sud Ouest.

La fracturation développe deux plans :

. N190 est le mieux réglé, le plus étendu, d'espacement métrique ; il traverse les galets ;

. N90 moins réglé, d'espacement sensiblement métrique mais plus variable que pour N190 ; ce plan ne traverse pas les galets, il les contourne.

Ces deux plans découpent la dalle en prismes qui s'écroulent en suivant l'ablation des argilites rouges sous-jacentes.

Perpendiculaires entre eux, ces deux plans sont aussi perpendiculaires à la stratification dont ils suivent exactement le basculement de 10 gr vers le Sud Ouest.

- Au SUD OUEST (X : 861 - Y : 137,8) fig. 95 - 96.

La dalle a 3 m d'épaisseur avec un pendage de 10 gr vers le Nord Est.

- . N 15 traverse les galets ;
- . N 115 contourne les galets.

Ces deux plans sont perpendiculaires entre eux et à la stratification.

- . N 175 apparaît ici.

- Au SUD EST (X : 866,8 - Y : 139) fig. 97 - 98

La dalle a 5 m d'épaisseur (son maximum) avec un pendage pratiquement horizontal.

La fracturation à l'échelle de la dalle montre deux plans sensiblement perpendiculaires.

- . N 150 traverse les galets ; réglé, il s'étend à toute l'épaisseur de la dalle ;
- . N 50 contourne les galets.
- . Au niveau des galets, et apparemment limité à leur étendue, le plan qui les traverse est N 175 (soit de même orientation que le troisième plan apparu plus à l'Ouest et disparu plus à l'Est).

FRACTURATION DANS LE MONTIEN (fig. 99 - 100)

Le Montien calcaire (calcaire de Vitrolles) est d'épaisseur variable en raison d'une sédimentation nettement lenticulaire ; au Sud Ouest du plateau du Cengle, l'Arc franchit la dalle à son maximum d'épaisseur, soit une cinquantaine de mètres *. L'épaisseur diminue très rapidement vers l'Est où le calcaire disparaît complètement en deux ou trois kilomètres ; de même vers le Sud Ouest où, un kilomètre plus loin, la barre n'a plus que quelques mètres d'épaisseur. Les mesures ont été réalisées sur environ 5 km de la cuesta.

Les plans perpendiculaires à la stratification

Deux plans, sensiblement perpendiculaires entre eux, sont très constants :

- le plan N 25 est bien réglé et d'extension décamétrique avec un espacement de quelques mètres relativement constant. Il porte des traces d'altération karstique qui s'y installe préférentiellement.
- le plan N 100 est peu réglé et d'extension plus réduite ; par contre son espacement qui n'est pas régulier, peut atteindre localement 5 à 50 cm.

* Il est morphologiquement remarquable, d'une part que l'Arc franchisse la barre à son maximum d'épaisseur, et d'autre part que ce soit avec une forte réorientation de son cours qui prend localement une direction N 160 ; ceci est à rapprocher de l'intensification générale de la fracturation et de l'apparition du plan N 160, très étendu, avec le maximum d'épaisseur de la barre calcaire.

- le plan N160 n'apparaît que localement, vers le maximum d'épaisseur de la dalle, mais avec une grande extension puisqu'il tranche toute l'épaisseur de la falaise.

Le couple des plans obliques à la stratification

Ces deux familles de plans ont une direction N125 et portent des stries dont le sens a été repéré sur la figure 99. Leur extension est fréquemment décimétrique. Ces deux plans font entre eux un angle aigu de 70 gr en moyenne qui admet le plan de stratification pour bissectrice.

On remarquera que l'ensemble de cette fracturation est légèrement basculé vers le Nord, identiquement à la stratification. Par ailleurs, l'ensemble de la fracturation est d'autant mieux réglé et plus développé que la formation est plus épaisse.

FRACTURATION DANS LE THANETIEN

Bord est, sud, sud ouest du plateau du Cengle (fig. 101 - 102)

La dalle du Thanétien supérieur (calcaire de Saint-Marc), dont l'épaisseur est maximale au Sud avec 40 m, forme une cuesta ceinturant l'Est, le Sud, l'Ouest de ce plateau très marquant dans la morphologie.

Cette formation est emballée dans des argilites rouges épaisses de 100 m au-dessous, de 40 m au-dessus.

Le pendage de la dalle varie de 5 à 7 gr dans l'étendue mesurée.

- Les plans verticaux (photo 11)

La fracturation la plus constante est formée par deux plans verticaux, d'orientation N10 et N110, donc orthogonaux.

- . N10 est le plus régulier tant en espacement qu'en détail de surface ; l'espacement diminue lorsque la dalle s'épaissit, allant de 2-3 m pour une épaisseur de 40 m, à 8-10 m pour 10 m d'épaisseur. La karstification est nettement liée à N10.
- . N110 est sensiblement moins dense et d'espacement plus variable avec toutefois la même évolution que N10 en fonction de l'épaisseur. N110 est systématiquement moins bien réglé que N10.

Ces deux plans ont une extension observée supérieure à l'épaisseur de la dalle, c'est-à-dire au moins décimétrique ; les prismes ainsi découpés s'écroulent en suivant l'ablation des argilites sous-jacentes, maintenant la belle verticalité de la falaise (photo 11).

- Les plans inclinés (photo 12)

Des portions de ces plans sont dispersées dans toute l'étendue de la dalle mais se développent nettement en X : 865 - Y : 139, apparemment avec un changement de compétence du calcaire qui devient localement plus crayeux.

Ces deux plans se développent simultanément avec une orientation peu dispersée N110 et une inclinaison vers le Nord ou vers le Sud de 30 à 40 gr. A ces plans inclinés est systématiquement associée une cristallisation calciteuse striée.

Bord nord est du Cengle (X : 866,3 - Y : 141,5) fig. 103 - 104

La dalle du Thanétien supérieur présente une réduction d'épaisseur vers le Nord de ce qui devait être son bassin de sédimentation, passant de 40 m au Sud à 10 m ici.

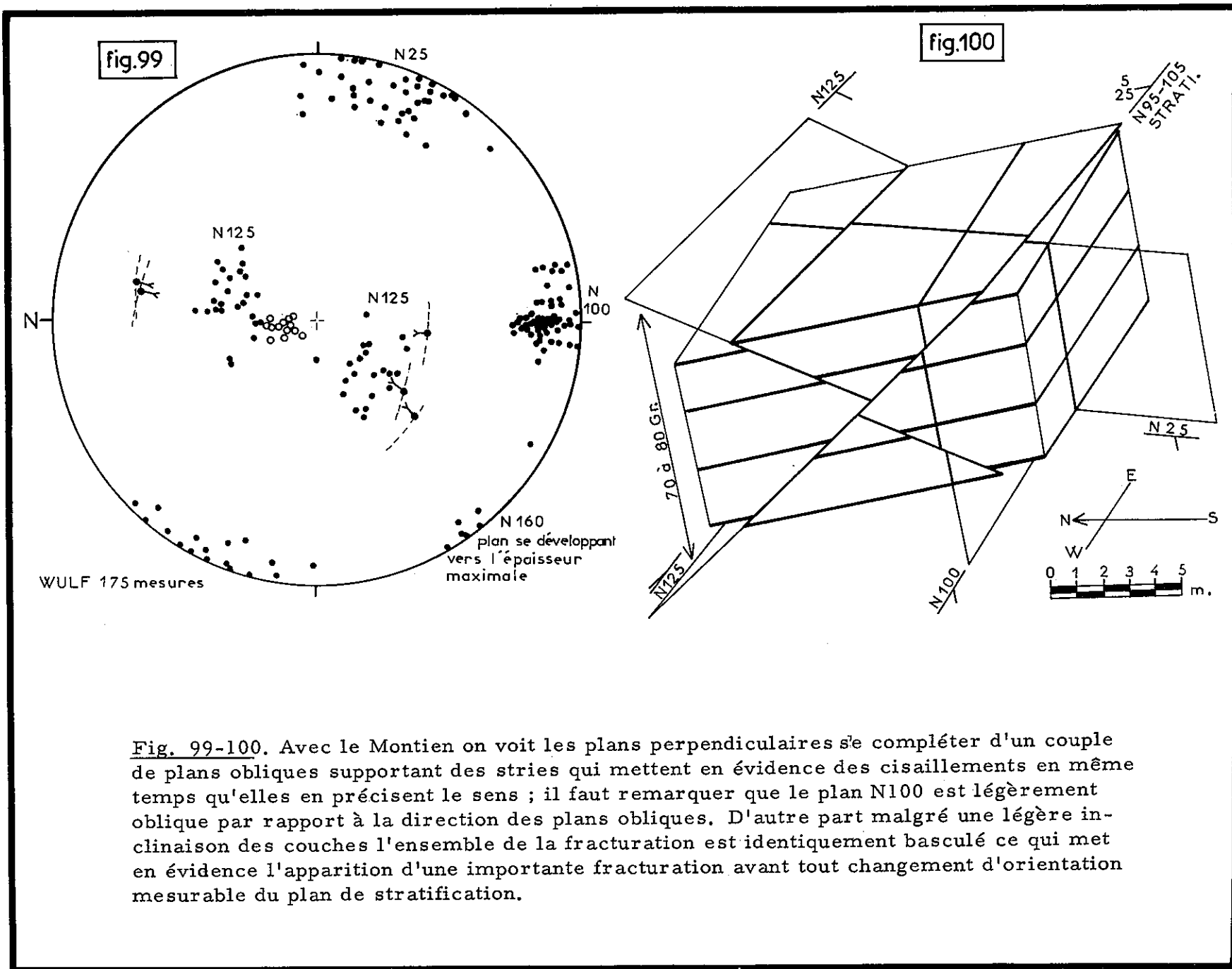


Fig. 99-100. Avec le Montien on voit les plans perpendiculaires s'e compléter d'un couple de plans obliques supportant des stries qui mettent en évidence des cisaillements en même temps qu'elles en précisent le sens ; il faut remarquer que le plan N100 est légèrement oblique par rapport à la direction des plans obliques. D'autre part malgré une légère inclinaison des couches l'ensemble de la fracturation est identiquement basculé ce qui met en évidence l'apparition d'une importante fracturation avant tout changement d'orientation mesurable du plan de stratification.

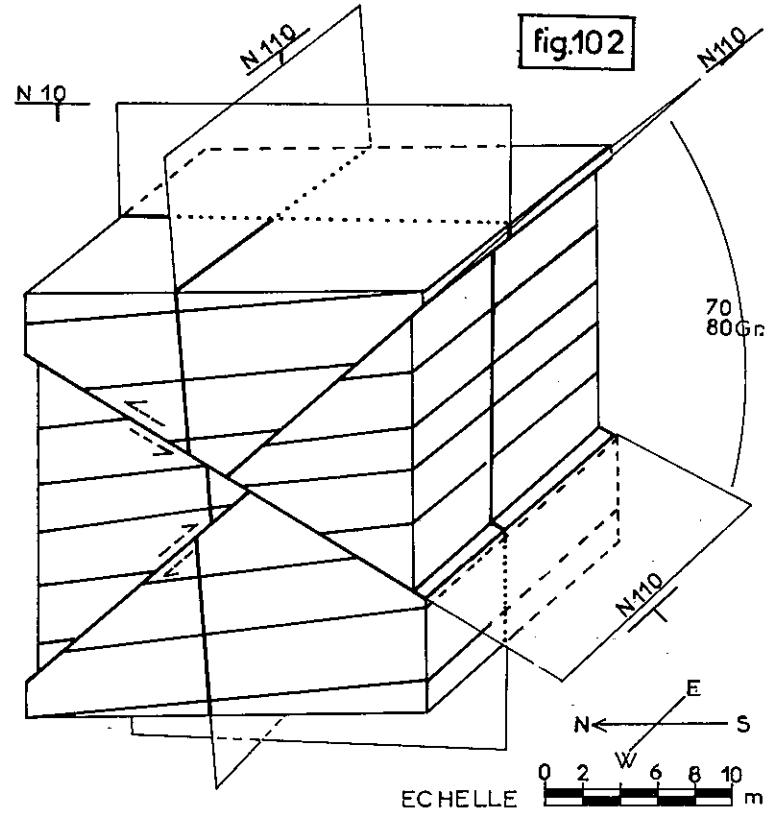
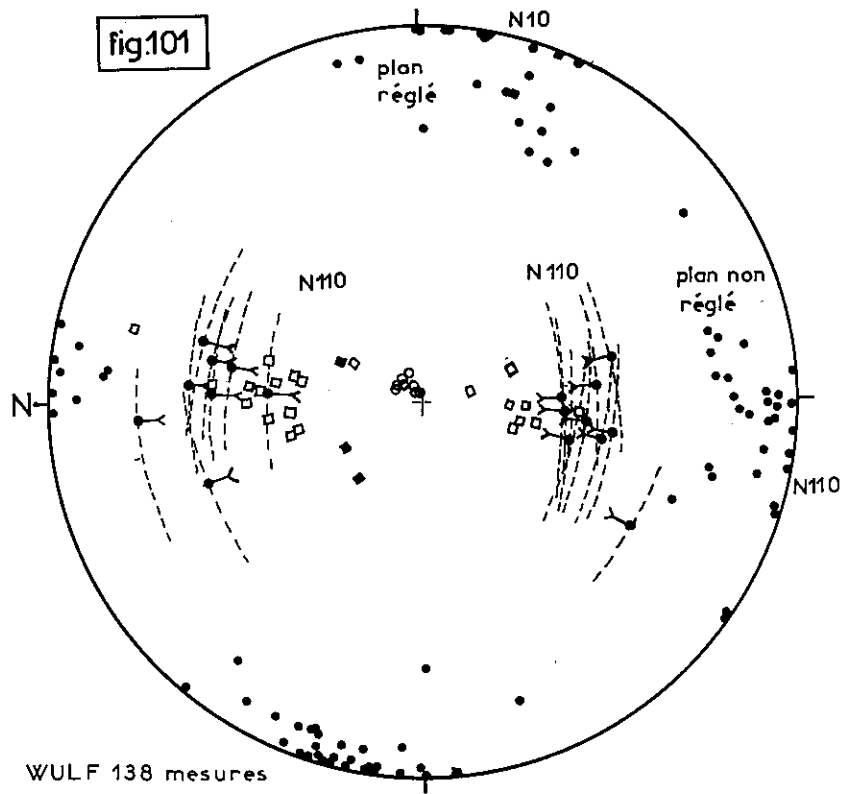


