



HAL
open science

Rapport national sur les travaux français exécutés de 1975 à 1978

Jean Goguel, Jean de Beauregard

► **To cite this version:**

Jean Goguel, Jean de Beauregard. Rapport national sur les travaux français exécutés de 1975 à 1978. Comité national français de géodésie et géophysique. 1979. hal-04787658

HAL Id: hal-04787658

<https://hal.science/hal-04787658v1>

Submitted on 17 Nov 2024

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

COMITÉ NATIONAL FRANÇAIS DE GÉODÉSIE ET GÉOPHYSIQUE

RAPPORT NATIONAL SUR LES TRAVAUX FRANÇAIS EXÉCUTÉS DE 1975 A 1978

Etabli à l'occasion de la XVII^e Assemblée Générale à Canberra
de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale
publié par le Secrétaire Général

Jean de BEAUREGARD

Au Secrétariat Général du Comité Français
39 ter, rue Gay Lussac 75005 PARIS — Téléphone : 354-19-06

RAPPORT NATIONAL
SUR LES TRAVAUX FRANÇAIS
EXÉCUTÉS DE 1975 A 1978

COMITÉ NATIONAL FRANÇAIS DE GÉODÉSIE ET GÉOPHYSIQUE

RAPPORT NATIONAL SUR LES TRAVAUX FRANÇAIS EXÉCUTÉS DE 1975 A 1978

Etabli à l'occasion de la XVII^e Assemblée Générale à Canberra
de l'Union Géodésique et Géophysique Internationale
publié par le Secrétaire Général

Jean de BEAUREGARD

Au Secrétariat Général du Comité Français
39 ter, rue Gay Lussac 75005 PARIS — Téléphone : 354-19-06

COMITE NATIONAL FRANCAIS DE GEODESIE ET GEOPHYSIQUE

Bureaux du Comité et de ses Sections

COMITE NATIONAL

Ancien Président	: G. LACLAVERE	Secrétaire Général : J. de BEAUREGARD
Président	: J. GOGUEL	C.N.F.G.G.
Vice-Présidents	: H. LACOMBE G. WEILL	39 ter, rue Gay-Lussac 75005 Paris
Trésorier	: R. SCHLICH	Tél. : 354.19.06

SECTION DE GEODESIE

Président	: H. DUFOUR	Secrétaire : J. RECHENMANN
Vice-Présidents	: F. BARRIER A. COMOLET-TIRMAN	ORSTOM 24, rue Bayard 75008 Paris
		Tél. : 225.31.52

SECTION DE SEISMOLOGIE ET DE PHYSIQUE DE L'INTERIEUR DE LA TERRE

Président	: P. BERNARD	Secrétaire : J. AUBRAT
Vice-Président	: P. MECHLER	ORSTOM
Secrétaire adjoint	: L. MARTEL	24, rue Bayard 75008 Paris
		Tél. : 225.31.52

SECTION DE VOLCANOLOGIE ET DE CHIMIE DE L'INTERIEUR DE LA TERRE

Président	: P. VINCENT	Secrétaire : N. VATIN-PERIGNON
Vice-Président	: A. ROCHE	Institut Dolomieu Rue Maurice Gignoux 38000 Grenoble
		Tél. : (76) 87.46.43

SECTION DE GEOMAGNETISME ET D'AERONOMIE

Président	: M.L. CHANIN	Secrétaire : J. LAVERGNAT
Vice-Président	: J.L. LE MOUËL	Laboratoire de Géophysique
Secrétaire adjoint	: M. PREVOST	4, avenue de Neptune 94100 Saint-Maur-des-Fosses
		Tél. : 883.69.14

SECTION DE METEOROLOGIE ET DE PHYSIQUE DE L'ATMOSPHERE

Président	: G. SOULAGE	Secrétaire : D. CRUETTE
Vice-Président	: A. VILLEVIEILLE	Physique et Dynamique de l'Atmosphère
		4, Place Jussieu - Tour 15 75230 Paris Cedex 05
		Tél. : 329.12.21

SECTION DES SCIENCES HYDROLOGIQUES

Président : G. CASTANY
Vice-Présidents : J. BERNIER
P. GUILLOT

Secrétaire : M. ROCHE
ORSTOM
19, rue Eugène Carrière
75018 Paris
Tél. : 076.37.89

SECTION DES SCIENCES PHYSIQUES DE L'OCEAN

Président : M. EYRIES
Vice-Présidents : L. DANGEARD
A. IVANOFF

Secrétaire : J. BOURGOIN
SHOM - EPSHOM
Route du Bergot
29283 Brest Cedex
Tél. : (98) 80.80.80

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION.....	9
SECTION I – Géodésie.....	11
SECTION II – Sismologie et physique de l'intérieur de la terre.....	61
SECTION III – Volcanologie et chimie de l'intérieur de la terre.....	111
SECTION IV – Géomagnétisme et aéronomie.....	171
SECTION V – Météorologie et physique de l'atmosphère.....	223
SECTION VI – Sciences hydrologiques.....	279
SECTION VII – Sciences physiques de l'océan.....	311

INTRODUCTION

Conformément à l'usage, ce volume, préparé pour la XVII^{ème} Assemblée de l'UGGI à Canberra, rend compte des travaux français en Géodésie et Géophysique sur la période quadriennale 1975-1978 ; il fait suite au rapport analogue présenté à la XVI^{ème} Assemblée de l'UGGI, à Grenoble en 1975.

