

19713
(043)RE.

FACULTE des SCIENCES
UNIVERSITE SCIENTIFIQUE et MEDICALE
de GRENOBLE

THESE de DOCTORAT D'ETAT
présentée par

Paul MOLLARD

BIBLIOTHEQUE
GROUPE DE LABORATOIRES
DU
CENTRE NATIONAL DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
DE GRENOBLE

2ème Sujet : Quelques aspects récents du magnétisme
des roches, la tectonique des plaques.

QUELQUES ASPECTS RECENTS DU MAGNETISME DES ROCHES

I - INTRODUCTION

"Les ruines d'un monde ancien sont visibles dans la structure actuelle de notre planète, les strates qui maintenant constituent nos continents étaient autrefois sous la mer, où elles se formèrent de débris de vastes continents..."

Les vues exprimées ainsi par HUTTON ⁽¹⁾ (1788) sont encore admises de nos jours.

L'idée que les continents, autrefois soudés, ont dérivé jusqu'à leurs positions actuelles est née au début du siècle (WEGENER 1929) ⁽²⁾. Cette idée n'a pu ensuite se développer que grâce au paléomagnétisme et ce sont les études sur les anomalies magnétiques parallèles aux dorsales océaniques qui ont apporté les arguments décisifs aux partisans de la dérive des continents.

La moisson des résultats expérimentaux glanés depuis à la surface de la planète et au fond des océans, la contribution d'autres disciplines des sciences de la terre ont abouti à une "hypothèse de travail unificatrice, cohérente à l'échelle du globe ayant des vertus prédictives quantitatives et qui prétend fournir un modèle cinématique qui rend compte de l'activité tectonique actuelle à la surface de la terre".

Cette hypothèse de travail est la Tectonique des Plaques selon la nomenclature indiquée par LE PICHON ⁽³⁾.

Après avoir rappelé l'origine du magnétisme des roches, les hypothèses à la base de l'archéo et du paléomagnétisme nous indiquerons les mécanismes admis pour représenter l'expansion des fonds océaniques et la dérive des continents ou tectonique des plaques. Nous nous attacherons, à partir des résultats les plus caractéristiques, à montrer comment le ma-

gnétisme des roches permet d'obtenir des renseignements sur l'évolution passée (et future) de la planète. Nous avons effectué ce travail à partir de trois articles ou ouvrages récents en langue française de THELLIER ⁽⁴⁾, COULOMB ⁽⁵⁾ et LE PICHON ⁽³⁾.

II - ORIGINES DU MAGNETISME DES ROCHES

II.1 Le champ magnétique terrestre

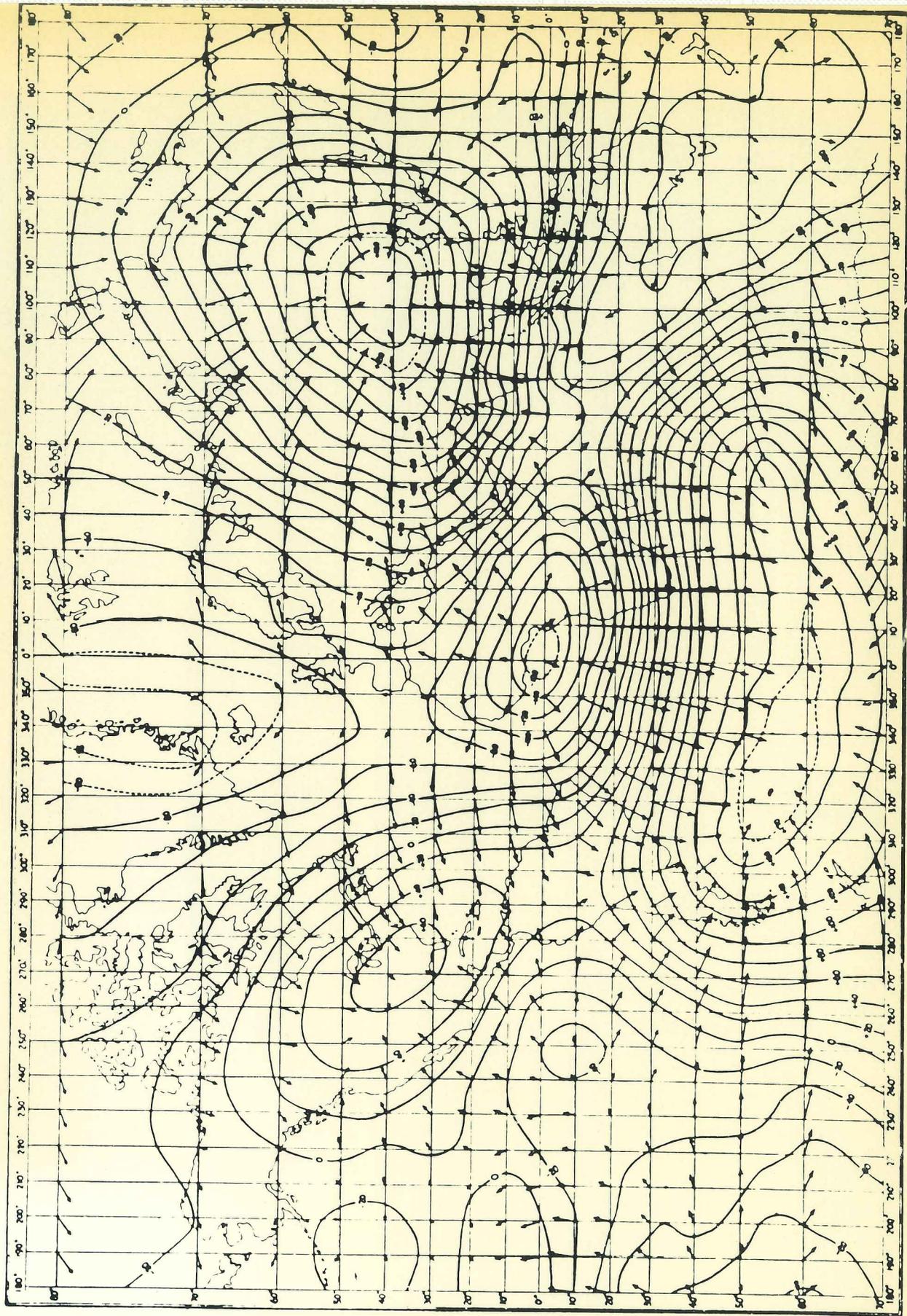
Le champ magnétique terrestre est défini par la donnée de trois éléments : la déclinaison et l'inclinaison magnétiques (D, I) repérées par rapport au pôle géographique et F l'intensité totale du champ donnée en œersteds ou γ (10^{-5} Oe).

On a tout d'abord assimilé le champ terrestre à celui d'un dipôle de moment $M = 0,315 R^3$ u.e.m.c.g.s. dont l'axe rencontre la surface terrestre aux points qu'on appelle les pôles géomagnétiques et il est possible de calculer en un point quelconque du globe le champ dipôle et de le comparer au champ réel.

E.C. BULLARD ⁽⁶⁾ fig.1,2 a pu tracer ainsi la différence entre les champs magnétiques réel et dipôle. On admet aujourd'hui que les valeurs considérables et remarquablement régulières sur de grandes régions de la terre, du champ non dipôle sont liées à des courants électriques circulant dans le manteau terrestre.

Les études de la variation du champ magnétique terrestre au cours de la dernière centaine d'années montrent que la direction du champ magnétique dipôle n'a pas varié mais que le champ non dipôle dérive d'est en ouest à une vitesse moyenne de 20 minutes par an.