Fig. 101-102 : Le Thanétien montre une très belle fracturation où la direction des plans verticaux coïncide exactement avec la direction des plans obliques ; malgré les stries portées par le couple de plans obliques l'intensité du cisaillement reste très faible ; ce couple de plans oblique permet de situer la contrainte majeure qui provoque cette fracturation : elle est bissectrice de l'angle aigu compris entre ces deux plans ; la grandeur de cet angle (70-80 gr) permet de calculer l'angle de frottement interne du matériau lors de sa fracturation pour lequel on trouve 20 à 30 gr.

Au niveau des mesures, les déformations de la bordure nord du bassin positionnent la dalle autour de N110 - 55 S.

- Les plans perpendiculaires à la dalle

- . N10 se retrouve d'extension décimétrique au moins, c'est le plan le plus étendu, le mieux réglé, avec une dispersion assez forte apparemment liée à la réduction d'épaisseur de la dalle.
- . N80, d'extension métrique, a un espacement très variable, jusqu'à centimétrique dans les niveaux plus marneux où il donne un débit schisteux.

Ces deux plans, perpendiculaires à la dalle, ne sont plus rigoureusement perpendiculaires entre eux.

- Le plan oblique

- . N110 - 90 S fait un angle de 35 - 40 gr avec la dalle ; ce plan présente des stries de recristallisations calciteuses obliques relativement à la grande pente du plan, traduisant une tendance à un déplacement vers le Nord Ouest sur ce plan.

- Les plans de stratification

Les plans de stratification présentent également une striation calciteuse indiquant un déplacement vers le Nord sur ces plans.

Bord nord du Cengle (X : 865,5 - Y : 141,6) fig. 105 - 106

La dalle du Thanétien, réduite à 5 m d'épaisseur, se redresse et se renverse, se positionnant N85 - 50 N au niveau des mesures. Les argilites stratigraphiquement sous-jacentes surmontent les calcaires avec un pendage N100 - 95 N au lieu des mesures.

- Dans les calcaires ne s'observent que deux plans perpendiculaires à la dalle.

- . N zéro est le plus étendu et le mieux réglé ; son espacement est de 2 - 3 m.
- . N115 est moins étendu et moins réglé mais son espacement, variable, est fréquemment décimétrique.

Le plan de stratification porte de rares stries mais surtout des formes stylolitiques de dissolution.

- Dans les argilites

- . Un plan N115 - 30 S - donc relativement horizontal - d'espacement centimétrique ou moins, donne un net débit schisteux sensiblement perpendiculaire à la stratification. Cette schistosité fruste est nettement déformée en chevrons et formes contournées allant jusqu'à prendre localement une direction parallèle à la stratification sous l'action de l'écrasement (fig. 107 - photo 13).

FRACTURATION DANS LE THANETIEN, AU GRAND CABRI ET A LA CLUSE DE SAINT-MARC

Le grand Cabri montre la disparition du couple de plans obliques N110 ; la fracturation s'y réduit à deux familles de plans perpendiculaires à la stratification (qui est horizontale) ayant les directions N30 et N110 (fig. 108).

L'Arc franchit la barre thanétienne en réorientant son cours qui devient méridien. La fracturation environnante montre (fig. 109) :

- deux plans perpendiculaires entre eux avec des directions N25 et N120. N25 est réglé et de grande extension ; il guide préférentiellement la karstification et joue un rôle déterminant dans l'orientation de la cluse ;
- une réduction du couple des plans obliques à un seul de ces éléments, de direction N110 et faisant un angle de 35 gr avec la stratification.

On remarquera aussi le pendage vers l'Ouest du plan de stratification et le début d'enroulement de la fracturation qui en résulte (nettement visible pour le plan N25).

FRACTURATION DANS LE SLUMP DE VALABRE (fig. 85 - 86)

Deux familles de plans se développent dans ce slump ; alors que partout ailleurs les déformations du plan de stratification enroulent la fracturation, ici par contre, la fracturation n'est pas enroulée ; les deux plans perpendiculaires ne subissent pas la déformation due au slump (et de ce fait lui apparaissent postérieurs). Mais la direction de ces deux familles - N60 et N160 - présente une anomalie puisque, partout ailleurs dans le Thanétien, on les rencontre avec les directions N10-30 et N110-130.

EXEMPLE D'UNE FRACTURATION COMPLEXE (est de Bouc-Bel-Air, X : 849,5 - Y : 132,6)

Cette zone a subi un écaillage vers le Nord résultant du chevauchement de l'Etoile ; les pendages sont pentés de 50-55 gr vers le Sud.

Malgré une assez grande confusion de la fracturation, on a pu mettre en évidence des directions générales, d'extension décamétrique, systématiquement soulignées par le décalage du plan de stratification ; ce sont N170E, N170SW, N75SE. Mais ces grandes surfaces brisées sont composites ; elles se décomposent en tronçons de plans élémentaires dont les directions sont reportées sur la figure 11. Le jeu de cet ensemble désorganise fortement les strates par un mouvement qui correspond à un étirement des couches selon deux directions (fig. 110-111).

FRACTURATION DANS LE SPARNACIEN-YPRESIEN (fig. 112-113)

Cette formation calcaire, appelée calcaire de Langesse, montre une fracturation moins affirmée que dans le Thanétien sous-jacent ; il y apparaît quatre familles de plans perpendiculaires à la stratification :

- deux plans orientés N10 et N125 sont les plus étendus ; toutefois N10 est nettement le mieux réglé et le plus étendu ;
- deux familles de direction N55 et N165 se développent localement.

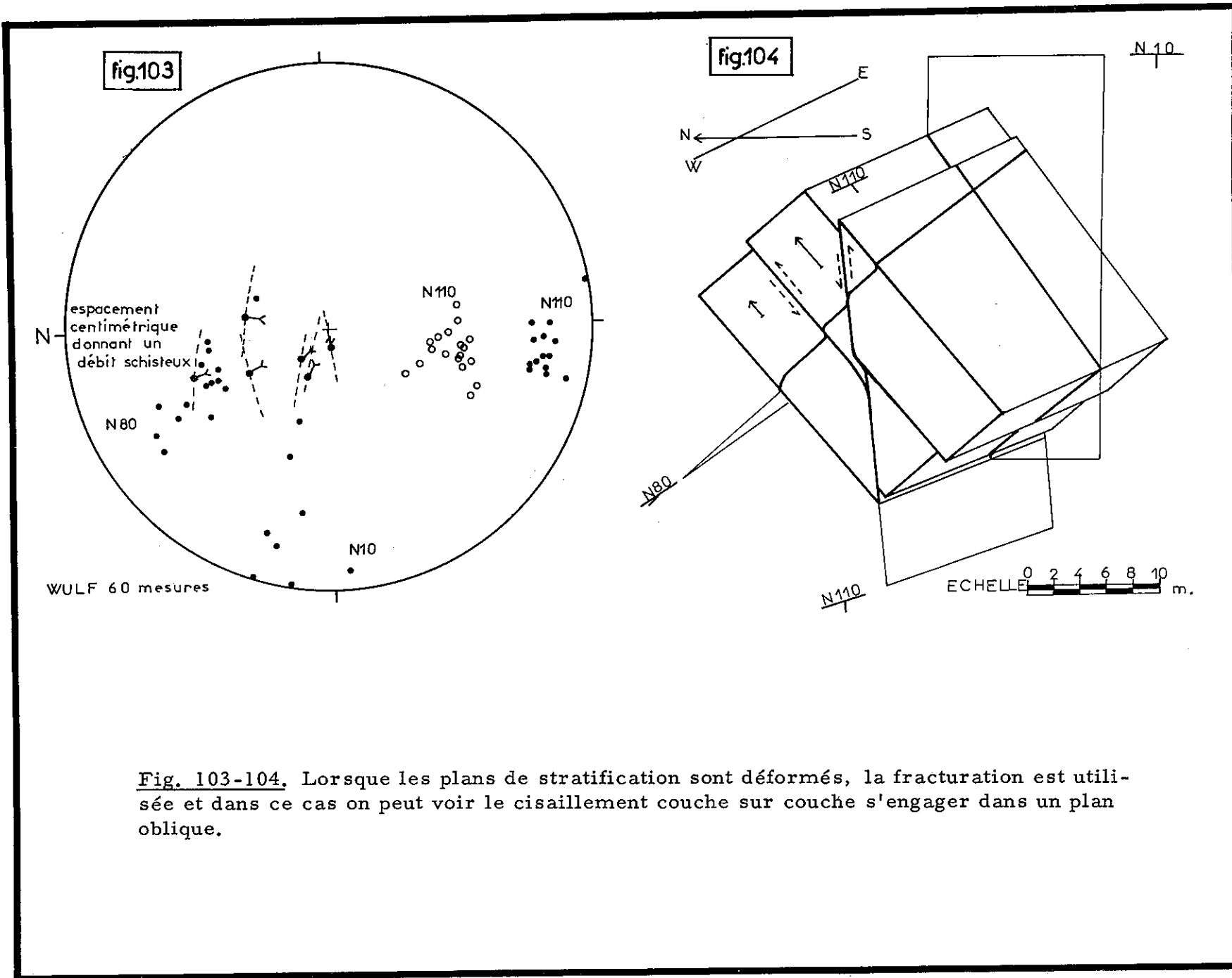


Fig. 103-104. Lorsque les plans de stratification sont déformés, la fracturation est utilisée et dans ce cas on peut voir le cisaillement couche sur couche s'engager dans un plan oblique.