75 auteurs, les bureaux des sections et du Comité National Français ont collaboré à la préparation de 66 articles.

Aux 7 Associations de l'UGGI correspondent 7 sections dans le Comité National. Le rapport de chacune des sections a été imprimé en tirages à part qui seront diffusés lors de l'Assemblée de chaque Association.

La bibliographie suit chacun des articles. Un ouvrage collectif est inévitablement hétérogène. Nous souhaitons que le lecteur y trouve l'essentiel de la contribution française en Géodésie et Géophysique à la fin de cette décennie.

Nous remercions vivement les auteurs et les bureaux des sections qui ont participé à l'élaboration de ce rapport quadriennal.

J. GOGUEL
Président du Comité National
Français de Géodésie et Géophysique
J. de BEAUREGARD
Secrétaire Général du Comité

SECTION I
GÉODÉSIE

TABLE DES MATIERES

I – Travaux géodésiques de l’Institut Géographique National M. LOUIS.....	13
II – Carte gravimétrique détaillée de la France M. OGIER.....	17
III – Analyses d’ensemble du réseau géodésique français H.M. DUFOUR.....	20
IV – Méthodes de géodésie Doppler sur satellites ; développements français (1875-79) C. BOUCHER et F. NOUEL.....	23
V – Géoïde européen version 1978 J.J. LEVALLOIS.....	27
VI – Champ de gravité et structures internes A. GUILLAUME.....	29
VII – Etude des marées terrestres J. LECOLAZET.....	32
VIII – Géodynamique B. LAGO et G. BALMINO.....	34
IX – Etudes sur les planètes B. LAGO, A. CAZENAVE, G. BALMINO.....	37
X – Modèle de la haute atmosphère neutre de la Terre entre 200 et 1200 km F. BARLIER.....	41
XI – Résultats sur la haute atmosphère de la Terre déduits des mesures de l’accéléromètre CACTUS F. BARLIER.....	43
XII – Mesure de la pression de radiation par l’accéléromètre CACTUS F. BARLIER.....	45
XIII – Méthode de calcul des éphémérides de satellites en station M. STARON et P. DURRENBERGER.....	47
Compte rendu d’activité d’organismes internationaux	
Activité du Bureau international de l’heure B. GUINOT.....	50
Activité du Bureau gravimétrique international J.J. LEVALLOIS.....	53
Travaux géodésiques au CERN J. GERVAISE.....	54
Bibliographie complémentaire.....	57

I – TRAVAUX GEODESIQUES DE L'INSTITUT GEOGRAPHIQUE NATIONAL

M. LOUIS

Institut Géographique National
2, avenue Pasteur, 94160 SAINT-MANDE

Au cours de la période 1975 – 1978 l'Institut Géographique National (I.G.N.) a poursuivi ses travaux de vocation en géodésie et nivellement sur le territoire métropolitain et outre-mer et a continué, parallèlement, à développer des activités de recherche et études dans les domaines de la géodésie terrestre et de la géodésie spatiale.

I. EQUIPEMENT DE BASE

1. Sur le territoire métropolitain

a) *Réseau planimétrique.* Le réseau de détail a été implanté sur 70 feuilles, soit une surface d'environ 40 000 km², réparties essentiellement dans les régions du nord (Flandre), l'Est (Lorraine et Alsace) et le Sud-Est (Provence et Corse) de la France. Il consiste d'abord en un réseau de triangulation de 2^e ordre (longueur moyenne des côtés 12 km), appuyé sur le 1^{er} ordre. Sur les points de 2^e ordre s'appuie un réseau de détail (3^e – 4^e et 5^e ordre) déterminé soit par triangulation, soit par trilatération, soit par polygonation, en fonction de la topographie du terrain. La densité finale moyenne est alors d'un point tous les 3 km² environ et la précision relative entre 2 points voisins est de l'ordre de quelques centimètres.

b) *Réseau de nivellement.* Il comporte :

- un réseau de 1^{er} ordre réobservé entre 1962 et 1969 et recompensé ;
- un réseau de 2^e et 3^e ordre en cours de reprise après 1969 ; de 1975 à 1978 la production est d'environ 8 600 km ;
- un réseau de 4^e ordre implanté dans les mêmes zones que le réseau planimétrique de détail et dont la production a atteint 10 500 km pour la période considérée.

2. Dans les départements et territoires d'outre-mer.

En *Guyane* une polygonale de 1^{er} ordre a été implantée entre Kourou et la frontière du Surinam dans la zone côtière. Un nivellement de précision de 1^{er} ordre a été observé le long de la route principale entre Cayenne et la frontière du Surinam. L'origine de ce nivellement est le niveau moyen de la mer à Cayenne.

En *Nouvelle-Calédonie* l'implantation du réseau planimétrique de détail (triangulation) s'est poursuivie et a concerné une zone d'environ 850 km² dans le Sud-Est de l'île.

3. Dans d'autres pays

Il s'agit essentiellement de cheminements de nivellement de précision au *Mali* et au *Niger* pour le compte des administrations de ces pays. Enfin un réseau géodésique de base a été entrepris en *Libye* pour le compte du Survey Department of Libya. Ce réseau est constitué par 45 points fondamentaux répartis sur l'ensemble du territoire; leurs coordonnées

ont été déterminées à partir d'observations Doppler traitées par la méthode des arcs courts. Un réseau de polygonation de 3 600 km relie un certain nombre de ces points entre eux.