Les fluctuations dans le temps et dans l'espace du champ magnétique terrestre sont étudiées de façon systématique par des stations automatiques et par voie aérienne ⁽⁷⁾. HIDE et MALIN ⁽⁸⁾ observent l'existence de corrélations entre le champ gravitationnel de la terre et la partie non dipôle du champ magnétique terrestre. Ils se basent sur l'analyse des potentiels de gravitation et magnétique obtenus par satellites



CHAMP NON DIPOLE SUR LE GLOBE EN 1945.0
(CARTE DE E.C. BULLARD).

FIG. 2

et rattachés aux résultats des observatoires terrestres. Ils attribuent ces corrélations à la présence d'une interaction magnétohydrodynamique qui se serait produite à l'interface entre le manteau et le coeul liquide il y a 500 ans et qui se traduit par la dérive à l'ouest du champ magnétique terrestre déjà citée ci-dessus et en accord avec les données archéomagnétiques.

II.2 Le magnétisme des roches

Les roches terrestres contiennent des matériaux ferro, ferri ou antiferromagnétiques susceptibles de s'aimanter sous l'action du champ magnétique terrestre.

Dans certaines conditions favorables une fraction de l'aimantation acquise, appelée aimantation rémanente, peut se conserver indépendamment des fluctuations ultérieures du champ magnétique terrestre et il est possible de déduire de la mesure de cette aimantation rémanente l'orientation et l'intensité du champ magnétique terrestre régnant au moment de son acquisition.

Les variations séculaires du champ magnétique terrestre sont connues depuis quelques siècles, l'étude des roches et des poteries permet de remonter plus loin dans le passé historique : c'est l'archéomagnétisme. On a cherché à retrouver les variations du champ magnétique terrestre dans le passé géologique : c'est le paléomagnétisme. Cette dernière discipline a permis de confirmer l'hypothèse de la dérive des continents de WEGENER.

Les mécanismes d'acquisition et de conservation par une roche d'une aimantation rémanente stable ont été étudiés expérimentalement par THELLIER et son école ⁽⁴⁾. Les interprétations théoriques, à la base des études d'archéo et paléomagnétisme actuelles, faite par NEEL ⁽⁹⁾.

Théorie et expérience indiquent pour une particule ferro ou ferrimagnétique suffisamment fine l'existence d'une température de blocage T_B d'autant plus faible que la particule est plus fine. Le moment permanent de cette particule a une orientation qui fluctue spontanément en fonction du temps sous l'influence de l'agitation thermique au-dessus de T_B et on observe ainsi un paramagnétisme apparent : c'est le superparamagnétisme. Il reste figé au-dessous de T_B suivant l'orientation qu'il avait au moment du passage à la température de blocage.

Pour une assemblée de ces particules refroidie de $T > T_B$ à $T < T_B$ dans un champ magnétique H il y a apparition d'une aimantation, dite thermorémanente (A.T.R.), dirigée suivant le champ magnétique de refroidissement, fonction de celui-ci, qui présente une stabilité remarquable vis à vis des fluctuations ultérieures du champ magnétique terrestre ou des champs magnétiques parasites.

L'école française de magnétisme a acquis une grande expérience dans l'utilisation de traitements thermomagnétiques efficaces pour effacer les aimantations rémanentes induites parasites et n'étudier que la rémanente fossile acquise au moment du refroidissement de la roche ou de la poterie dans le champ magnétique terrestre ⁽⁴⁾ : ce sont les nettoyages magnétiques.

— En dehors de l'A.T.R. seule l'aimantation rémanente détritique (A.R.D.) qui s'obtient en cours de sédimentation par l'orientation dans le champ magnétique terrestre des particules fines qui se déposent, permet d'obtenir des informations sur les champs anciens.

Les effets particulièrement néfastes des aimantations rémanentes visqueuses qui peuvent être à l'origine de champs coercitifs considérables (2.000 G) alors que le champ magnétique où elles sont acquises est faible viennent d'être mis

en relief par BIQUAND (10). Elles obligent à rejeter les échantillons qui présentent ces effets : il semble que ce soit le cas de certains échantillons de roches lunaires de RUNCORN (11).

Certains échantillons de roches peuvent présenter des phénomènes curieux, cycles d'hystérésis du type noeuf de cravate, liés aux distributions granulométriques (12).

III - LE PALEOMAGNETISME

III.1 Le postulat du paléomagnétisme, la dérive des continents.

Le Postulat de base du paléomagnétisme est que le champ magnétique terrestre moyen, en négligeant pour les durées de temps à l'échelle géologique le bruit de fond que constituent les variations séculaires, est celui d'un dipôle axial coïncidant avec l'axe de rotation de la terre.

On obtient donc en effectuant des mesures sur un grand nombre d'échantillons de la même ère géologique une direction moyenne qui doit être celle de l'axe de rotation de la terre. L'expérience montre que ce n'est pas le cas et que ce pôle est le même pour tous les points d'un continent à un temps géologique donné mais varie d'un continent à l'autre.

Il ne reste plus qu'à admettre que la position des continents a "dérivé" au cours des temps. Le paléomagnétisme apporte ainsi une confirmation éclatante à l'hypothèse de WEGENER. De très nombreux travaux ⁽⁵⁾ permettent ainsi de suivre la migration des continents au cours des ères géologiques.

III.2 L'inversion du champ magnétique terrestre.

Une nouvelle difficulté allait surgir avec la multiplication des études expérimentales paléomagnétiques sur l'ensemble de la planète. De nombreux résultats indiquaient que le champ magnétique terrestre s'était inversé à plusieurs reprises au cours des ères géologiques.

Les travaux théoriques de NÉEL ⁽⁹⁾ avaient mis en évidence des mécanismes possibles d'inversion de la direction

— Echelle géomagnétique du Lamont. De gauche à droite, échelle « phanérozoïque » des ères géologiques, numéro des anomalies, polarité magnétique (polarité normale en noir). (D'après HEIRTZLER, DICKSON, HERRON, PITMAN, LE PICHON, 1968.)