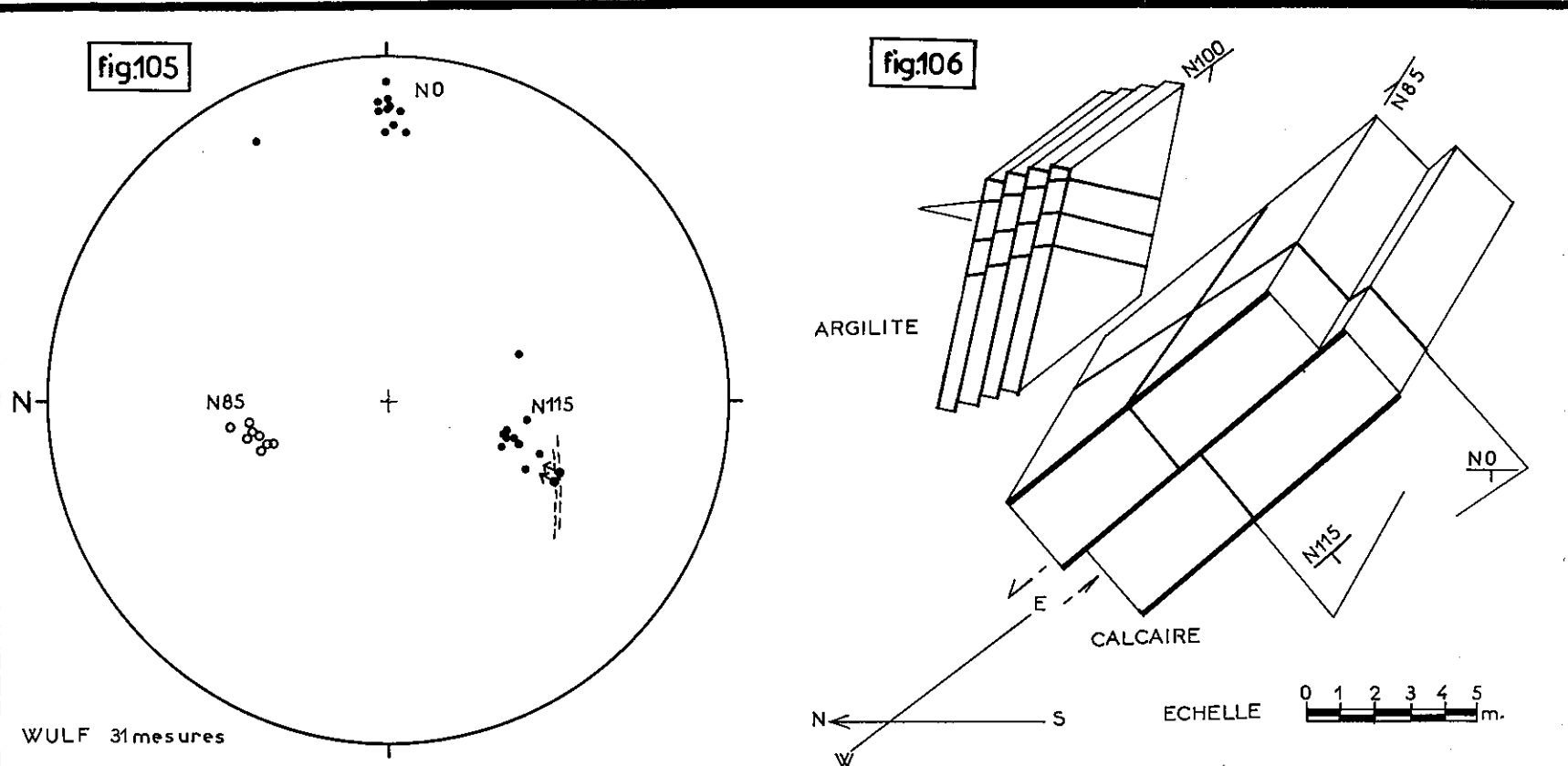
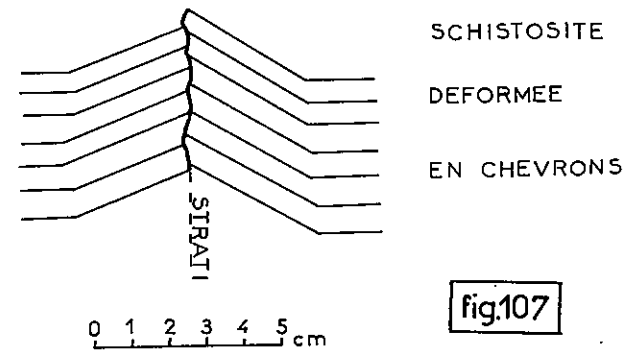


Fig. 105 -106-107- Dans ce cas où la série a été renversée aucune fracturation nouvelle n'est apparue ; le cisaillement couche sur couche s'est entièrement accumulé dans le plan de stratification pour les calcaires alors qu'il s'est développé dans l'épaisseur des strates d'argilites, où il réoriente légèrement le plan de fracturation ; on a vu que ce plan de fracturation est apparu très précocement, avant toute déformation du plan de stratification ; lorsque ce plan entraîné par le basculement des couches s'est trouvé approximativement horizontal il a été déformé en chevrons par le serrage latéral ; comme ce plan a, dans les argilites, un espacement centimétrique on se trouve en présence d'une schistosité dont on a démontré l'APPARITION TRES PRECOCE et la DEFORMATION ULTERIEURE.



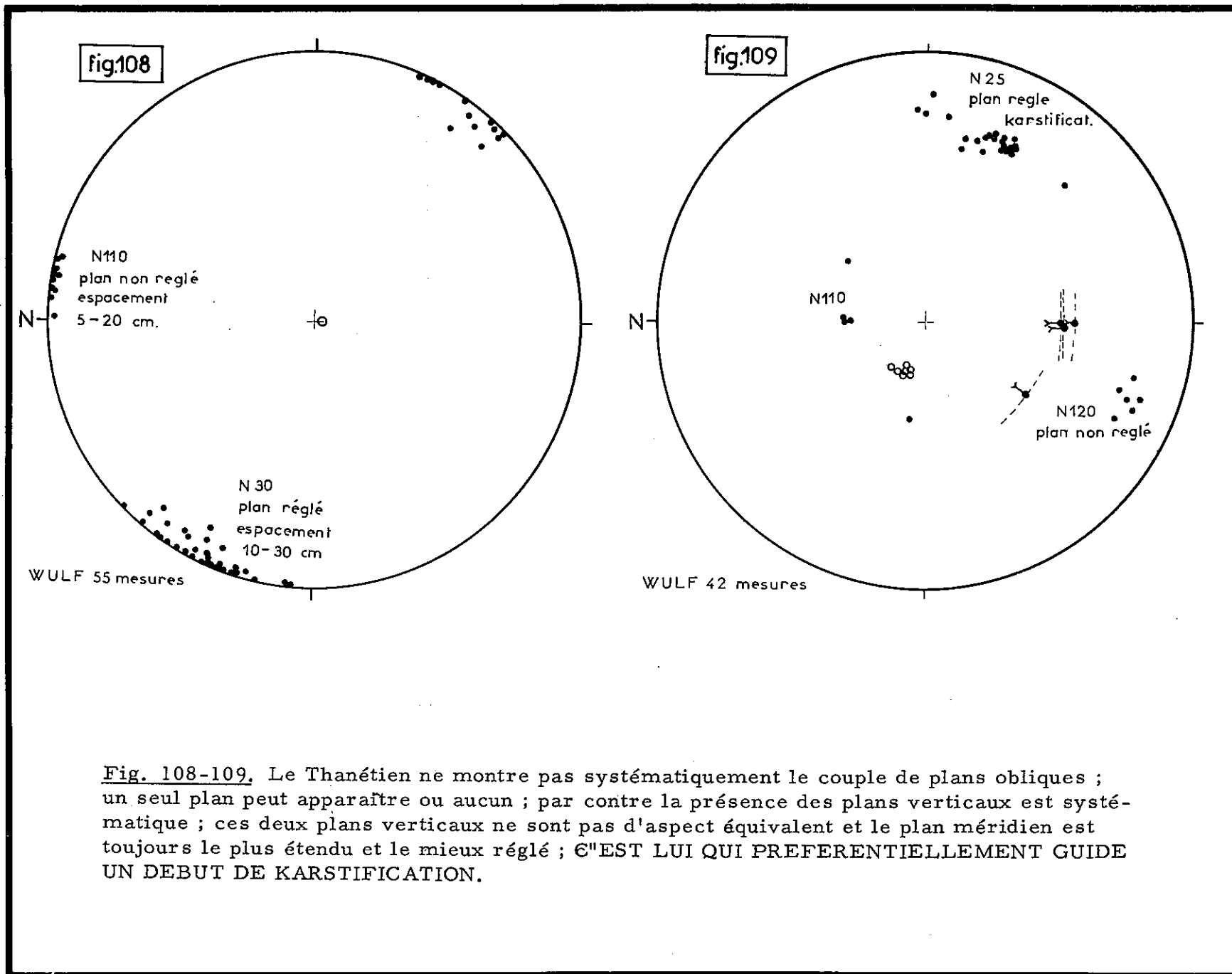


Fig. 108-109. Le Thanétien ne montre pas systématiquement le couple de plans obliques ; un seul plan peut apparaître ou aucun ; par contre la présence des plans verticaux est systématique ; ces deux plans verticaux ne sont pas d'aspect équivalent et le plan méridien est toujours le plus étendu et le mieux réglé ; C'EST LUI QUI PREFERENTIELLEMENT GUIDE UN DEBUT DE KARSTIFICATION.

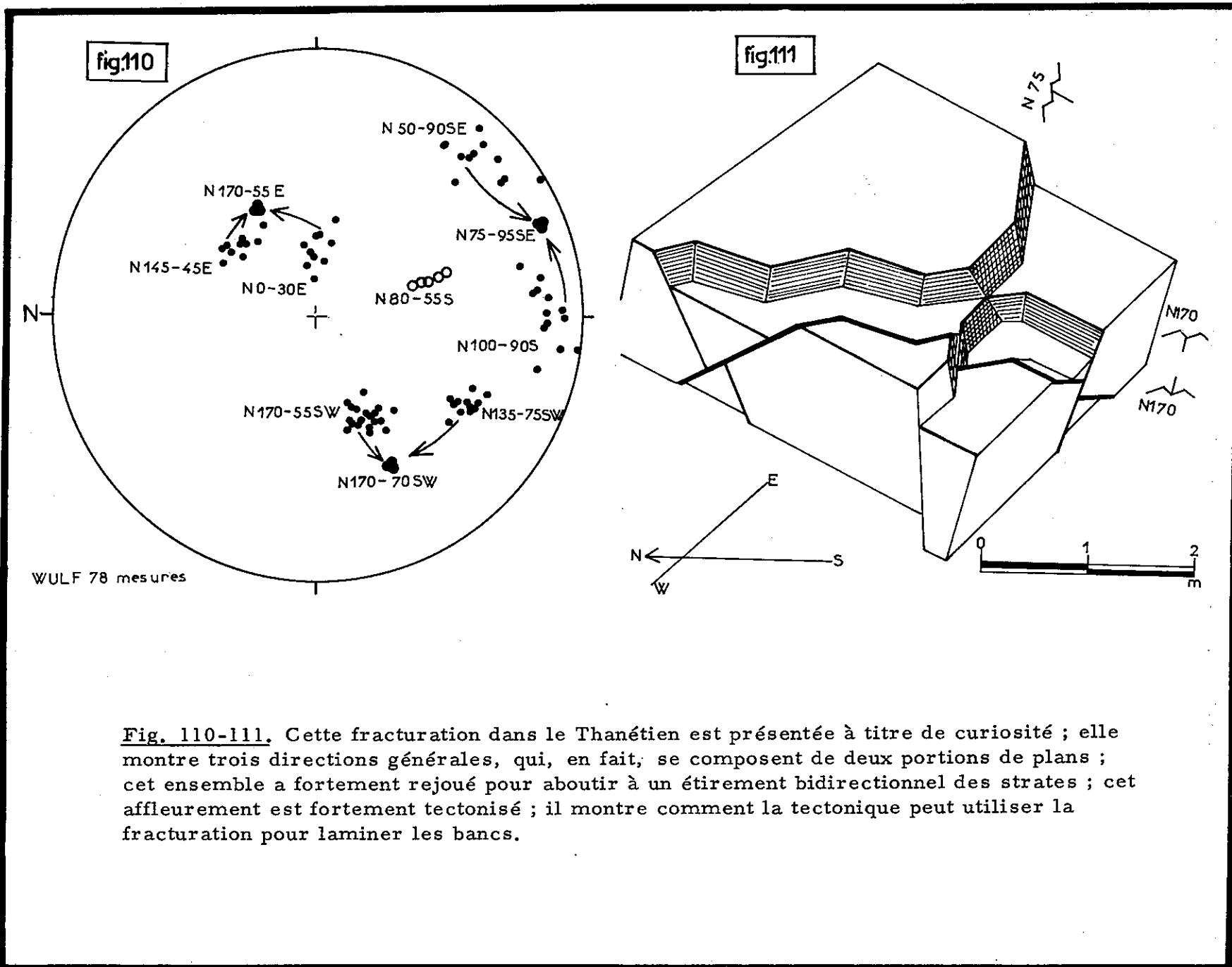


Fig. 110-111. Cette fracturation dans le Thanétien est présentée à titre de curiosité ; elle montre trois directions générales, qui, en fait, se composent de deux portions de plans ; cet ensemble a fortement rejoué pour aboutir à un étirement bidirectionnel des strates ; cet affleurement est fortement tectonisé ; il montre comment la tectonique peut utiliser la fracturation pour laminer les bancs.