II. ETUDES ET RECHERCHES

1. Mouvements récents de l'écorce terrestre en France

a) Un nivellement de précision a été repris dans le Massif Central sur un itinéraire traversé par une faille. La comparaison avec les mesures précédentes (1972) semble n'indiquer aucun déplacement notable.

b) Des travaux de comparaison entre les nivellements de 1^{er} ordre ancien (époque 1884 – 1892) et récent (1962 – 1969) ont été entrepris en collaboration avec le Bureau de Recherches Géologiques et Minières. Les études sur les dénivelées brutes entre repères communs aux deux nivellements sont fort longues, mais les premiers résultats semblent très prometteurs. La mise sur support informatique de l'ensemble des données brutes du nivellement faciliterait les travaux dans ce domaine.

2. Mouvements récents dans la République de Djibouti

Dans le précédent rapport quadriennal (Rapport de Grenoble pages 1 – 4 et 1 – 5) l'Institut Géographique a rendu compte d'une mission suscitée par H. TAZIEFF et exécutée en 1973, dans une zone instable de l'*Afrique* : il s'agit du fond du golfe d'Aden, plus précisément de la dépression jalonnée par le lac *Assal*, le *Ghoubbet el Kharab*, et le *Golfe de Tadjoura*. Un réseau planimétrique de 22 points et un réseau de nivellement avaient été mesurés.

En novembre 1978, une activité géophysique importante (avec apparition d'un volcan fissural entre le lac Assal et la baie de Ghoubbet el Kharab) s'est manifestée dans la région, provoquant des déplacements verticaux et horizontaux de l'ordre du mètre. Une mission de l'I.G.N. (M. KASSER) a permis de chiffrer ces modifications importantes de la croûte, qui sont dans le sens prévu par les théories sur l'expansion des fonds océaniques : séparation progressive de l'*Asie* et de l'*Afrique*, élargissement de la mer Rouge.

3. Etude sur la qualité du réseau géodésique français

HM DUFOUR a entrepris une étude sur la valeur du réseau de géodésie de premier ordre, tel qu'il est actuellement publié, en le comparant au réseau que l'on obtient avec les mêmes observations mais en effectuant une compensation simultanée de toutes ces données.

Il est certain que si le réseau publié actuel est suffisant pour appuyer tous les travaux cartographiques même à grande échelle, ce réseau doit être amélioré pour des travaux plus précis et la compensation simultanée des observations existantes est déjà une première étape pour cette amélioration. Pour l'avenir la mesure de certaines longueurs et la réorientation de certains côtés sont envisagés.

4. Participation au RETRIG (réseau européen)

L'Institut Géographique National français a transmis au centre de calcul du réseau, les observations d'azimuts de Laplace et distances de France. Les premières compensations RETRIG ont permis des comparaisons fructueuses avec une compensation nationale.