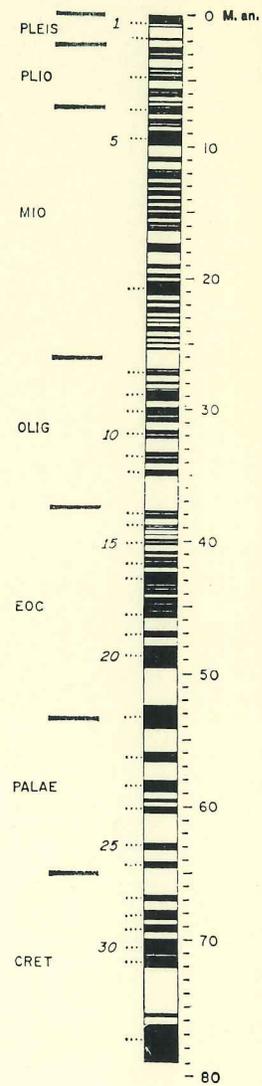
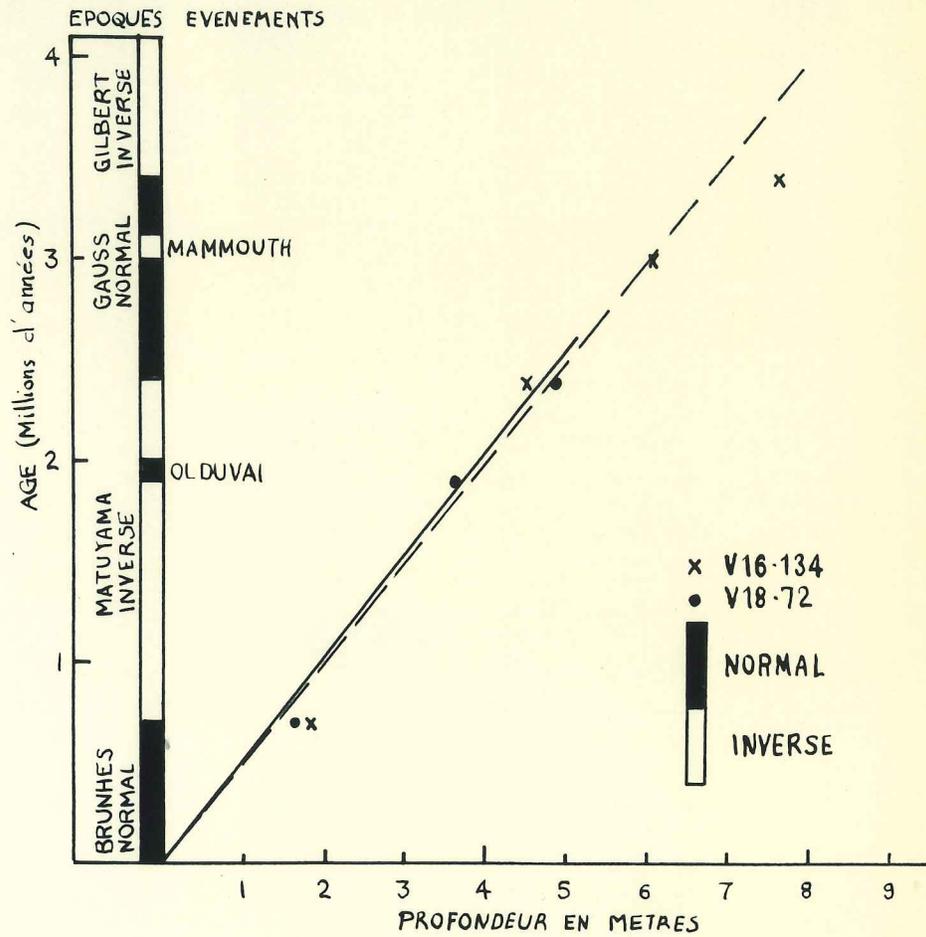
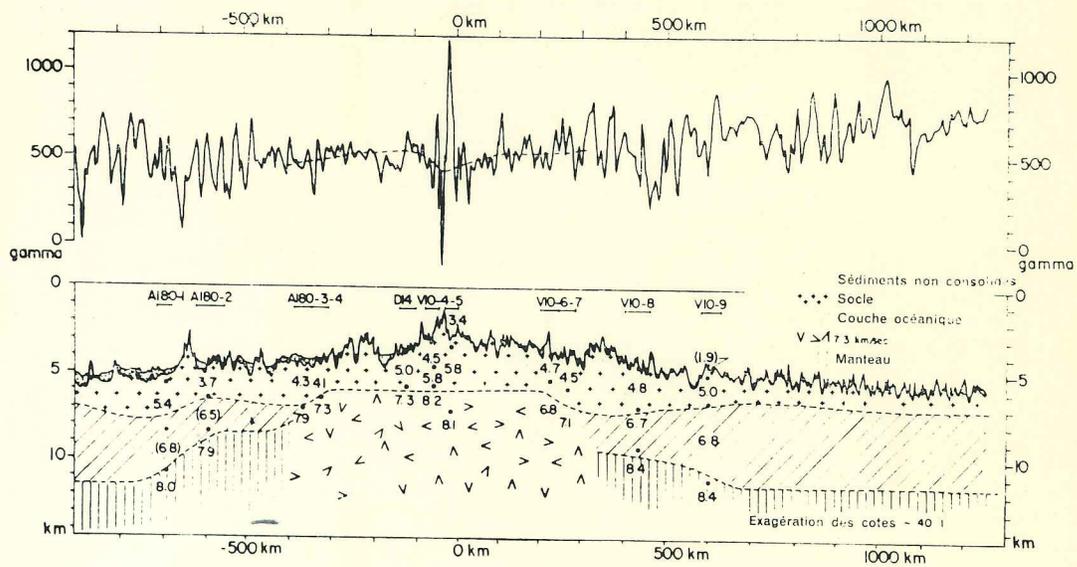


FIG. 3

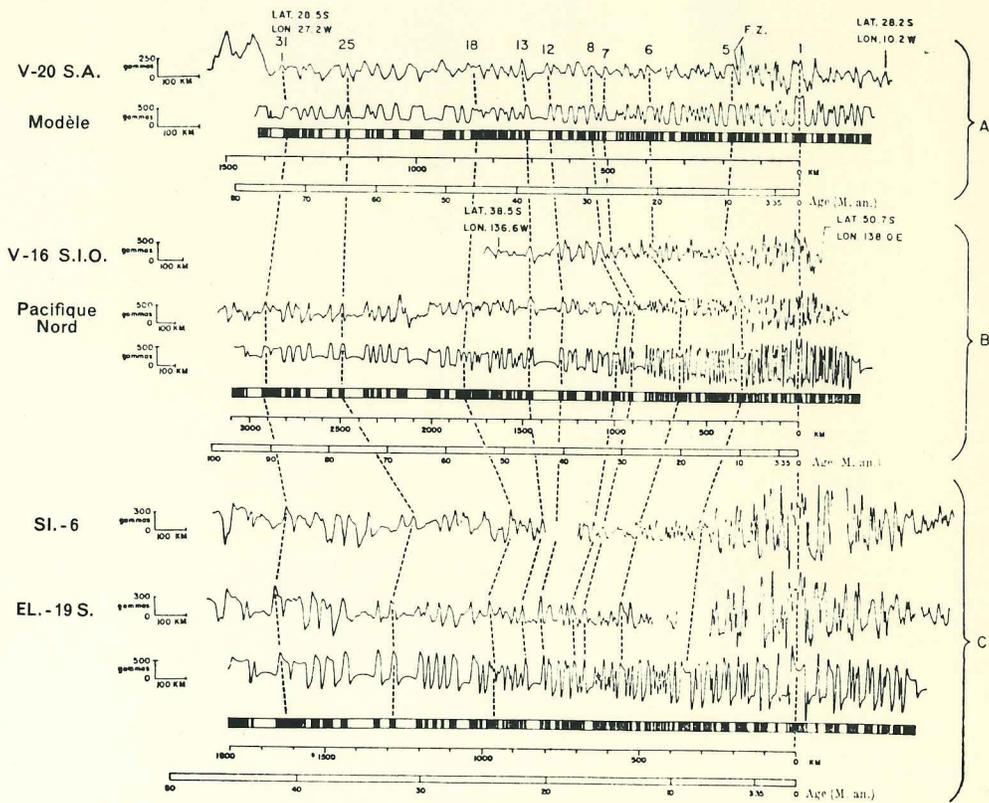


AGE DE LA SEDIMENTATION EN FONCTION
DE LA PROFONDEUR

FIG. 4



— Profil magnétique de la dorsale atlantique à 32° N
 tel qu'il serait enregistré à une hauteur constante de 3 km au-dessus du fond
 En trait discontinu, effet supposé de la variation de profondeur du point de Curie
 Au-dessous, section composite de la croûte dans la même région
 (D'après HEIRTZLER et LE PICHON, 1965)