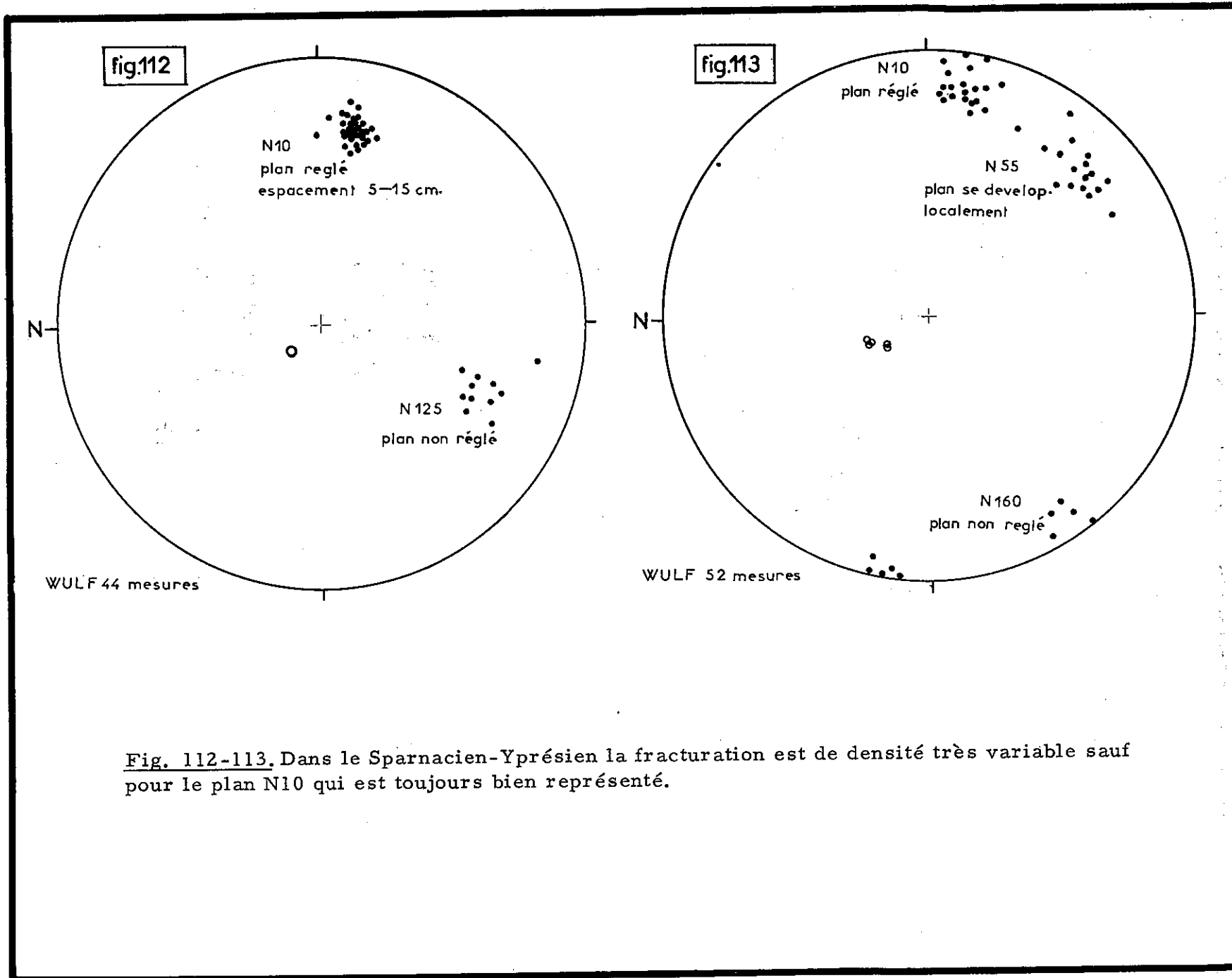


Fig. 112-113. Dans le Sparnacien-Yprésien la fracturation est de densité très variable sauf pour le plan N10 qui est toujours bien représenté.



Photo 9 : Les deux plans de la fracturation principale sont perpendiculaires entre eux et perpendiculaires au plan de stratification ; Un de ces plans est nettement mieux réglé que l'autre.

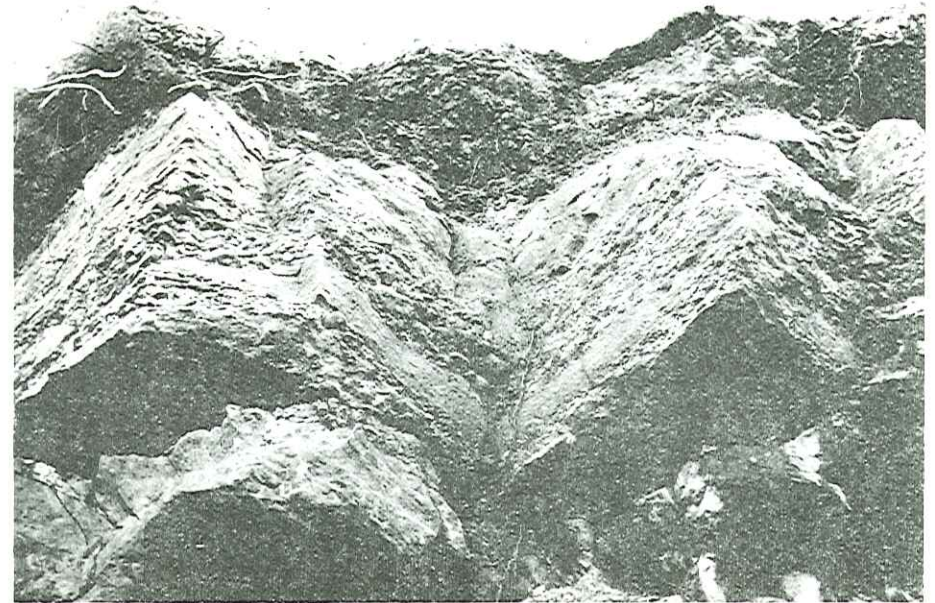


Photo 10 : Dans le poudingue du Danien les galets de cristallin sont tronçonnés par un seul des deux plans perpendiculaires.

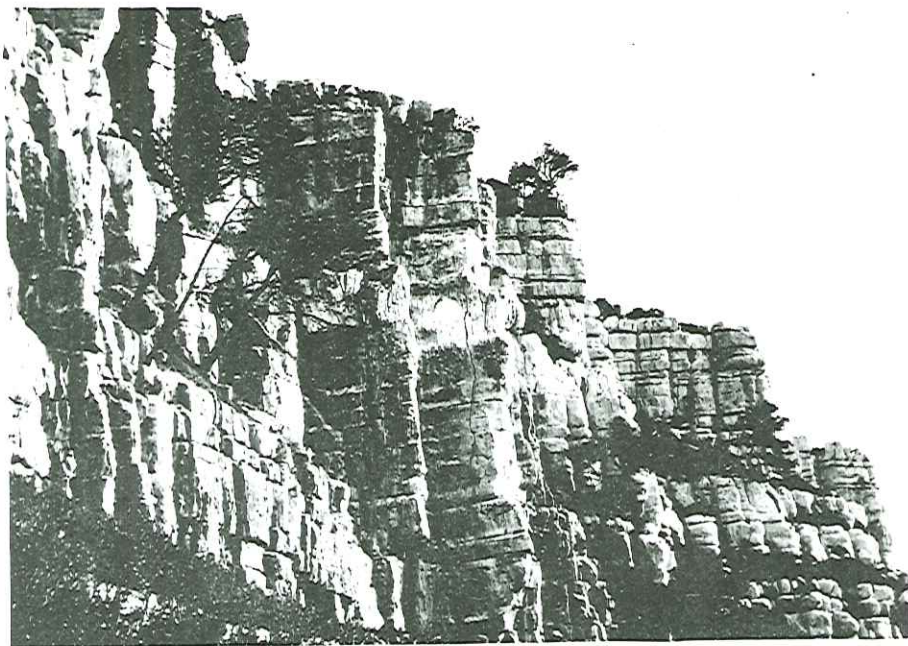


Photo 11 : La Corniche du plateau du Cengle (Thanétien) montre un bel exemple de fracturation constituée de deux plans perpendiculaires entre eux et perpendiculaires au plan de stratification.

Photo 12 : montre le développement du couple de plans obliques dans le Thanétien du plateau du Cengle.

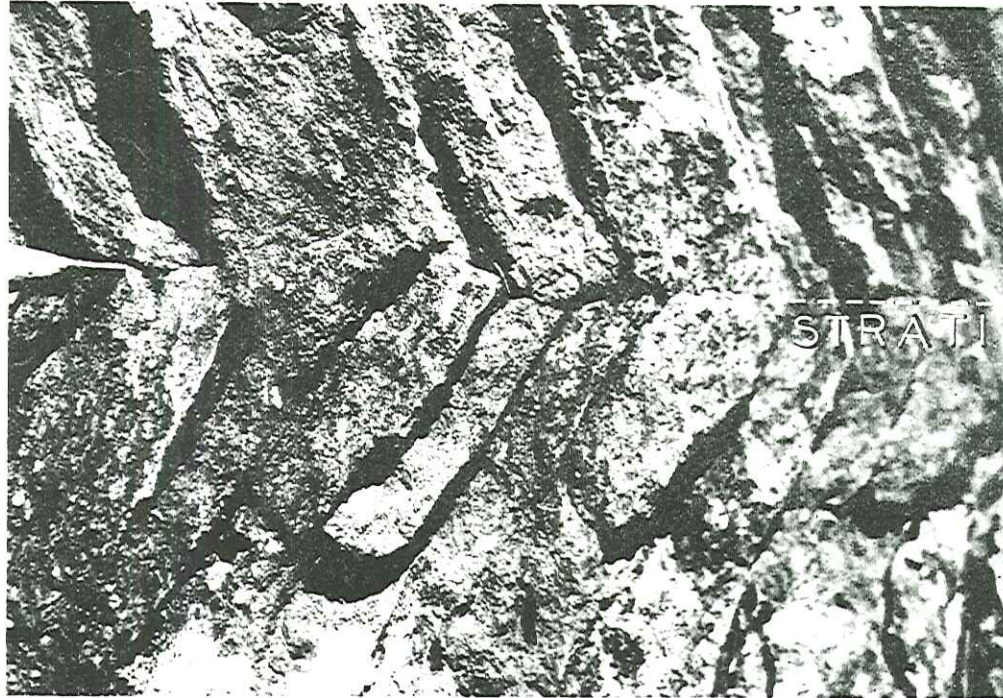


Photo 13 : Schistosité correspondant à un plan de fracturation apparu précocement et qui a été déformée en chevrons après avoir été basculée avec le plan de stratification.

CHAPITRE VII

SYNTHESE DES DEFORMATIONS

L'étude statistique d'une population de pendages avait (chapitre III) permis de faire des hypothèses sur les déformations du plan de stratification :

- étalement du maximum des courbes pouvant résulter d'une orientation différente (20-30 gr) du plissement durancien et du plissement provençal ;
- renforcement des directions N60 et N160 et fréquence anormalement élevée des directions méridiennes laissant supposer des déformations obliques sur les directions générales est-ouest.

L'analyse des structures a permis d'éclairer ces hypothèses et de les compléter.

La terminaison est de la Sainte-Victoire a typiquement montré un pli de longueur kilométrique passant à des plis hectométriques et décamétriques ; ces terminaisons périclinales coniques s'accordent avec celles construites sur la maquette (photo 1) à partir de deux plissements se superposant avec un angle de 25 à 30 gr.

Quant au renforcement des directions N60 et N160, il semble devoir être rapproché de la fréquence anormalement forte des directions méridiennes.

Tout d'abord, ces déformations obliques ou transverses ne sont pas réparties uniformément ; quoique très largement représentées avec une intensité atténuée, elles s'accumulent selon des alignements privilégiés ; deux de ces alignements ont été rencontrés sur le terrain étudié. L'un de ces faisceaux passe par Bimont, Grand-Cabri, Bouc-Bel-Air, Septèmes ; il affecte le remplissage éocène du bassin ainsi que les bordures de Jurassique et Crétacé, y compris l'aire chevauchante de l'Etoile. Il est même remarquable que ce soit à son niveau que la Nerthe accentue son chevauchement et qu'ainsi s'individualise l'Etoile. Les arguments manquent pour définir avec précision une chronologie des phénomènes et en particulier pour situer l'activité des mouvements transverses relativement aux mouvements est-ouest. Toutefois on a noté que ce faisceau jouait un rôle dans l'individualisation du bassin de brèches éocènes du Tholonet et qu'il semblait commander un slump dans le Thanétien à Valabre ; son individualisation apparaît donc dès cette époque. Peut-être est-il la répercussion d'un accident profond sur lequel la couverture s'adapterait (hypothèse de la figure 42).