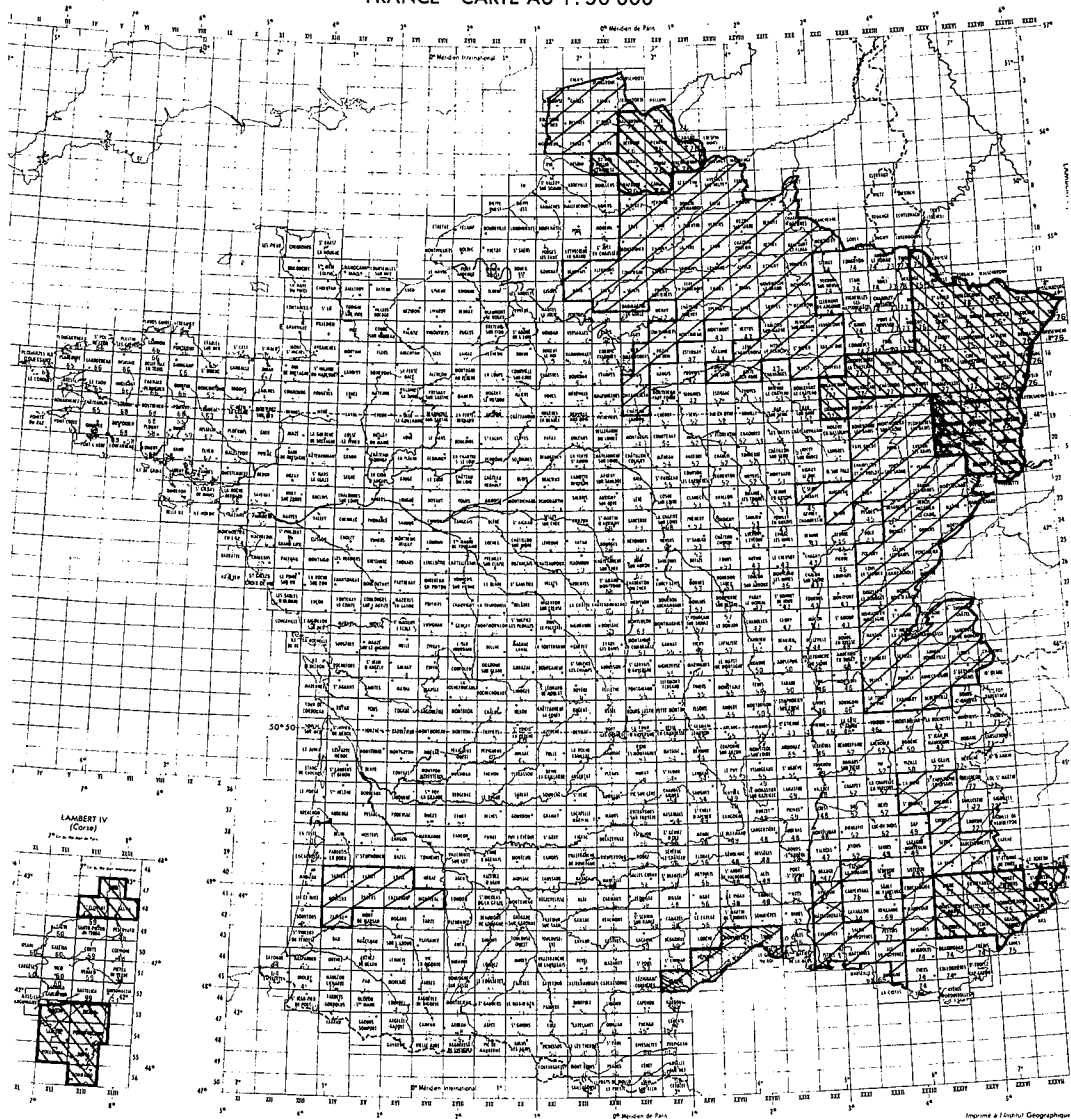
5. Géodésie Doppler

(Se reporter à l'article de C. Boucher)

6. Travaux sur la géoïde

(Se reporter à l'article de J.J. Levallois)

FRANCE - CARTE AU 1: 50 000



TRAVAUX de GEODESIE
Equipement jusqu'au 4^e Ordre Inclus

- Etat d'avancement au 1.1.75
- Travaux exécutés du 1.1.75 au 1.1.79
- Travaux restant à exécuter au 1.1.79

BIBLIOGRAPHIE

- ALINHAC G. (1977). – La cartographie topographique dans les territoires français du Pacifique. *Bull. d'Inf. de l'IGN*, n° 34 (p. 56 à 62).
- BOUCHER C. (1977). – C.R. de la XVI^e A.G. de l'UGGI (Grenoble). Paramètres géodésiques fondamentaux. *Bull. d'Inf. de l'IGN*, n° 33 (p. 8)
- BOUCHER C. (1977). – Nomenclature des informations géodésiques (planimétriques, altimétriques et géoidales) relatives à la FRANCE-NOTE IT/G4 (Avril 1977)
- BOUCHER C. (1977). – C.R. du symposium de Las CRUCES : Satellite Doppler Positioning. *Bull. d'Inf. de l'IGN*, n° 33 (p. 45 à 47)
- CHABBERT C. – Entretien des réseaux de Géodésie et Nivellement. Note IGN, n° 26724.
- CORMIER P. EL HACHEM L. & TORBEY M. (1975) – Remise en ordre et calcul du réseau de Nivellement du Liban. *Bull. d'Inf. de l'IGN*, n° 29 (p. 13 à 17).
- DECAE A. (1976). – Note sommaire sur les cheminements inertiels. *Bull. d'Inf. de l'IGN*, n° 32 (p. 31 et 32).
- DECAE A. (1977). – 3 notes techniques : Pression de radiation. Problème des 2 corps. Notions sur les fusées. *Bull. d'Inf.*, n° 33 (p. 37 à 44).
- DUFOUR H.M. (1976). – C.R. sur le Symposium de Weimar (Oct. 76). IGN n° 26729.
- DUFOUR H.M. (1976). – Formule de Whittaker pour le calcul du potentiel terrestre. Weimar Oct. 1976, IGN n° 26729.
- DUFOUR H.M. (1976). – Formule de Whittaker pour le calcul du potentiel terrestre. Weimar Oct. 1976, IGN n° 26730.
- DUFOUR M.M. (1977). – Fonctions orthogonales dans la sphère. Résolution théorique du problème du potentiel terrestre. Note IGN n° 26735, *B.G. 51*, n° 3.
- FONTAINE A. (1976). – Géodésie Spatiale Optique. Campagne EURAFRIQUE. Rapport sur les méthodes de traitement. IGN n° 26728.
- GUICHARD H. (1975). – Séminaire de Géodésie par satellite à Sao José Dos Campos (Brésil) *Bull. d'Inf. de l'IGN*, n° 28 (p. 41 à 43).
- GUICHARD H. (1976). – Interprétation des observations géodésiques et application au cas de la mission IGN en Equateur. *Bull. d'Inf. de l'IGN*, n° 30 (p. 25 à 27).
- GUICHARD H. (1976). – Réalisation d'une nouvelle chaîne géodésique de premier ordre sur le versant oriental des Andes Equatoriennes – Travaux annexes. *Bull. d'Inf. de l'IGN*, n° 31 (p. 21 à 37).
- INSTITUT GEOGRAPHIQUE NATIONAL. – *Bulletins d'Information* (A. DECAE) n° 28 à 34.
- INSTITUT GEOGRAPHIQUE NATIONAL. – Compte rendu annuel des travaux géodésiques : 1975 (J. MAILLARD), 1976-77-78 (M. LOUIS)
- LOUIS M. (1975). – Symposium international EDM et réfraction angulaire ; Stockholm, Août 1974. *Bull. d'Inf. de l'IGN*, n° 28 (p. 44 et 45)
- MONGE H. (1977). – Formules de passage et exemple de calcul pour "Transformation des coordonnées Laborde en UTM pour Madagascar" (Note 26727 – reprise d'une note de 1968).
- NINEY A. (1977). – Mouvement relatif du littoral français et du niveau moyen de la Mer Méditerranée – IGN n° 26723.