— Sélection de profils magnétiques provenant de divers océans (S.A. : Atlantique Sud ; S.I.O. : Sud de l'océan Indien ; SI.-6, E.L.-19 S. : Pacifique Sud). Sous chacun des profils observés, profil théorique déduit des blocs à aimantation normale (*noirs*) et inversée (*blancs*) ; chaque bloc a 2 km d'épaisseur. Avec chaque modèle, échelle d'âges supposant un âge de 3,35 M. an. pour la fin de la période de Gilbert. Les lignes tirées unissent les anomalies de même numéro. (D'après HEITZLER, DICKSON, HERRON, PITMAN, LE PICHON, 1968.)

de l'aimantation rémanente par rapport à l'orientation du champ magnétique ; des exemples étaient effectivement observés sur le terrain. Il apparut cependant assez rapidement qu'il ne pouvait s'agir que de cas particuliers et les inversions du champ magnétique terrestre sont aujourd'hui reconnues et datées. On admet également que le champ magnétique terrestre a son origine dans le manteau et des théories décrivent des mécanismes possibles d'inversion.

L'étude magnétique des dorsales et des sédiments océaniques allait éclairer d'un jour nouveau ces problèmes. L'A.R.D. des petites particules magnétiques qui ont fossilisé la direction du champ magnétique terrestre au moment de leur dépôt dans les couches sédimentaires océaniques sera un guide particulièrement précieux qui confirme les inversions du champ magnétique terrestre. La datation de ces inversions obtenues sur des roches continentales datées par des méthodes radioactives et étudiées par les techniques paléomagnétiques habituelles ^(3, 4) permet de mesurer la vitesse de sédimentation fig. 3, 4.

On sait que les dorsales océaniques présentent un phénomène magnétique curieux. L'étude topographique du champ magnétique mesuré à l'aide de magnétomètres à résonance très sensibles montre, après différentes corrections, l'existence d'anomalies magnétiques alternativement positives et négatives, symétriques sur des milliers de kilomètres par rapport à la dorsale océanique fig. 5, 6. L'existence de ces anomalies liées à des bancs parallèles de roches océaniques dont l'A.T.R. est dans des directions inverses s'interprète par la théorie de l'expansion des fonds océaniques.

III.3 L'expansion des fonds océaniques

Le mécanisme d'"accrétion" ou accroissement marginal a été proposé par HESS ⁽¹³⁾ pour expliquer le renouvellement

des fonds marins et l'interprétation des anomalies magnétiques est due à VINE et MATTHEWS (14).

La partie supérieure du manteau terrestre présente trois couches successives.

La Lithosphère comprend la croûte et une partie supérieure du manteau; elle a une épaisseur de 50 à 100 km et se caractérise par le fait qu'elle peut exercer une résistance de durée importante à des contraintes pouvant atteindre un kilobar.

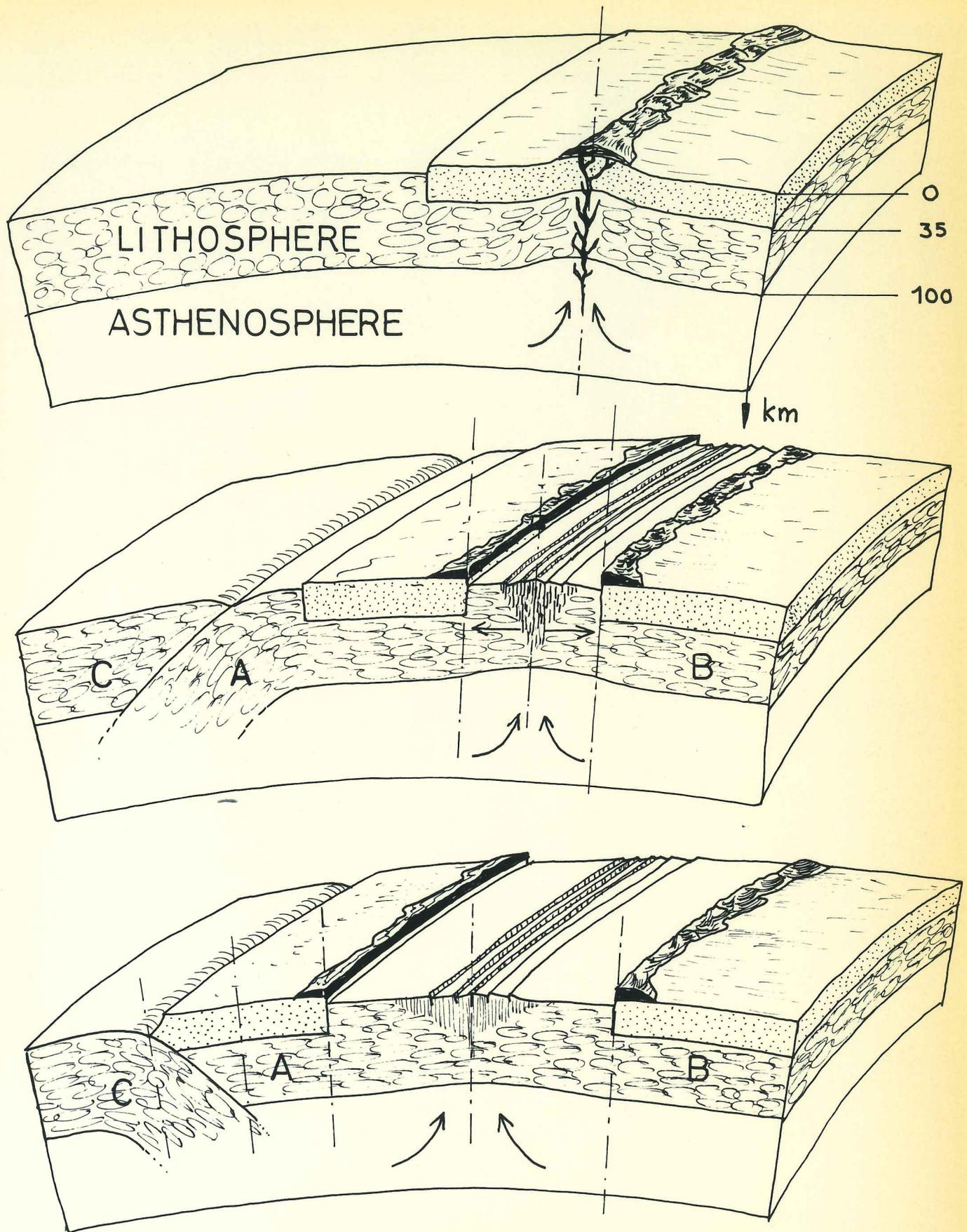
L'asthenosphère, de 50 à 100 km de profondeur ne présente pas de résistance aux contraintes qui s'exercent pendant une durée assez longue. Elle se distingue essentiellement de la lithosphère par une élévation "superadiabatique" de température qui confère aux roches, compte tenu de la pression, des propriétés mécaniques différentes; elle est le siège de mouvements de convection.

La mésosphère dont la viscosité apparente est beaucoup plus forte ne présente pas de mouvement de convection.

Sous l'influence d'un gonflement de l'asthénosphère dû à des courants de convections internes la lithosphère et la plaque continentale se fracturent fig.7 avec apparition d'une zone de séismes et de volcanisme, il y a création de la dorsale du futur bassin.