L'autre alignement de déformations transverses correspond à l'arc triasique de l'Huveaune. Là encore son prolongement, vers le Nord cette fois, passe à une zone complexe à la faveur de laquelle l'anticlinal du Regagnas évolue en chevauchement pour former l'Olympe-Aurélien. Dans la bordure nord ouest de l'arc triasique, on a pu montrer la superposition de déformations exactement méridiennes sur des déformations est-ouest ; or cette superposition trouve une interprétation dans le non parallélisme des directions des chevauchements qui, à l'Est et à l'Ouest, bordent cet arc (chapitre V). Les mesures des axes de plis frontaux ont fourni des arguments qui ont précisé ce non parallélisme.

Cet arc triasique de l'Huveaune s'individualise dans une zone où la convergence des translations des panneaux de la couverture, ici constituée par les chevauchements de l'Aurélien et de l'Etoile, correspond à un angle de 30 à 40 gr au minimum. On a vu que cette valeur entraînait un serrage .

est-ouest d'environ 40 % de la translation nord-sud (chapitre V). L'ampleur de ce phénomène, à laquelle s'ajoute sa localisation, peut aisément rendre compte de l'accumulation du Trias et des nombreuses complications structurales qu'il présente ; un simple glissement uniforme de la couverture sur son substratum, outre qu'il n'impliquerait pas des structures transverses mais tout au plus des décrochements assez simples, n'entraînerait pas cette tourmenté dans le Trias mais seulement un laminage comme en présentent si fréquemment les chevauchements alpins.

L'affrontement latéral et oblique des panneaux de couverture pourrait expliquer l'écrasement important des affleurements voisins de l'arc triasique ainsi que des lambeaux qui le surmontent encore ; cet écrasement a dû jouer un grand rôle morphologique après la période d'activité orogénique de la fin de l'Eocène et faciliter le déblaiement local de la couverture ; on sait en effet que l'Oligocène est directement transgressif sur le Trias.

Cette combinaison des translations nord-sud avec une tectonique transverse pose le problème des mouvements profonds, c'est-à-dire de l'activité de l'étage structural inférieur à la couverture sédimentaire qui a commandé ces mouvements. Actuellement le peu de connaissances acquises dans ce domaine ne permet pas de fonder des hypothèses ; il est vraisemblable qu'une synthèse géologique régionale doit attendre ces informations "profondes" qui viendront de la géophysique et des sondages * ; dans tous les cas on semble devoir s'éloigner du modèle simpliste admettant un glissement tranquille de la couverture sous l'effet d'un basculement régional du socle.

Deux raisons conduisent à admettre la simultanéité des déformations transverses et des déformations est-ouest.

- 1 - La première est purement géométrique et se déduit du type d'argumentation développée dans ce travail ; les déformations transverses résultant de la convergence des panneaux de la couverture ne peuvent être individualisées dans le temps ; elles sont une conséquence des translations nord-sud et se développent simultanément. Tout au plus elles peuvent apparaître avec un certain retard par rapport aux plis et chevauchements est-ouest (chronologie du chapitre V).
- 2 - La deuxième raison est apportée par les connaissances paléogéographiques. On a remarqué qu'après l'épisode orogénique de la fin de l'Eocène, alors que les grandes structures est-ouest sont en place, la transgression oligocène s'installe curieusement dans des bassins méridiens ; cette remarque avait conduit à admettre une "phase" de cassures méridiennes entre l'épisode éocène et la transgression oligocène (phase anté-oligocène). Il faut bien avouer que cette "phase" se situerait bien près de la précédente et n'aurait laissé que peu de traces en-dehors de l'orientation des formations oligocènes. Dans l'arc triasique de l'Huveaune, où la transgression s'effectue sur le Trias, la "phase" anté-oligocène pourrait bien n'être représentée que par les déformations transverses associées à la phase éocène **.

Ces deux raisons sont tout à fait concordantes.

* Le sondage de Carpiagne a rencontré sous les massifs jurassiques le Permien à une cote très supérieure à celle attendue.

Le sondage d'Eguilles a rencontré des structures insoupçonnées sous le remplissage fluvio-lacustre.

Ces deux exemples, malgré leur ponctualité, ont apporté des informations structurales décisives.

** Le fait que l'Oligocène soit déformé et plissé ne change rien à cette interprétation ; au contraire les déformations méridiennes observées dans l'Oligocène (Sud Ouest de Roquevaire) montrent que les serrages transverses ont fonctionné soit pendant soit après l'Oligocène.

Les observations relatives au faisceau de tectonique transverse de l'arc triasique de l'Huveaune ne sont pas contredites mais précisées lorsqu'on passe au deuxième faisceau d'accidents méridiens qui se trouve plus à l'Ouest (Bimont - Bouc-Bel-Air). Les déformations transverses y sont beaucoup moins intenses et on a mis en évidence une activité embryonnaire au début de l'Eocène (individualisation du bassin des brèches du Tholonet) et au Thanétien (slump de Valabre). Durant l'épisode de la fin de l'Eocène ces mouvements sont restés limités ; ils correspondent à quelques développements de plis méridiens (Bouc-Bel-Air - Septèmes) et à une inflexion générale des pendages vers l'Ouest. Actuellement l'alignement nord-sud des affleurements oligocènes se situe à quelques kilomètres à l'Ouest et il n'est pas impossible que ces dépôts masquent un accident transverse important dont le faisceau de Bimont-Bouc-Bel-Air ne serait qu'une réplique atténuée. En pure hypothèse il n'est pas impossible qu'un véritable arc triasique, complètement recouvert par la transgression oligocène, interrompe axialement l'anticlinal de Sainte-Victoire à l'Ouest ; les sources minéralisées d'Aix-en-Provence pourraient être un indice de la proximité du Trias.

L'étude géométrique des déformations apporte des éléments qui peuvent sensiblement élargir l'éventail des connaissances géologiques sur une région donnée et particulièrement lorsque cette région présente une forte imbrication structurale comme c'est le cas en Provence. Les mesures géométriques, effectuées sur une gamme étendue d'échelles, sont complémentaires de l'étude stratigraphique et cartographique ; elles permettent de lever les ambiguïtés inhérentes au principe même de la cartographie. La carte géologique conduit à la réalisation d'un modèle à deux dimensions qui altère fortement la troisième dimension de la réalité tectonique (c'est-à-dire la verticale) ; de plus, son interprétation sous forme de coupes, qui constitue peut-être un excellent exercice pédagogique, entraîne la régression plus ou moins arbitraire de l'une des deux directions du modèle cartographique ; en effet, il y aurait fréquemment autant d'informations utiles à une bonne compréhension de la tectonique, dans le passage d'une coupe à l'autre que dans les coupes proprement dites.

De la même manière se pose le problème des cisaillements en général et des failles en particulier. Mis à part qu'un trait noir sur une carte géologique peut recouvrir une grande variété de phénomènes mécaniques très différents, on n'a jamais la direction réelle des cisaillements mais seulement leur composante horizontale ; par là s'introduit une ambiguïté aussi gênante que l'imprécision sur la forme réelle des plis. La figure 117 montre quelle peut être l'incertitude sur la position et sur le sens des cisaillements portés sur une carte géologique.

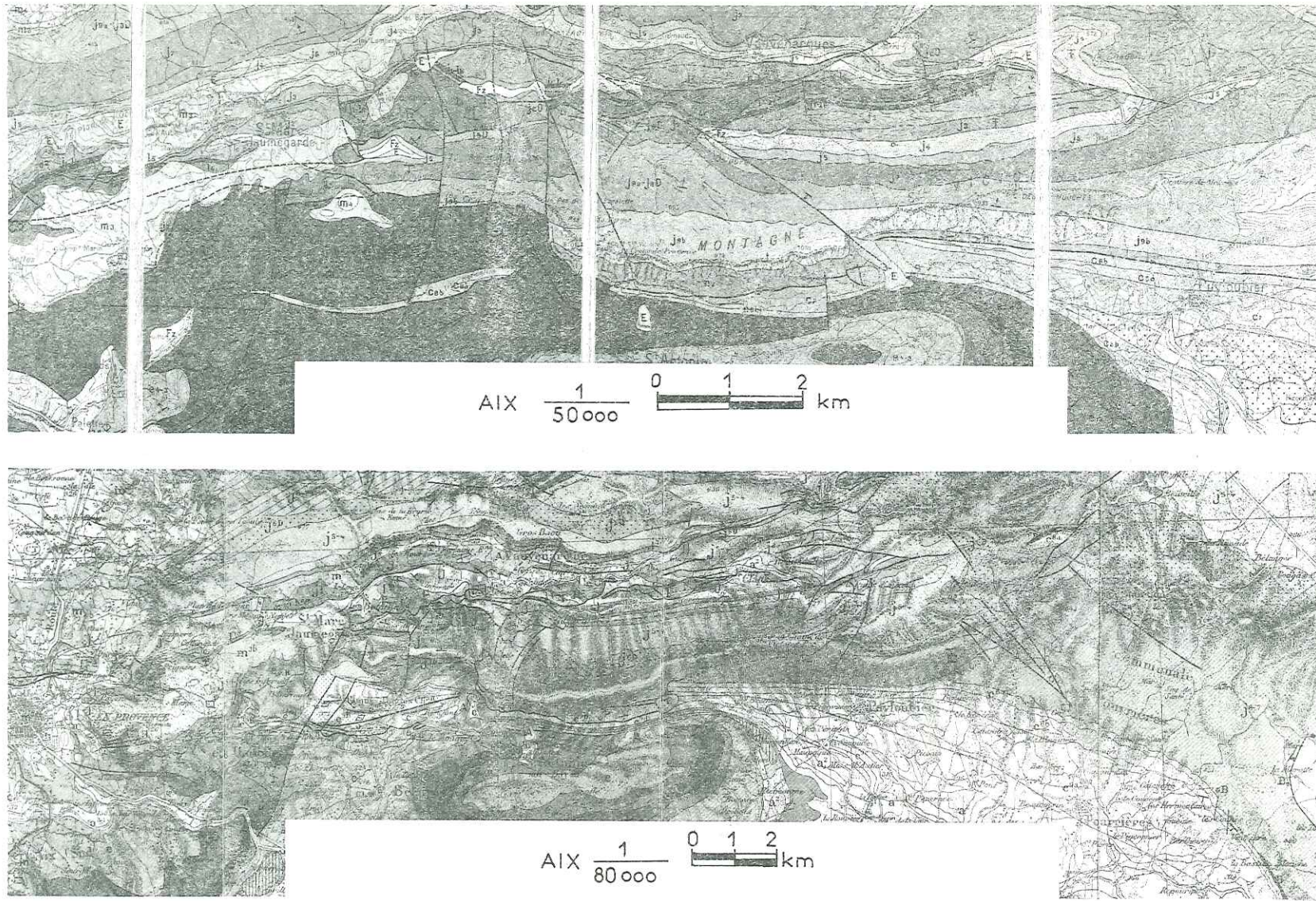


Fig 117

Fig. 117 : La direction et le sens des cisaillements (failles) sont des données intéressantes de la tectonique et ne peuvent être reportées sur une carte géologique où, au mieux, n'est figurée que la composante horizontale des cisaillements. Cet exemple, pris dans la Sainte-Victoire, montre l'imprécision cartographique de la position des failles (comparaison entre la carte géologique d'Aix au 1/50 000 et la carte au 1/80 000 - 3^e éd.).

CHAPITRE VIII

SYNTHESE DE LA FRACTURATION

LE REMPLISSAGE DU BASSIN

Le tableau de la figure 118 résume les orientations des familles de plans qui ont été précédemment analysées en fonction du niveau stratigraphique.