II – CARTE GRAVIMETRIQUE DETAILLEE DE LA FRANCE (1975-1978)

M. OGIER

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM)
BP 6009 45018 ORLEANS CEDEX

RESEAUX DE BASE

Le BRGM procède, en liaison avec J.J. Levallois (Bureau Gravimétrique International) à la compensation générale des réseaux gravimétriques français. Le réseau de 1^{er} ordre (environ 120 stations) est actuellement calculé. Les résultats obtenus pourront être utilisés provisoirement jusqu'à l'établissement d'un nouveau réseau de 1^{er} ordre compatible avec la précision des appareils modernes.

A la suite, une campagne de rattachement du réseau français aux réseaux voisins (belge, allemand, suisse et italien) a été réalisée en 1978. Les raccords sont assurés au centième de milligal.

Le réseau de 2^e ordre comportera environ 2000 stations. Il a été partiellement complété en Aquitaine et dans le Massif Central.

Les résultats seront fournis dans 3 systèmes :

- Carte gravimétrique de France (BRGM 75), dans le système de la base Paris-Toulouse ;
- Système IGSN 1971 ;
- Système absolu international (Paris – Bruxelles – Turin – Wiesbaden).

CARTOGRAPHIE SYSTEMATIQUE

De 1975 à 1978, on a poursuivi les levés détaillés en zones de socle affleurant, en appui à la prospection minière stratégique. Ces levés sont effectués avec une densité de stations de l'ordre de 1 point/km², et les résultats sont publiés sous forme de coupures régulières à 1/80 000.

Durant ces 4 années, 14 coupures ont été levées ou complétées : Aix, Limoges, Marseille, Figeac, Lyon, Le Buis, Privas, Cahors, Gourdon, Albi, Tulle, Mende, Brive, Rodez, dont 9 ont été publiées.

En outre, 1975 a vu la publication de la carte gravimétrique de la France au millionième, feuille sud, préparée en 1973-1974 et publiée pour le congrès de l'U.G.G.I. à Grenoble.

Pendant la période considérée, le B.R.G.M. a réalisé pour le compte de la carte gravimétrique 12.650 mesures, essentiellement dans le Sud et l'Ouest du Massif Central, et accessoirement dans la région Rhône – Alpes – Provence.

A tous ces travaux de levés sont venus s'ajouter l'homogénéisation et l'intégration des levés non effectués par le B.R.G.M., et qui ont été convertis dans le système de la carte gravimétrique de la France.

CARTE GRAVIMÉTRIQUE DE LA FRANCE
 ETAT D'AVANCEMENT

I-8

DENSITE DES MESURES :

-  Levé très détaillé
-  3-8 km² par Station
-  1-2 km² par Station
-  env. 15 km² par Station

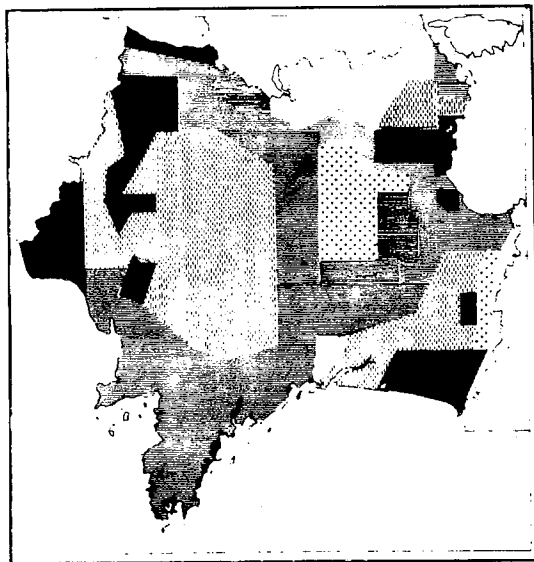


Carte éditée

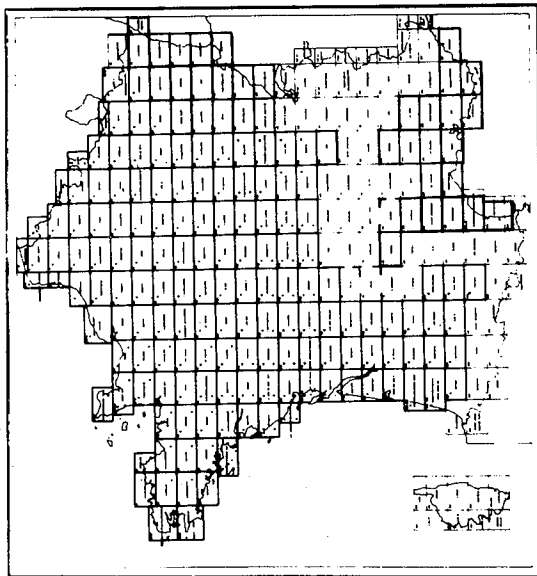


Carte en préparation

LEVES



1/80.000



Les documents suivants ont été publiés au cours de la période 1975-1978 :

- cartes à 1/1.000.000 : Moitié Sud de la France
- Cartes à 1.80.000 : Limoges, Séverac le Château, Orange, Aix-en-Provence, Figeac, Marseille, Lyon, Le Buis les Baronnies, Privas.
- minutes à 1.80.000* : Brive, Tulle, Mende, Albi, Gourdon, Cahors, Rodez.