La croûte océanique sort latéralement des dorsales pour être entraînée par convection vers les continents voisins. Les laves émises dans l'axe des dorsales s'aimantent par refroidissement dans le sens du champ existant à l'époque, s'écartent pour laisser passer de nouvelles laves qui s'aimantent en se refroidissant et ainsi de suite.

S'il y a changement du sens du champ inducteur les laves fraîches émises s'aimantent en sens inverse et il y a séparation de l'ancienne bande axiale en deux blocs magnétiques symétriques.



ETAPES DE LA FORMATION D'UN OCEAN

FIG.7

Il suffit d'une épaisseur de 2 km de laves pour rendre compte des anomalies magnétiques observées. L'étude magnétique des échantillons dragués sur les dorsales indique une A.T.R. très élevée et le point de Curie très bas (140 à 180°C) correspond à une profondeur aimantable de l'ordre de 2 km en tenant compte du fait que le gradient thermique le long d'une dorsale est le triple du gradient habituel de 30°C/km.

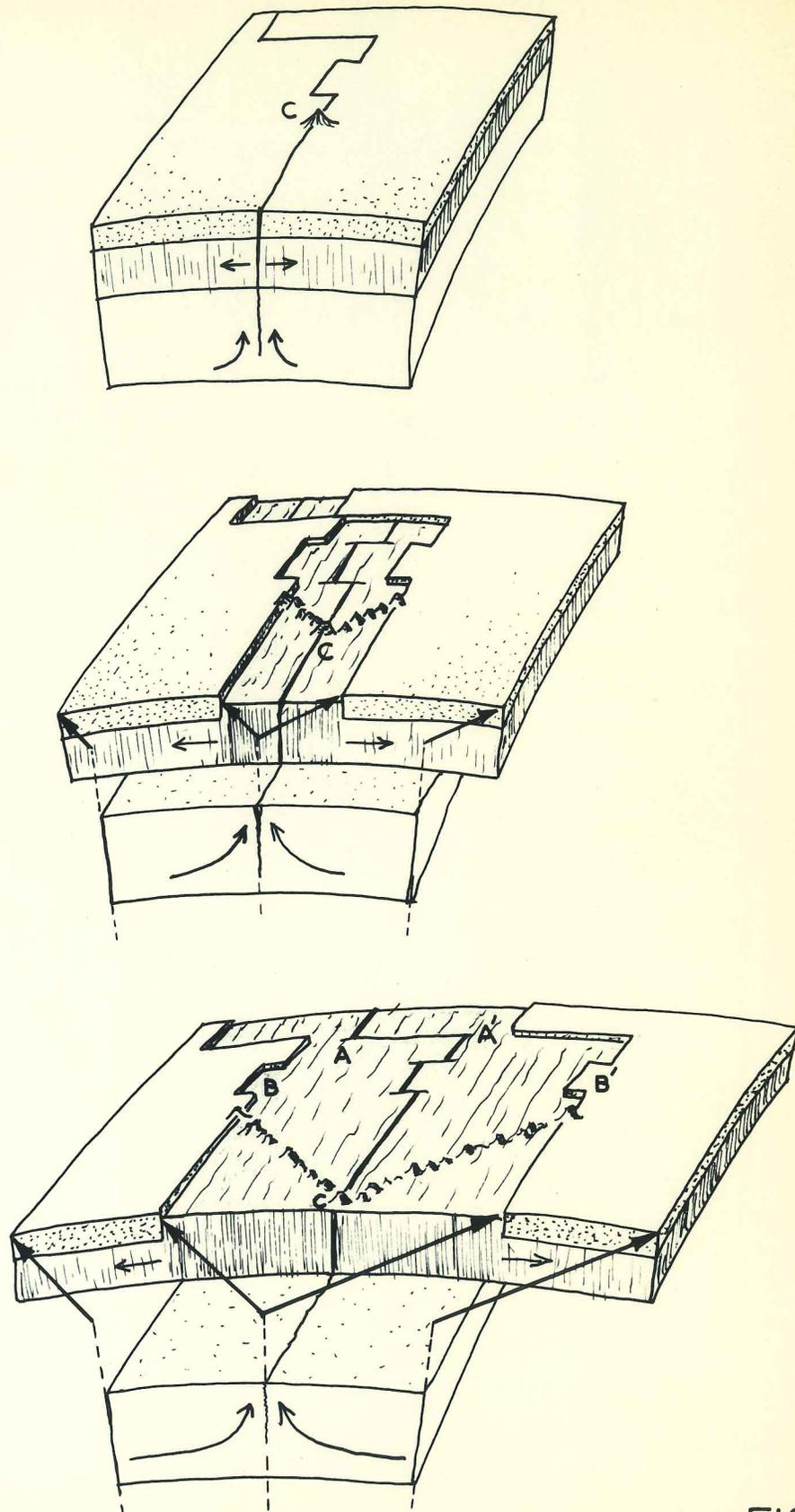
L'étude des anomalies magnétiques permet donc de repérer les dorsales océaniques et de mesurer en fonction du temps le taux d'accrétion marginal en se référant à l'échelle géomagnétique dite du Lamont.

Il faut bien admettre que s'il y a création de nouveaux fonds il y a ailleurs disparition de fonds anciens. L'accroissement de l'Atlantique se fait ainsi au détriment du Pacifique : la croûte de ce dernier passe sous la plaque continentale de l'Amérique. A l'expansion suivant la normale à la dorsale se superpose une dérive vers le nord suivant le mécanisme décrit sur la fig.8. Le mécanisme de "tapis roulants" des fonds océaniques est illustré par le schéma du bas de la fig.8 qui montre comment les restes d'un pic volcanique né sur la dorsale peuvent être entraînés à des milliers de kilomètres. Un exemple de mouvement d'ensemble est donné sur la fig.9.

III.4 La tectonique des plaques, la Méditerranée.