LES COUPLES DE PLANS OBLIQUES A LA STRATIFICATION

Ces plans n'ont été rencontrés que dans le Montien et surtout dans le Thanétien où leur direction est remarquablement stable malgré l'étendue des observations. Ces couples de plans supportent systématiquement des stries dont le sens repéré matérialise le sens du cisaillement ; malgré ces stries, le déplacement, repérable par le désajustement du plan de stratification, est généralement trop faible pour être observable, rarement centimétrique et exceptionnellement plus important. La position de ces plans, qui admettent systématiquement la stratification pour bissectrice de leur angle aigu, permet valablement de les assimiler à des cisaillements résultant de la mise en plasticité de la masse rocheuse sous l'action d'une compression simple. On peut remarquer que la déformation ne s'est pas très développée une fois la plasticité atteinte, puisque les déplacements sur ces plans sont restés négligeables. Un autre argument en faveur de l'apparition de ces plans sous l'effet d'une compression simple vient du fait que les glissements couche sur couche sont extrêmement rares, du moins tant que les strates ne sont pas courbées comme dans la partie nord du Cengle où cette fracturation se complique d'un enroulement postérieur à sa formation.

Si l'on admet le cas d'une compression simple, on peut aussi préciser la position respective des contraintes par rapport aux cisaillements qu'elles ont déterminés. La contrainte principale étant horizontale avec une direction N10, la contrainte intermédiaire se trouvant horizontale et N110 et la contrainte mineure verticale.

Quant à l'angle aigu que ces deux plans font entre eux et dont la grandeur varie de 70 à 80 gr, il permet de déterminer l'angle de frottement interne du matériau lors de sa déformation (fig. 114). La construction de Mohr donne les valeurs de suivantes :

$$\begin{aligned} \text{pour un angle aigu } 2\theta &= 70 \text{ gr, } \varphi = 30 \text{ gr} \\ \text{pour un angle aigu } 2\theta &= 80 \text{ gr, } \varphi = 20 \text{ gr} \end{aligned}$$

Cet angle φ ne permet pas de définir complètement la courbe intrinsèque du matériau, même si cette courbe est assimilée à une droite d'équation * :

* L'enveloppe des cercles de Mohr est une droite dans le cas idéal d'un milieu continu. Le matériau géologique peut être, en grand, assimilé à un milieu continu. Néanmoins les dislocations perturbent la linéarité de la droite intrinsèque qui s'aplatit pour les fortes valeurs absolues de l'état de contrainte (fig. 115).

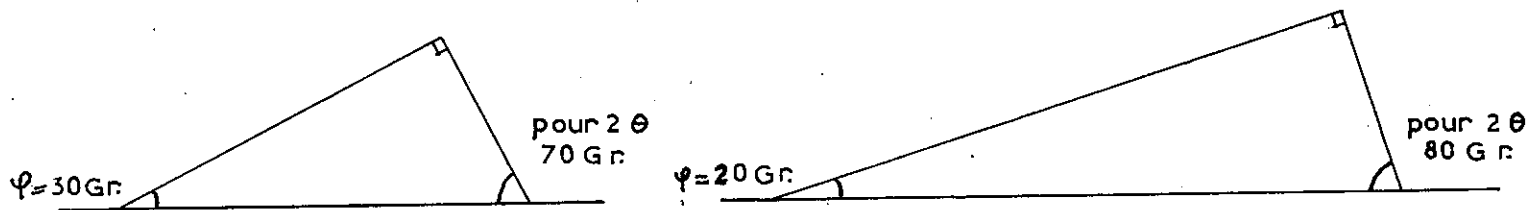


fig 114

construction de Mohr permettant de déterminer l'angle de frottement interne du matériau : ψ à partir de l'angle 2θ que font entre eux les plans de cisaillement dont on a pris les valeurs limites observées : 70 et 80 Gr

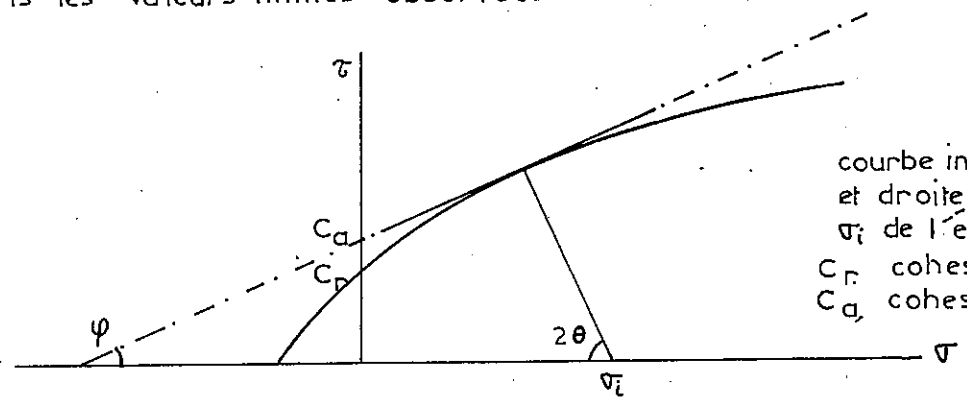
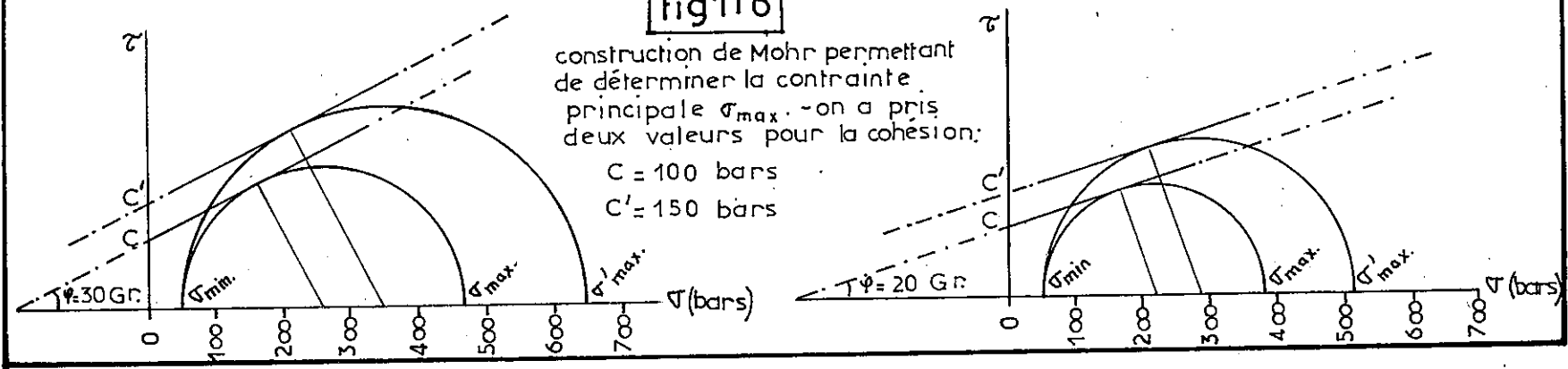


fig.115

courbe intrinsèque réelle vraisemblable et droite déterminée pour une valeur σ_i de l'état de contrainte.
 C_r cohésion réelle.
 C_a cohésion apparente.

fig116

construction de Mohr permettant de déterminer la contrainte principale σ_{max} . - on a pris deux valeurs pour la cohésion:
 $C = 100 \text{ bars}$
 $C' = 150 \text{ bars}$



$$\tau = c + \text{tg } \varphi$$

où τ = le cisaillement
 c = la cohésion
 φ = l'angle de frottement interne du matériau

La cohésion (c) reste indéterminée (fig115) ; on peut lever cette indétermination en prenant une valeur courante pour cette cohésion ; on a pris $c = 100$ bars et 150 bars. La droite intrinsèque étant définie, on peut estimer le domaine des grandeurs dans lequel se situe les contraintes ; il suffit pour cela de préciser la charge de sédiments déposés au-dessus de la couche au moment de sa fracturation, ce qui revient à connaître à quel moment se développe l'état de contrainte. Dans tous les cas, ce domaine d'apparition est compris entre le Thanétien (sédimentation de la couche fracturée) et le Priabonien où la sédimentation s'interrompt sous l'action des déformations importantes qui se développent à ce moment-là ; il est même très vraisemblable que la fracturation s'installe lors de ces déformations de la fin du Lutétien, c'est-à-dire vers la limite maximale du domaine envisagé. Auquel cas, la charge sédimentaire peut s'apprécier avec une bonne exactitude : dans cet empilement de couches restées pratiquement horizontales, le sommet du Lutétien se trouve 170 m au-dessus du Thanétien, ce qui correspond à une charge de 50 bars, compte tenu de la faible érosion sommitale. La construction de Mohr permet alors de déterminer la grandeur de la contrainte principale ; la figure 116 montre qu'elle se situe entre $450 - 650$ bars pour $\varphi = 30$ gr et $400 - 500$ bars pour $\varphi = 20$ gr.

Cet exemple assez exceptionnel permet donc de définir l'orientation et surtout un domaine de grandeur des contraintes qui ont provoqué cette fracturation.

LES PLANS PERPENDICULAIRES A LA STRATIFICATION

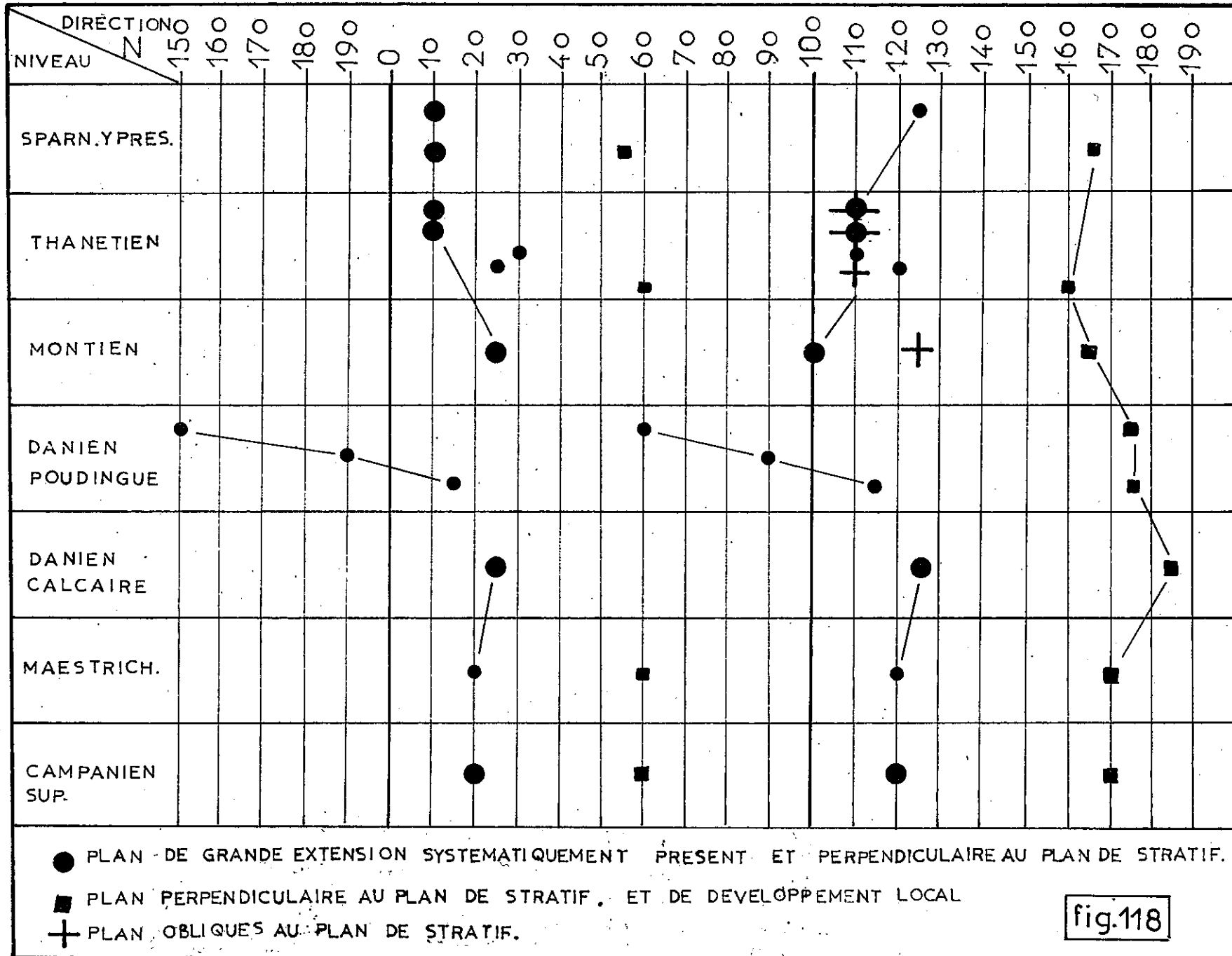
Ces plans constituent l'essentiel de la fracturation comme les descriptions l'ont montré.