La figure ci-jointe donne l'état d'avancement de la carte gravimétrique de la France.

Simultanément, le B.R.G.M. développait son software d'interprétation gravimétrie – magnétisme, et mettait au point des programmes de conversion isobathe, de corrélation gravimétrie – magnétisme et de calcul des densités superficielles.

BIBLIOGRAPHIE

- AUTRAN A., GERARD A., WEBER Ch. (1976). – La carte gravimétrique de la France. Exemple d'utilisation géologique. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1976 (7), XVII n° 5, p. 1119-1132.
- DEBEGLIA N., GERARD A. (1975). – Automatic three dimensional modeling for the interpretation of gravity or magnetic anomalies. *Geophysics*, Vol. 40, n° 6, p. 1014-1034.
- PUVILLAND P. – Reconnaissance stratégique par gravimétrie dans la région de Limoges. *Dipl. Ing. Géophysicien*. IPG Strasbourg.
- BAYER M. (1977). – Etude gravimétrique de la Corse. *Thèse de 3^e Cycle*. USTL Montpellier.
- BAYER M., LESQUER A. (1977). – Etude gravimétrique de la Corse. *Bull. B.R.G.M.*, 1977, II, 1, 1-12 (carte).
- BAYER M., BAYER R., LESQUER A. (1976). – Quelques remarques sur la structure géologique de la Corse d'après la gravimétrie et le magnétisme. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), XVIII, p. 1189-1194.
- LESQUER A. (1975). – Les anomalies gravimétriques du Nord de la Corse. *Compte-rendu Acad. Sci.*, Paris 28°, p. 2297-2300.
- MALZAC. – Gravimétrie Ariège.
- CORON S., FEUILLARD M., LUBART J. (1975). – Etude gravimétrique en Guadeloupe et dans les îles de son archipel ; Petites Antilles. *Ann. Géophys.*, Vol. 31, n° 4, p. 531-548.

* disponibles sur demande au B.R.G.M. – Département Géophysique

III. ANALYSES D'ENSEMBLE DU RESEAU GEODESIQUE FRANCAIS

H.M. DUFOUR

Institut Géographique National 2, avenue Pasteur, 94160 Saint-Mandé

Le réseau français de 1^{er} ordre comporte environ 800 points pour lesquels les observations se sont échelonnées sur 90 ans (1870-1959).

Les compensations successives ont porté d'abord sur des chaînes (méridienne de FRANCE 1927 → France Nord Ouest 1948) puis sur des triangulations de surface de plus en plus étendues (Pyrénées 1948 – Bretagne 1959) au fur et à mesure que les moyens de calculs de l'Institut se sont développés.

Pour des raisons d'ordre pratique, chaque compensation a été réalisée sans retoucher (en général) les coordonnées des compensations précédentes et par la suite les triangulations de détail (2^e, 3^e, 4^e et 5^e ordres) ont été calculées sans modifier (sauf exception) les coordonnées de premier ordre.

Dans la compensation d'ensemble dite EUROPE 50 seules les chaînes françaises ont été introduites dans le calcul général, et les surfaces de 1^{er} ordre complémentaire ont été insérées après coup. Au moment de la mise en route de RETRIG* (Munich 1956), la France a décidé de lui intégrer toutes les observations françaises de 1^{er} ordre. Cette décision permet d'espérer que le réseau français constituera, au moins du point de vue des angles, une contribution solide dans le réseau européen.

Avant l'introduction des observations françaises, d'abord dans RETRIG I (sans bases ni azimuts), en 1974, puis dans RETRIG II 1977 (avec bases et azimuts) (avril 1977), il a été nécessaire de réaliser des compensations isolées du bloc français et les résultats obtenus ont permis de se rendre compte de la valeur du réseau actuel.

I. METHODES DE TRAVAIL

Des méthodes de calcul appropriées ont été mises en œuvre pour faire les comparaisons de divers réseaux.

1. Définition de coordonnées comparables en projection

Toutes les coordonnées nationales ont été transformées en Lambert II. Les coordonnées européennes ont été transformées dans une projection Lambert spéciale dite EUROLAMBERT, qui est en fait une projection Lambert II calculée sur l'ellipsoïde international.

2. Formules de passage

On peut se borner à des polynômes de 1^{er}, 2^e ou 3^e degré établis sur les points communs aux 2 systèmes à comparer.

* Nouveau calcul global des réseaux européens

L'expérience montre qu'on explicite mal par cette méthode des résidus inférieurs au mètre. Une approche plus fine est réalisée par l'usage de fonctions régionalisées :

On a utilisé des fonctions "translatées" du type :

$$f(xy) = R(x) \times R(y)$$

La fonction $R(x)$ étant à support borné, continue et à dérivée continue = elle est en fait formée par des arcs de parabole raccordant en contact (DUFOUR 1977 a).