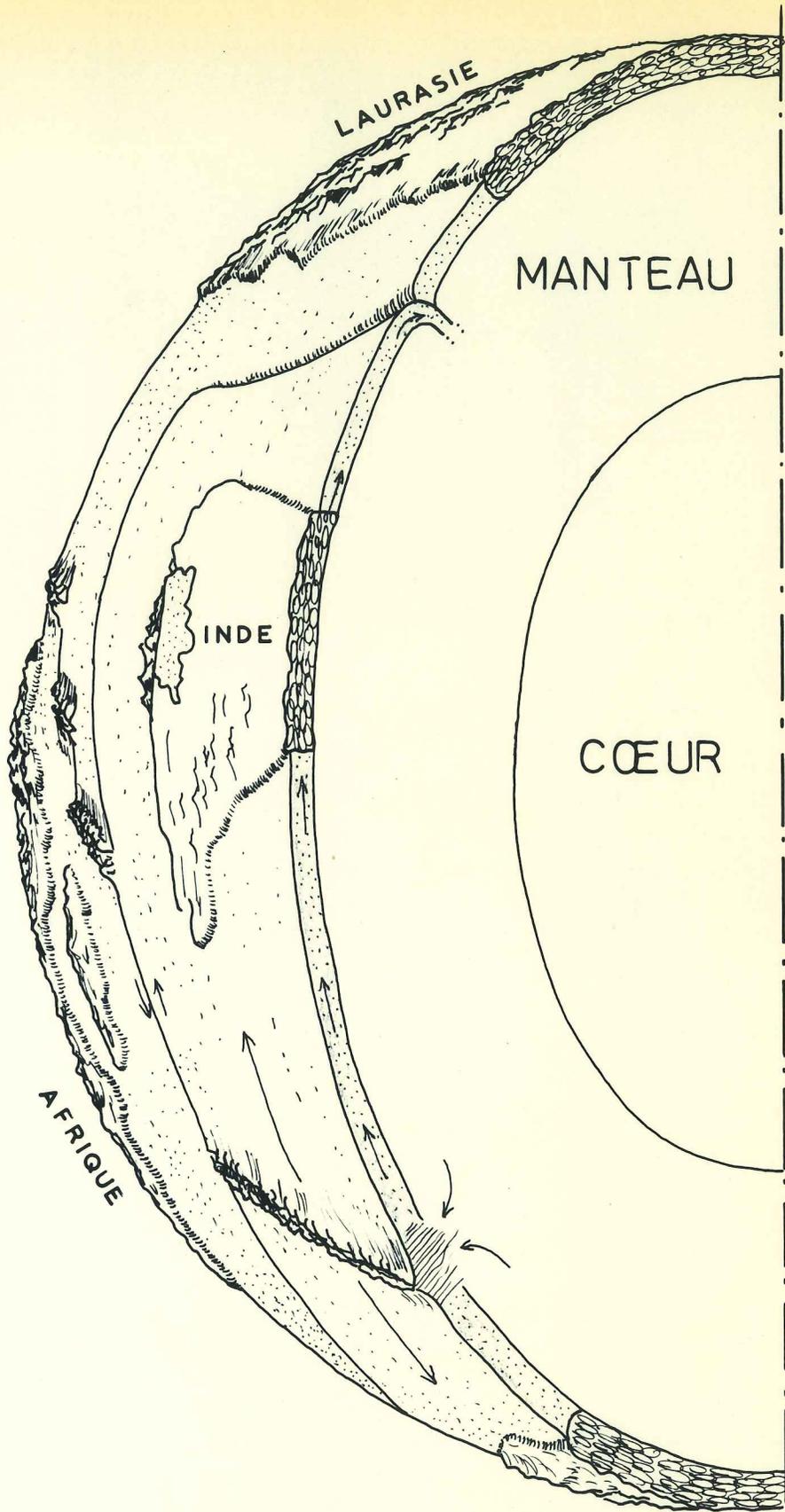
Nous avons implicitement admis avoir affaire à de grandes plaques rigides qui se déplacent d'un seul bloc.

Si on remarque que l'essentiel de l'énergie mécanique dépensée est dissipée dans les zones orogéniques fig.10 où des mouvements différentiels de grande envergure entre plaques lithosphériques rigides se produisent, que la rigidité à l'intérieur des plaques permet de les considérer comme indéformables, on peut se représenter la croûte terrestre comme formée par de grandes calottes sphériques séparées par des zones



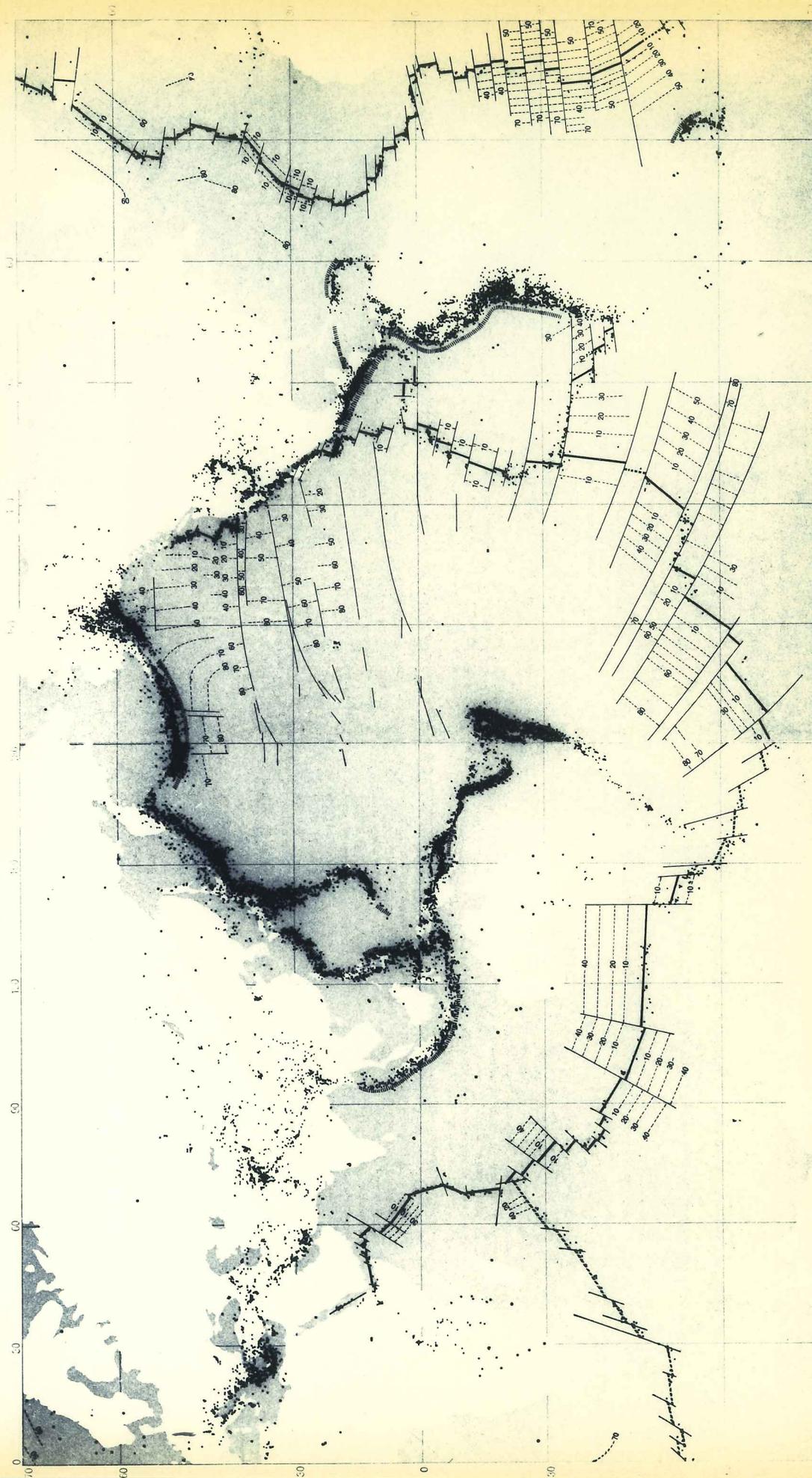
MECANISME DE TRANSLATION ASSOCIE AU MECANISME D'EXPANSION.

FIG. 8



EXEMPLE DE MOUVEMENTS RELATIFS DE
DIFFERENTES PLAQUES.

FIG. 9



LOCALISATION DES CENTRES SEISMIS PAR LA LOCALISATION DE L'EPICENTRE DES SEISMES.

FIG. 10

étroites d'interaction. On peut décrire de manière rigoureuse la géométrie de leurs déplacements en termes de cinématique de corps solides sur la sphère, le centre instantané de rotation sera le pôle eulérien du mouvement et l'axe de symétrie l'axe eulérien fig.11. Les éléments quantitatifs dont on dispose sont les suivants ⁽³⁾ :

- la mesure du taux d'accrétion à l'axe des dorsales (très bien connu pour les dorsales de l'Atlantique et du Pacifique) permet d'obtenir la vitesse d'expansion avec une précision de l'ordre de 0,1 cm/an.