Leur orientation

Le tableau de la figure 118 résume ces orientations en fonction de la stratigraphie. Dans un site donné, ces plans apparaissent couplés avec des directions perpendiculaires. Leur origine reste problématique par le fait qu'ils ne s'interprètent pas directement en fonction d'un modèle mécanique simple, comme cela était possible avec les plans obliques ; par conséquent, il est difficile de soutenir des hypothèses sur l'état de contrainte qui les engendre et sur les propriétés mécaniques du matériau où ils apparaissent. Ils ne portent que très exceptionnellement des stries et seulement dans les cas où ils sont repris par une déformation postérieure à leur formation.

Leur observation systématique permet les remarques suivantes :

- ces plans sont systématiquement enroulés par les déformations du plan de stratification : on peut y voir une origine précoce, c'est-à-dire antérieure à tout changement mesurable de l'orientation du plan de stratification ;
- le tableau de la figure 118 montre que dans le Thanétien ces plans verticaux se superposent aux plans obliques de telle façon que, en supposant leur origine liée au même état de contrainte, un des plans verticaux (le plus étendu et le mieux réglé) est parallèle à la contrainte principale (plan σ_{max} , σ_{min}) et l'autre perpendiculaire à cette contrainte principale (plan σ_{inter} , σ_{min}) ; le plan de stratification complétant le trièdre droit (plan σ_{max} , σ_{inter});
- l'ensemble du tableau montre un léger changement d'orientation de ces plans en fonction du niveau stratigraphique et en fonction



du lieu d'observation, ce qui est particulièrement net pour le poudingue du Danien terminal (poudingue de la Galante) ; mais ce résultat global ne permet pas de préciser ce qui revient à un changement d'orientation de l'état de contrainte et ce qui est dû à une variation des propriétés mécaniques du matériau ;

- presque tous les niveaux montrent qu'une fracturation à développement local se superpose de façon presque idéalement bissectrice à la fracturation principale. Cette double fracturation, constituée de quatre plans, est à rapprocher de l'évolution multidirectionnelle des déformations de la couverture (plis superposés selon deux directions) qui met en évidence la mobilité des orientations de l'état de contrainte.

Leurs caractéristiques secondaires

On a systématiquement rencontré des différences entre les deux plans qui sont perpendiculaires ; en particulier le plan N10-20 est toujours le plus étendu et le mieux réglé ; c'est très net dans le poudingue danien où les galets cristallins sont tronçonnés par un plan tandis que l'autre plan les contourne.

Cette non équivalence des plans se traduit principalement par une karstification préférentielle du plan le plus étendu et le mieux réglé.

LES BORDURES DU BASSIN

LES COUPLES DE PLANS OBLIQUES

Comme dans le remplissage du bassin, ils ne se rencontrent pas systématiquement. Dans le Concors ils admettent la stratification pour bissectrice de leur angle aigu mais leur direction est N145 - N150 ; ils résultent vraisemblablement d'un état de contrainte associé à la formation de l'isthme durancien. Par contre, dans la Sainte-Victoire et au Bimont, de tels plans n'admettent pas la stratification comme bissectrice de leur angle aigu et, de plus, leur direction est N110 (comme dans le bassin). Ils s'accompagnent de translations importantes et apparaissent liés aux déformations de la fin de l'Eocène se superposant à des déformations plus anciennes (peut-être Crétacé supérieur).

LES PLANS SENSIBLEMENT PERPENDICULAIRES A LA STRATIFICATION

Ces aires qui ont subi les déformations duranciennes, présentent une fracturation principale orientée N45-50 et N145-150 sur laquelle vient se superposer une fracturation de développement local constituée des plans N70-100 et N170-200 ; ceux-ci peuvent être très denses malgré une extension plus limitée que pour la fracturation principale.

CHAPITRE IX

LA FRACTURATION ET LE GENIE CIVIL

L'INTENSITE DE LA FRACTURATION (traduction numérique de cette intensité)

Les chapitres précédents ont montré la possibilité d'une description géométrique des orientations des plans de fracturation. Un autre paramètre géotechnique intéressant est celui qui permet de donner une expression numérique de l'intensité de la fracturation.

LA METHODE

C'est dans ce but que des mesures ont été entreprises dans la galerie de l'Etoile où la géométrie de la fracturation a déjà été décrite ; une appréciation brute de l'intensité y est très malaisée, d'une part à cause de nombreuses variations et, d'autre part, en raison de la forte dispersion qui affecte les directions des plans. La méthode suivante a été utilisée : tous les 100 m de la galerie, on a défini une surface de deux mètres carrés en pied droit (le calage sur les marques de P.M. assure l'objectivité des prélèvements). Sur l'étendue de cette surface ont été mesurées les longueurs de toutes les arêtes de prismes découpés par les plans de diaclases et de stratification.

LES RESULTATS

Ces mesures de longueur ont été mises sous forme d'histogrammes reportés sur les figures 119 et 120. On peut ainsi apprécier la longueur la plus fréquente de la maille découpée par les plans de fracturation, ainsi que la dispersion qui l'affecte. Des familles d'histogrammes semblables sont apparues ; leur comparaison avec la géologie montre une très nette corrélation entre l'intensité de la fracturation (exprimée longueur de maille) et la nature lithologique du terrain. Par exemple, les histogrammes 30, 33, 34, 35, 38 montrent une maille centimétrique avec une très faible dispersion qui s'oppose à la maille décimétrique avec une forte dispersion des dolomies : histogrammes 7, 8, 9. De plus, le passage d'une famille à l'autre (qui correspond à un changement de lithologie) se fait de façon inattendue : au lieu d'un déplacement progressif de la valeur modale, on a l'apparition d'un nouveau mode, tandis que l'autre régresse sans glissement sur les abscisses ; ce phénomène est bien illustré par le passage des calcaires néocomiens aux dolomies, histogrammes 3, 5, 6 et par le passage des dolomies aux calcaires sublithographiques, histogrammes 28 à 30. La récurrence dolomitique dans les calcaires sublithographiques, histogramme 37, est également très caractéristique. Cette représentation donne bien une valeur numérique de l'intensité de la fracturation, valeur modale de l'histogramme, en même temps qu'elle permet de saisir des informations contenues dans la dispersion des mesures.

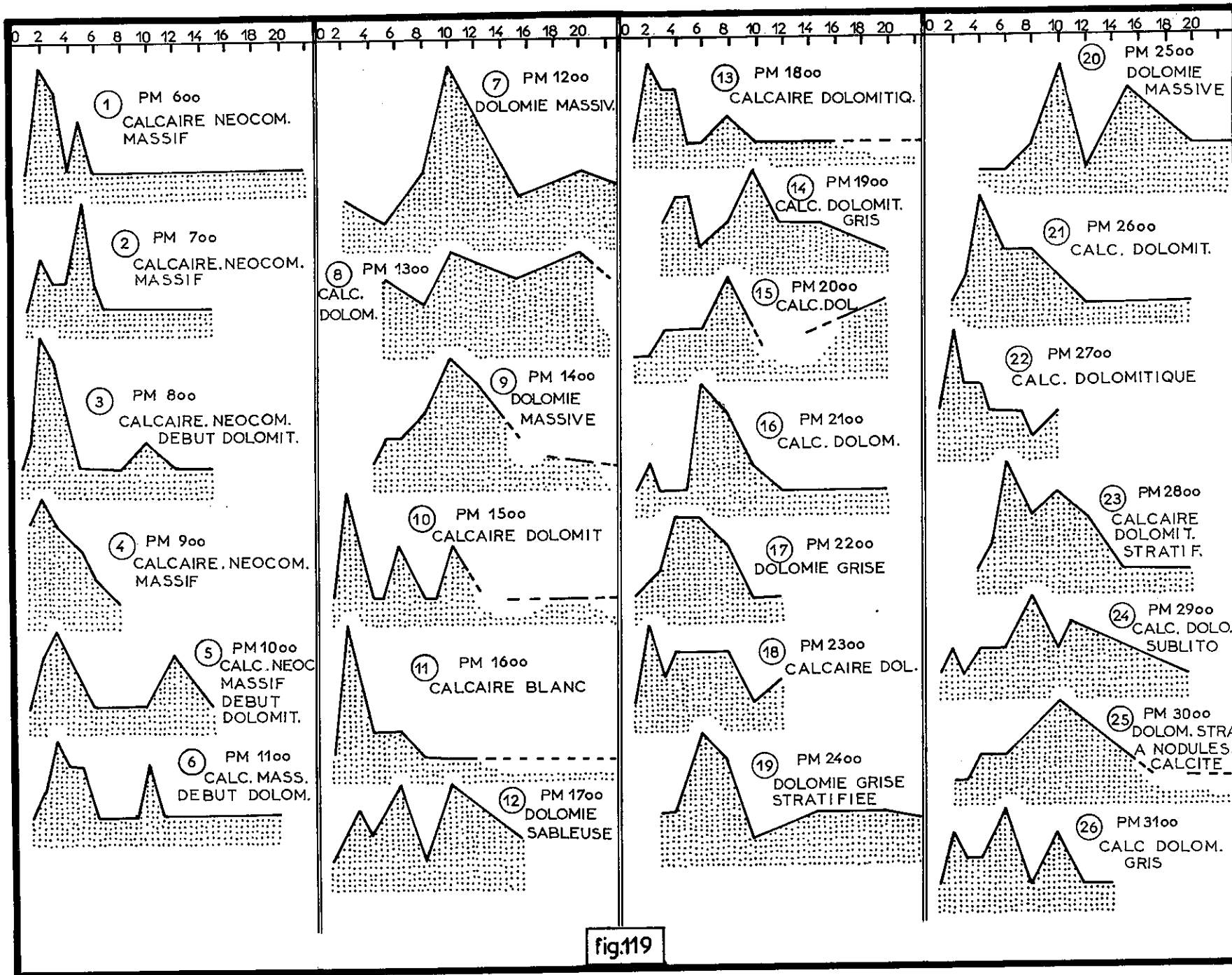


fig.119

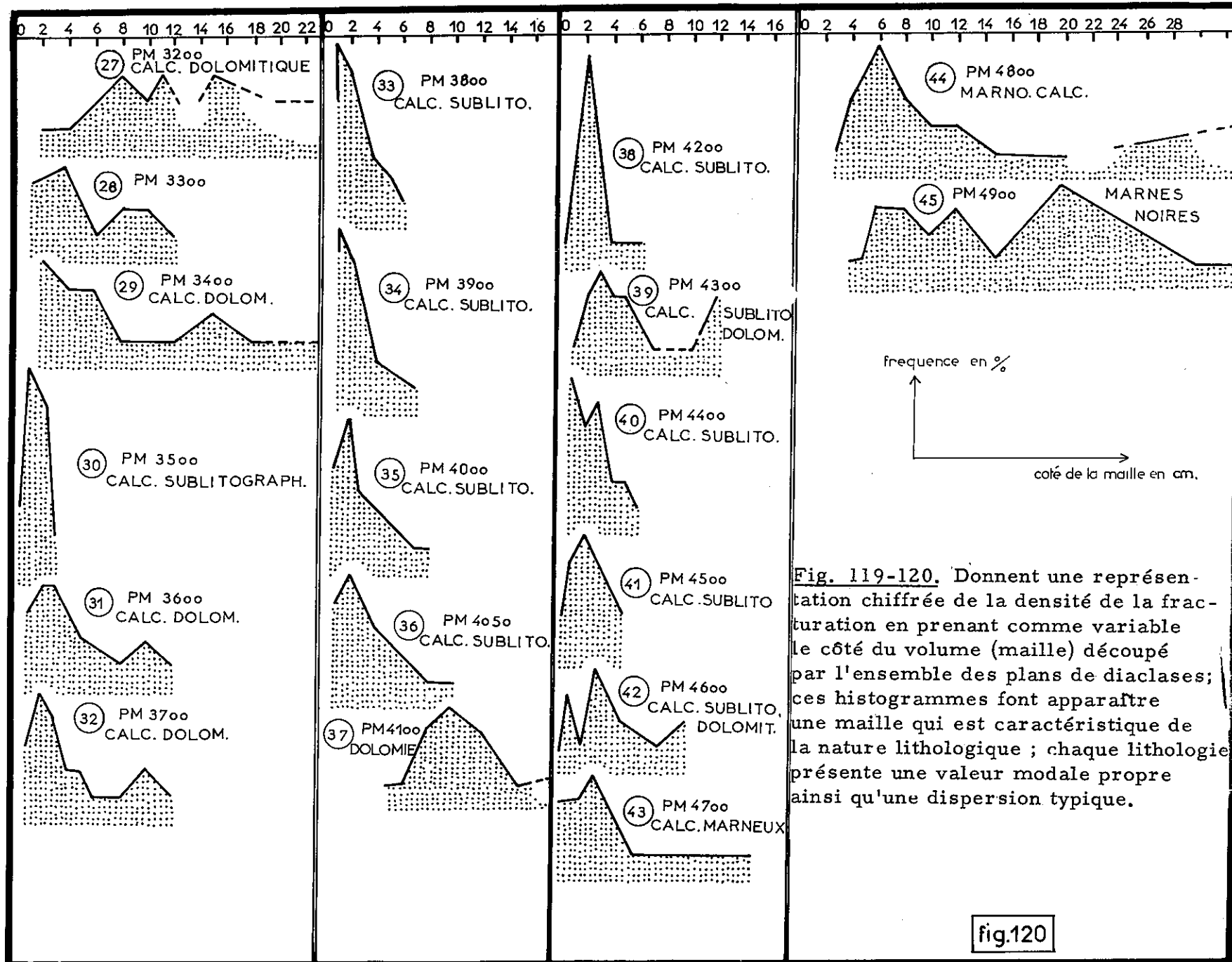


Fig. 119-120. Donnent une représentation chiffrée de la densité de la fracturation en prenant comme variable le côté du volume (maille) découpé par l'ensemble des plans de diaclases; ces histogrammes font apparaître une maille qui est caractéristique de la nature lithologique ; chaque lithologie présente une valeur modale propre ainsi qu'une dispersion typique.