D'autres approches ont été réalisées par des cubiques spline (raccordant en contact et courbures) :

$$f(xy) = \text{Spline}(x) \times \text{Spline}(y)$$

(MASSON D'AUTUME 1976)

3. Analyse détaillée des écarts entre les 2 systèmes

Les écarts : $\Delta X = X_2 - X_1$; $\Delta Y = Y_2 - Y_1$ entre deux systèmes à comparer peuvent être cartographiés directement, après numérisation, mais il est plus suggestif de faire apparaître des coefficients significatifs liant les dérivées premières :

$$H = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial (\Delta X)}{\partial x} + \frac{\partial (\Delta Y)}{\partial y} \right] = \text{correction d'échelle}$$

$$G = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial (\Delta X)}{\partial y} - \frac{\partial (\Delta Y)}{\partial x} \right] = \text{correction d'orientation}$$

$$P = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial (\Delta X)}{\partial x} - \frac{\partial (\Delta Y)}{\partial y} \right] = \text{déformation métrique}$$

$$Q = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial (\Delta X)}{\partial y} + \frac{\partial (\Delta Y)}{\partial x} \right] = \text{déformation angulaire}$$

Les graphes de ces coefficients permettent de visualiser dans les résultats 4 types de déformation continue, dont deux (HG) correspondent à une représentation conforme, les deux autres (PQ) à une déformation pure.

II - QUELQUES RESULTATS

Les coordonnées NT Nouvelle triangulation, actuellement éditées pour les besoins civils, ont été comparées aux coordonnées d'une compensation globale de 1974 (dite FRABAS), incluant 845 points et 5087 observations (dont 11 azimuts de Laplace et 15 longueurs de bases).

Cette comparaison met en évidence les coefficients globaux suivants (calculés d'après une formule du 1^{er} degré) : Unités 10^{-6} ou microradians

$$\begin{array}{ll} H = -0,15 & P = -0,81 \\ G = 1,94 & Q = 0,07 \end{array}$$

Ces chiffres montrent que le réseau NT, par comparaison avec un réseau calculé globalement (FRABAS) a une précision d'ensemble assez remarquable. Notamment le coefficient H indique que la méridienne de France, calculée en 1927, et non retouchée depuis, se trouve à une échelle excellente. La correction d'orientation est plus importante, tout en restant acceptable [$2 \cdot 10^{-6}$].

Mais on doit ajouter que les programmes d'analyse par fonctions régionalisées ont par contre mis en évidence des écarts localisés importants, dus probablement au fait que des réseaux régionaux, triangulés et calculés récemment, ont été insérés dans un cadre rigide non remis en cause.

Des coefficients extrêmes (atteignant $15 \cdot 10^{-6}$) existent notamment dans le Pas de Calais, l'Aisne, la Lorraine, la Vendée, les Pyrénées Centrales. . .

Une autre comparaison permet de se faire une opinion sur le réseau FRABAS. La formule du 1^{er} degré qui le relie au système RETRIG II 1977 permet de conclure (avec des résidus inférieurs à 0 m, 50) aux coefficients généraux suivants :

$$\begin{aligned} H &= 0,56 & P &= 0,21 \\ G &= 2,24 & Q &= -0,07 \end{aligned}$$

L'incorporation du réseau FRABAS (avec bases et azimuts) dans le réseau européen doit se faire sans difficultés particulières : on doit toutefois s'attendre à une rotation de $2,24 \cdot 10^{-6} \cong 0'',5$ positive (dans le sens des gisements) RETRIG [1977]. La correction totale d'orientation du réseau français (NT) sera de l'ordre de $1'' (1,91 + 2,24 = 4,15 \cdot 10^{-6})$.

BIBLIOGRAPHIE

- DUFOUR H.M. (1975). – Exemple de calcul géodésique – Analyse de structure des résultats. IGN/SGN n° 26771, déc. 1975.
- DUFOUR H.M. (1976). – Première analyse du réseau géodésique français – Abaques annexes. IGN/SGN n° 26722 A et B.
- DUFOUR H.M. (1977 a). – Représentation d'une fonction par une somme de fonctions translitées. *Bulletin d'Information de l'IGN*, n° 33 [GRENOBLE UGGI, 1975 ; IGN/SGN n° 26760].
- DUFOUR H.M. (1977 b). – Problèmes posés par l'évolution moderne des méthodes en Géodésie. *Bulletin d'information de l'IGN*, n° 34.
- MASSON D'AUTUME G. (1976) – L'interpolation par une règle flexible et ses applications en photographie numérique Helsinki 1976 (XIII^e Congrès de Photogrammétrie).
- MONGE H. (1977) – Etat récapitulatif des systèmes géodésiques en France. NT/G n° 1, Mars 1977.
- RETRIG (1977). – Bruxelles Mars 1977. Publication n° 12 de la Sous-Commission du RETRIG (F. KOBOLD) (avec un rapport français inclus).

IV. METHODES DE GEODESIE DOPPLER SUR SATELLITES DEVELOPPEMENTS FRANCAIS : 1975-1979

C. BOUCHER

Institut Géographique National
2, avenue Pasteur 94160 — SAINT-MANDÉ

F. NOUEL

Groupe de Recherches Géodésiques et Spatiales ;
18, avenue E. Belin 31055 — TOULOUSE

L'observation par un récepteur à la surface terrestre des variations de la fréquence reçue d'une onde radio-électrique émise par un satellite (effet Doppler) lors de son passage au-dessus de la station offre une mesure dont l'exploitation s'est avérée très fructueuse, particulièrement pour le positionnement (navigation, géodésie tridimensionnelle) ou la géodynamique (mouvement du pôle).