- les études sismiques fournissent les plans de glissement actuels et confirment que les mesures moyennées sur 50 ans donnent les mêmes résultats que la méthode précédente pour quelques millions d'années.

- l'étude des failles océaniques permet d'obtenir avec une grande précision (quelques kms près) les directions de mouvement.

Compte tenu de ces différents éléments on peut déterminer le vecteur vitesse angulaire instantanée (ΔT minimum 100 ans) qui décrit le mouvement relatif.

Cependant, pour passer des mouvements instantanés aux déplacements finis, le problème se complique beaucoup et il faut s'aider d'autres techniques :

- l'étude des failles et des linéations magnétiques dans les océans.

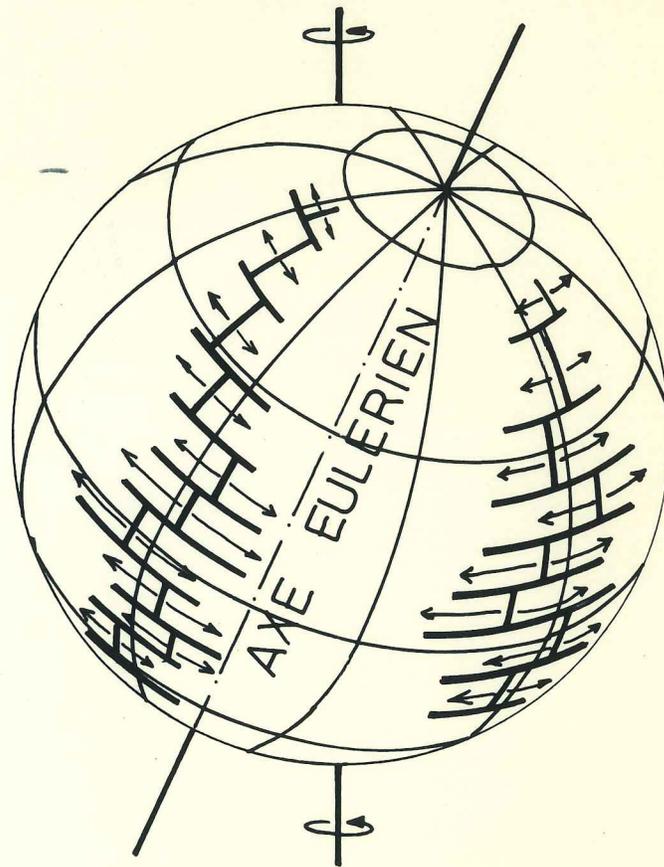
- le paléomagnétisme, soit sur terre, soit en milieu océanique.

- l'ajustement des contours topographiques des marges continentales.

Le fait de passer du concept initial assez flou de dérive des continents à une hypothèse donnant des bases quan-

POLE DE
ROTATION

POLE EULERIEN



DETERMINATION DU POLE EULERIEN
D'UNE PLAQUE A PARTIR DES FAILLES

FIG. 11

titatives, unificatrice pour les différentes branches des sciences de la terre se traduit par un changement de vocabulaire et on parle de la théorie de tectonique des plaques.

On assiste actuellement à une véritable explosion des sciences de la terre grâce à cette nouvelle théorie.

Un des grands problèmes en passe d'être résolu est celui du bassin méditerranéen. En effet, si la théorie de l'expansion des fonds océaniques et son prolongement la "tectonique des plaques" permettent de remonter à partir du mouvement des fonds océaniques aux mouvements des terres émergées, la Méditerranée ne semblait pas répondre à ces schémas.

Par ailleurs l'étude des failles à l'intérieur des continents, beaucoup plus difficile que celle des failles océaniques, est encore à l'état embryonnaire et un moyen d'abord consiste à étudier le prolongement en mer de ces failles.

La majeure partie du bassin est une zone sismiquement active donc susceptible d'être étudiée par les techniques sismologiques et, de plus, la topographie du bassin est très bien connue.

Toutes ces considérations ont conduit les géophysiciens à entreprendre une étude systématique de la Méditerranée, étude dont on commence à enregistrer les premiers succès.

Il semble (3, 15) que pour résoudre le problème de l'ancienne Thethys il faille considérer l'existence de plusieurs petites plaques auxiliaires, très mobiles, dans la région orientale entre les deux grandes plaques de l'Eurasie et de l'Afrique. Il devient alors difficile de relier le mouvement relatif de ces plaques à celui des grandes plaques avoisinantes.

Signalons que la technique d'étude magnétique des dorsales a subi un échec relatif au cours de la campagne "Polymède" du navire océanographique Jean Charcot organisée

pendant l'été 1970 pour vérifier s'il n'existait pas une dorsale de type océanique entre le continent, La Corse, La Sardaigne. Cette hypothèse, se basant sur l'existence de ressemblances frappantes entre ces deux îles d'une part et, respectivement, La Provence et Les Pyrénées, doit conduire à la présence d'un rift central et d'anomalies magnétiques type dorsales océaniques.

De telles anomalies n'ont pu être retrouvées mais, par contre, les premiers résultats d'une campagne ultérieure du "Glomar Challenger" (Septembre 1970), équipé pour effectuer des forages jusqu'à 5.000 mètres de profondeur, montre de part et d'autre du rift supposé la présence de basalte qui témoigne en faveur de l'existence d'une dorsale. L'explication donnée, en attendant les résultats définitifs de ces deux campagnes, est qu'après une période d'expansion du fond il y a eu arrêt de cette expansion, fossilisation du rift central et, sous l'influence de l'augmentation de température due à la couche de sédiments déposés très épaisse, effacement de la signature magnétique caractéristique des dorsales.

Les données paléomagnétiques, comme la mesure de la rotation de la Sardaigne ⁽¹⁶⁾, aident à retrouver les trajectoires des différentes plaques. On espère reconstituer l'évolution du bassin Méditerranée à partir des résultats des campagnes en cours. En dehors de l'intérêt scientifique, ces recherches contribuent à l'étude de la prévision des séismes et à la recherche des zones pétrolifères en mer.