fig.120

FRACTURATION ET ALTERATION KARSTIQUE

Une étude de la karstification a été réalisée dans la galerie de l'Etoile (5000 m) et dans la galerie de Concors (4000 m). L'altération y est nettement apparue guidée par les plans de direction N45 ; ceci montre encore une fois la non équivalence des plans de fracturation. En effet, ce plan appartient au couple N45-50, N145-150 mais est toujours plus étendu et mieux réglé que son associé N145-150. De même lorsque la fracturation est représentée par les familles N zéro, N100, le plan le plus méridien, qui est, là encore, le plus étendu et le mieux réglé, joue un rôle dominant dans l'introduction du karst. Dès lors, la localisation des champs de diaclases ayant ces directions régionalement privilégiées mériterait d'être systématisées dans les études prévisionnelles ; en effet, l'étude géologique classique précisera les structures majeures est-ouest mais ne fera pas apparaître cette forte anisotropie d'un certain nombre de propriétés (perméabilité, stabilité) superposée aux directions est-ouest selon N45 ou N zéro. En fait, le karst est davantage déterminé par la fracturation et la morphologie que par les structures géologiques.

ROLE DE LA MORPHOLOGIE

Sur le tracé des galeries (9 km en deux sites), on a porté l'intensité de la karstification (distinction entre simple altération des diaclases, formation de poches argileuses, circulation dans des réseaux ouverts) et on a superposé le profil topographique recouvrant le tracé. Il est apparu :

- une corrélation négative entre la position des talwegs et les zones karstifiées ;
- une karstification augmentant lorsque la topographie s'aplatit (il faut noter qu'en Provence la topographie est assez conforme à la géologie ; à un plateau topographique correspond généralement une aire géologiquement tabulaire, et la pente morphologique reflète le pendage des couches).

Il y a là encore matière à prévision, notamment pour les tracés de galeries : une aire tabulaire est géologiquement favorable en raison de la bonne prévision lithologique que l'on peut y garantir. Mais ce peut être largement une illusion dans la mesure où un tracé prévu à 100 % dans un niveau calcaire rencontre, en fait, des argiles karstiques sur 20, 30, 40 % du profil ; sans compter qu'il devient alors très difficile de contrôler les hors-profils.

CHAPITRE X

TABLEAU RESUME DES RESULTATS

Sur l'étendu de la région étudiée il a été mis en évidence :

- Plis est-ouest non parallèles
 - Interférence de deux directions axiales voisines de 20 à 30 gr qui limite l'extension axiale des plis (chapitre III).
 - Cette superposition de deux directions axiales voisines détermine la forme des terminaisons axiales des plis ; elles sont coniques (chapitre IV).

- Plis transverses (directions axiales sensiblement méridiennes) superposées aux structures est-ouest.
 - Ces plis n'ont pas une intensité uniforme et s'accroissent en faisceaux (chapitres IV et V).
 - L'intensité des chevauchements change brusquement au niveau de ces faisceaux de plis transverses (chapitre V).

- Les translations des chevauchements ne sont pas de directions parallèles
 - Le non parallélisme des translations qui se développe entre les différentes unités chevauchantes, peut aussi affecter une même unité chevauchante (chapitre V).
 - Ce non parallélisme peut rendre compte des déformations transverses (chapitre V).

- La technique de l'analyse structurale permet d'établir la géométrie de la fracturation

- Les directions des plans de diaclases varient autour de thèmes d'extension régionale qui sont (chapitre VIII) :
 - pour la couverture jurassique et crétacé inférieur :
 - . fracturation la plus étendue N50 - N150
 - . fracturation la moins étendue N zéro - N100
 - pour le remplissage crétacé supérieur et éocène :
 - . fracturation la plus étendue N zéro - N100
 - . fracturation la moins étendue N50 - N150

- La fracturation la plus générale est constituée de plans perpendiculaires au plan de stratification (chapitre VIII).
 - La fracturation apparaît très précocement lors des déformations car tous les basculements et courbures du plan de

stratification entraînent avec eux la fracturation. Tardivement cette fracturation rejoue, se désorganise et se déforme en participant aux mouvements tectoniques.

- Certaines fracturations balaient une gamme d'échelles importante (de 1 à 1000) et interviennent dans les caractères des grandes structures (chapitre IV).
- L'intensité de la fracturation a été traduite numériquement (chapitre IX).
 - La corrélation entre intensité de la fracturation et lithologie a été démontrée.
- La relation fracturation - karstification a été mise en évidence.
 - Cette relation est utilisable prévisionnellement dans les projets de Génie Civil.

BIBLIOGRAPHIE

- Carte géologique au 1/80 000 - Feuille d'Aix-en-Provence avec notice explicative (1967). 3e édition.
- ANDERSON (E.M.), 1942. - The dynamics of faulting and dyke formation with applications to Britain. Ed. Oliver and Boyd, Edinburgh and London.
- AUBOUIN (J.) et MENNESSIER (G.), 1963. - Essai sur la structure de la Provence. Livre à la mémoire du Professeur P. FALLOT, t. II, Mém. h. sér. Soc. Géol. Fr.
- AUBOUIN (J.) CHOROWICZ (J.), 1967. - Le chevauchement sud-provençal de l'Etoile à la Sainte-Beaume. - B.S.G.F., (7), IX.
- BILLEREY (A.), 1960. - Un rejeu quaternaire de la montagne Sainte-Victoire (Aix-en-Provence). Méditerranée, N° 2-3.
- BLANC (J.) FROGET (C.) GUIEU (G.), 1967. - Géologie littorale et sous-marine dans la région de Marseille. Relations avec les structures de la Basse-Provence. - B.S.G.F., (7), t. IX.
- CARON (J.P.) GUIEU (G.) TEMPIER (C.), 1966. - Quelques aspects de la tectonique tangentielle en Basse-Provence occidentale. - C.R. somm. S.G.F.
- CARON (J.P.) GUIEU (G.) TEMPIER (C.), 1967. - Les étirements et les cisaillements tangentiels dans le flanc normal de la structure de la Sainte-Beaume. - B.S.G.F., (7), IX.
- COLLOT (L.), 1880. - Description géologique des environs d'Aix-en-Provence. - Thèse
- CORNET (C.), 1963. - Sur l'existence, en Provence, d'une phase tectonique oligocène d'origine profonde. - B.S.G.F., (7), V.
- 1965. - Evolution tectonique et morphologique de la Provence depuis l'Oligocène. Mém. S.G.F.
- CORROY et DENIZOT (G.), 1943. - La Provence occidentale. Paris, Hermann ed.
- CORROY (G.) 1960-1963. - L'évolution paléogéographique post-hercynienne de la Provence. Livre à la mémoire du Professeur P. FALLOT, t. II, Mém. h. sér. Soc. Géol. Fr.
- CORROY (G.), DURAND (J.P.), TEMPIER (C.), 1964. - Evolution tectonique de la montagne Sainte-Victoire en Provence. - B.S.G.F., (7), VI.
- DUFAURE (Ph.), LEGUILLETTE (J.), VETTER (P.), 1967. - Coupes de deux sondages forés dans la région de Gardanne (Bouches-du-Rhône). - B.S.G.F., (7), IX.
- FROGET (C.), GUIEU (G.), ROUX (M.), 1964. - Observations sur la partie sud ouest de la chaîne de la Nerthe, à l'Ouest de Marseille. - C.R. Ac. Sc., t. 258.

- FROGET (C.), GUIEU (G.), ROUX (M.), 1966. - Etude tectonique de la région sud de la Nerthe. - B.S.G.F., (7), VIII.
- GOGUEL (J.), 1939. - Tectonique des chaînes subalpines entre la Bléone et la Durance. - Bull. Serv. Carte géol. Fr., t. 41, N° 202.
--- 1943. - Essai de synthèse tectonique de la Provence. - B.S.G.F., (5), XIII.
- GUIEU (G.), 1964. - La structure de l'extrémité occidentale de la chaîne de l'Etoile, au Nord de Marseille. -
B.S.G.F., (7), VI.
--- 1967. - Un exemple de tectonique tangentielle : l'évolution du cadre montagneux de Marseille. -
B.S.G.F., (7), t. IX.
- HAM (P.), 1967. - Les systèmes de diaclases des grès des Vosges du Nord. D.E.S. Fac. Sci. Strasbourg.
- HOSHINO (K.), 1967. - Fracture system of Oshima island, Kyushu : a study of jointing in brittle sedimentary rocks. -
Geological survey of Japan. Report N° 222.
- LINDSTRÖM (M.), 1961. - Tectonic Fabric of a sequence of Areas in the Scandinavian Caledonides. The Institutes of Mineralogy
Paleontology and quaternary geology. University of Lund, Sweden, N° 98
- LUTAUD (L.), 1935. - Sur la genèse des chevauchements et des écaillés de la Provence calcaire. -
C.R. somm. S.G.F.
--- 1957. - La tectogenèse et l'évolution structurale de la Provence. Rev. Géol. Phys. et Géol. dyn., (2), t. I.
- MENNESSIER (G.), 1953. - La bordure orientale de la bande triasique de Barjols au Nord de l'Argens (Var). -
C.R. somm. S.G.F.
- MULLER (J.), 1965. - Le revêtement permo-triasique du Jarra et de l'Arradoy en Pays de Cize (Pyrénées occidentales françaises).
Analyse et cinématique des déformations. Actes de la Société Linnéenne de Bordeaux, t. 102, sér. B, N° 9.
- RAMSAY (J.), 1967. - Folding and fracturing of rocks. - Mc. Graw - Hill. London.
- ROUSSET (C.), 1967. - Preuves de la transgression vindobonienne sur la crête de la montagne de Sainte-Victoire (Bouches-du-Rhône).
Note au B.S.G.F.
--- 1967. - Essai de mise au point sur les terra rossa provençales. - C.R. Ac. Sci., t. 264.
- TOURAINE (F.), 1965. - Phases terminales et tectogenèse de la montagne Sainte-Victoire. - B.S.G.F., (7), VII.
- TURNER (F.J.), WEISS (L.E.), 1963. - Structural analysis of metamorphic tectonites. - Mc. Graw-Hill, ed. New-York et Londres.
- VIALON (P.), 1966. - Méthodes de l'analyse structurale. Applications à la géologie alpine. - Thèse, Grenoble.
--- 1968. - Clivages schisteux et déformations : répartition et genèse dans le bassin mézozoïque de Bourg-d'Oisans. -
Géologie Alpine, Trav. Lab. géol. Fac. Sci. Grenoble, t. 44.
- WILSON (G.), 1960-1961. - The tectonic significance of small scale structures and their importance to the geologist in the field.
Bull. Soc. Géol. Belgique, t. 84, N° 9 et 10.

Vu,
Grenoble, le
Le Président de la Thèse,

R. BARBIER

Vu,
Grenoble le,
Le Doyen de la Faculté des Sciences,

E. BONNIER

Vu, et permis d'imprimer
Le Recteur de l'Académie de Grenoble,

M. NIVEAU