IV - CONCLUSION

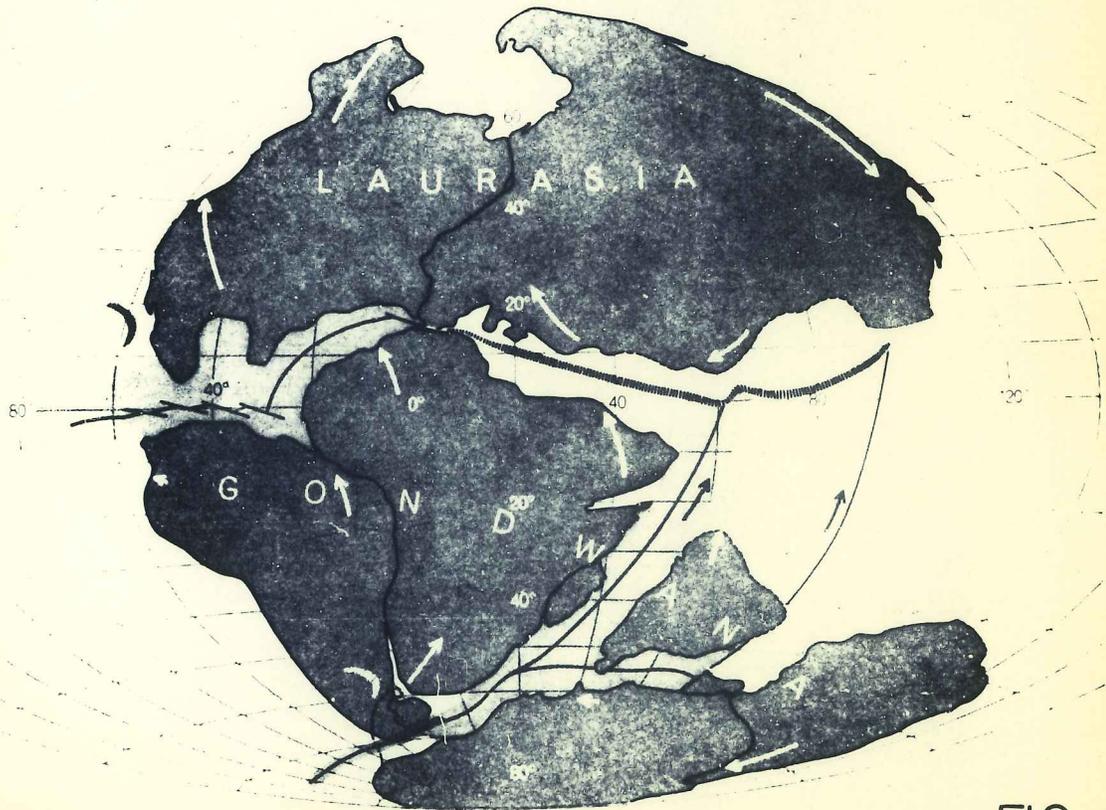
Le paléomagnétisme, dont les hypothèses les plus hardies viennent d'être justifiées, occupe et continuera d'occuper une place de choix dans le cadre de la théorie de tectonique des plaques en parallèle avec nombre d'autres disciplines des sciences de la terre.

Nous terminons en indiquant sur une série de figures la reconstitution faite par DIETZ et HOLDEN ⁽¹⁷⁾ de l'ancienne Pangée qui serait à l'origine, il y a 200 millions d'années, des continents actuels.

Cette reconstitution faite en prenant la meilleure coïncidence possible des marges continentales tient compte des données paléomagnétiques et des résultats obtenus sur l'expansion des fonds océaniques.



IL Y A 200 MILLIONS D'ANNÉES



20 MILLIONS D'ANNÉES PLUS TARD

FIG. 12

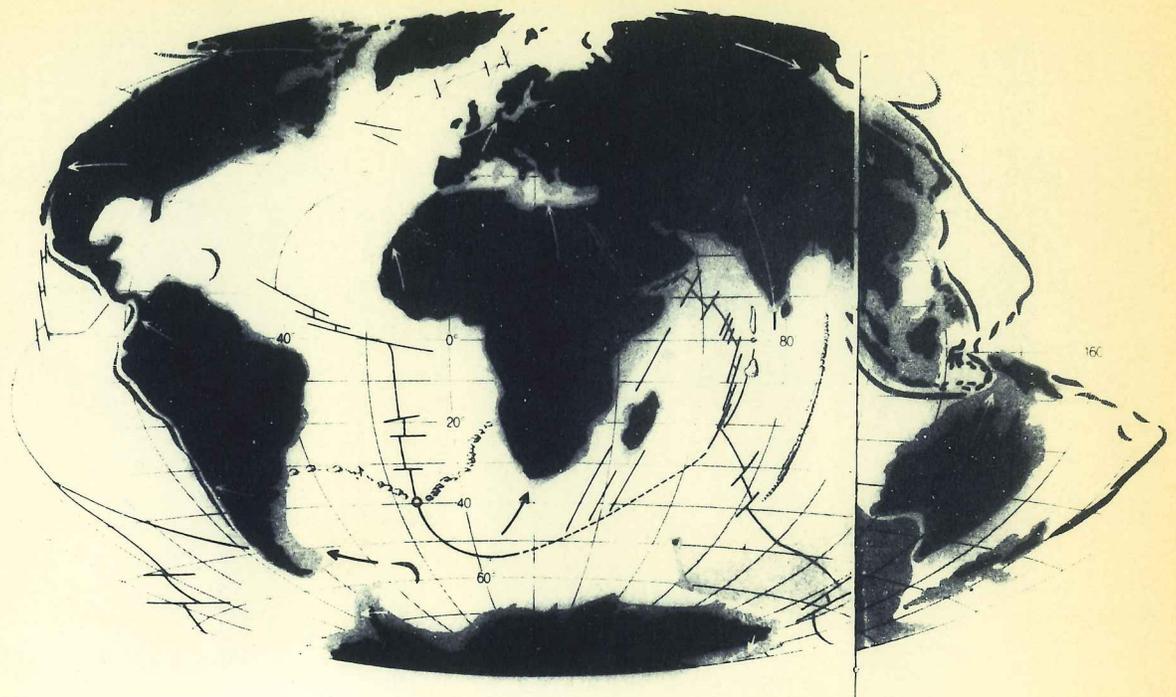


APRES 65 MILLIONS D'ANNEES



APRES 135 MILLIONS D'ANNEES

FIG. 13



AUJOURD'HUI



DANS 50 BILLIONS D'ANNÉES

FIG. 14

PLAN

- I - INTRODUCTION, p. 1
 - II - ORIGINES du MAGNETISME des ROCHES, p. 3
 - II.1 Le champ magnétique terrestre
 - II.2 Le magnétisme des roches
 - III - LE PALEOMAGNETISME, p. 7
 - III.1 Le postulat du paléomagnétisme, la dérive des continents
 - III.2 L'inversion du champ magnétique terrestre
 - III.3 L'expansion des fonds océaniques
 - III.4 La tectonique des plaques, la Méditerranée
 - IV - CONCLUSION, p. 14
- BIBLIOGRAPHIE, p. 15

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

- 1 - Cité dans Endeavour, D.P. Mc KENZIE 29, 106 J, 1970.
- 2 - A. WEGENER, Die Entstehung der Kontinente und ozeane, Fried Vieweg Bravnschweig 1929.
- 3 - LE PICHON, Cinématique de la tectonique des plaques C.O.B. Brest, contribution n°26 (40 références récentes).
- 4 - E. THELLIER, Nucleus 7, 1966
Encyclopédie de la pléiade La Terre 1959, p.531.
- 5 - J. COULOMB, l'expansion des fonds océaniques et la dérive des continents P.U.F. 1969.
- 6 - E.C. BULLARD, d'après la référence E. THELLIER (4).
- 7 - J.L. LE MOUHEL, Ann. Geophys. 26, 1970, 2.
- 8 - R. HIDE, S.R.C. MALIN, Nature 225, 1970, p.605.
- 9 - L. NEEL, Ann. Geophys, 5, 1949, p.99.
L. NEEL, Phil.Mag. Supl. 4, 1955, p.191.
- 10 - D. BIQUAND, M. PREVOT, C.R., 270 B, 1970, p.362.
M. PREVOT, D. BIQUAND, C.R., 270 B, 1970, p.1365.
- 11 - S.K. RUNCORN, Atomes 273, 1970, p.89-92.
- 12 - L. NEEL, C.R., 270 B, 1970, p.1125.
- 13 - H.H. HESS, Geol. Soc. Am. 1962, p.599.
- 14 - F.J. VINE, D.H. MATTHEWS, Nature 199, 1963, p.947.
- 15 - D.P. Mc KENZIE, Nature 226, 1970, p.239.
- 16 - K.A. De JONG, R. VAN der VOO, Nature 226, 1970, p.933.
- 17 - R.S. DIETZ, J.C. HOLDEN, Scientific American, Octobre 1970.