Depuis sa création en 1958, cette méthode s'est considérablement développée. La qualité des résultats qu'elle offre en fait la première méthode opérationnelle de géodésie spatiale pour le positionnement. Deux facteurs sont principalement à l'origine de ce fait :

- existence d'un système de plusieurs satellites (5 actuellement) permettant la mesure Doppler. Ce système (TRANSIT) est entretenu en permanence depuis 1964 par l'U.S. Navy. L'utilisateur civil de tout pays peut, s'il a la technologie adéquate, s'en servir sans aucune redevance ;
- développement de récepteurs portables de haute performance, permettant de faire des observations en tout lieu et à tout instant.

L'utilisation en France de ces techniques est en permanente augmentation, que ce soit en navigation ou en géodésie.

Le groupe de Recherches de Géodésie Spatiale (G.R.G.S.), organisme de coordination des études et développements dans le domaine de la géodésie spatiale entre le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), l'Institut Géographique National (I.G.N.), l'Observatoire de Paris et le Bureau des Longitudes, a favorisé considérablement cet effort.

Dans la période 1975-1979, deux équipes se sont progressivement spécialisées : les applications géodynamiques globales sont étudiées dans le cadre de l'expérience MEDOC (mouvement du pôle), gérée par le CNES/G.R.G.S. et le B.I.H., tandis que les applications de géodésie géométrique (positionnement et réseaux géodésiques) sont développées à l'I.G.N.

Ce rapport présente les résultats obtenus dans le second domaine, le premier faisant l'objet d'un rapport distinct [21].

1. ETUDES THEORIQUES

Diverses études sur le modèle mathématique ont été réalisées [22, 26]. Un panorama général peut être trouvé dans [15] et surtout dans [27]. L'analyse de la mesure Doppler sur satellite dans le cadre de la Relativité Générale est exposée dans [10].

La conclusion générale est que l'ordre de grandeur des systématismes (éphémérides, réfraction, . . .) est au moins égal à celui du bruit de la mesure Doppler effectuée par les récepteurs les plus performants.

2. METHODES DE TRAITEMENT ET LOGICIELS

En excluant les méthodes dynamiques, les méthodes utilisées pour le positionnement géodésique par mesures Doppler sur satellites sont :

A) Traitement par point isolé (PI), utilisant des orbites calculées préliminairement (méthode semi-dynamique), à savoir :

- Ephémérides Opérationnelles (EO) radiodiffusées par les satellites TRANSIT [8] ;
- Ephémérides Précises (EP), calculées par le Defense Mapping Agency Hydrographic Topographic Center (DMAHTC).

B) Traitement par arcs courts (AC).

Divers logiciels sont disponibles en France :

- le G.R.G.S./CNES utilise le programme SIPO qui est du type PI ;
- l'I.G.N. a développé des logiciels mixtes PI-AC, GDOP [11], puis GDP [13], et un logiciel PI intitulé GDI [17].

Des propositions pour une description normalisée des programmes de traitement des mesures Doppler sur satellites ont été diffusées [25].

La précision obtenue a été établie par de nombreuses expériences à 3 m pour un traitement PI/EO et à 1 m pour un traitement PI/EP ou AC.

3. MATERIEL

Le matériel généralement utilisé est le récepteur JMR-1. Certains essais ont été faits sur un récepteur de navigation SYLOSAT-C de la CSEE [7].

4. CAMPAGNES D'OBSERVATION

De nombreuses campagnes d'observation ont été effectuées pendant la période 1975-1979. Une liste provisoire figure dans [12].

Campagne JMR-France (1975)

Le tableau ci-joint donne un panorama des travaux effectués.

En dehors des missions d'établissement de réseaux effectuées par l'I.G.N., deux campagnes sont particulièrement à souligner :

- la campagne LESARD, établissant un réseau à grandes mailles entre l'Europe, l'Afrique et l'Amérique du Sud, observée et traitée simultanément par le G.R.G.S./CNES, l'I.G.N. et l'Instituto Geografico Nacional Espagnol ;
- la 2^e campagne européenne d'observation Doppler (EDOC-2), vaste réseau européen de 37 stations établi coopérativement sous l'égide du Groupe de Travail de Géodynamique du Conseil de l'Europe, à la suite des résultats satisfaisants de la première campagne EDOC-1 [2, 3].

5. RESULTATS

Si les travaux précédents ont bien établi l'ordre de grandeur de la précision de position qu'on peut atteindre par les diverses méthodes de traitement, tel qu'il a été donné au paragraphe 2, l'analyse fine au niveau submétrique reste délicate et doit donc faire concentrer les efforts d'étude.

En particulier, l'influence du logiciel de traitement sur un lot de données est non négligeable, comme l'ont montré des calculs comparatifs [14, 17, 23]. Les résultats des trois Centres de calcul officiels de la campagne EDOC-2 (IGN), Observatoire Royal de Belgique et Institut für Angewandte Geodäsie) sont concluants en ce domaine [17].

En fait, la précision au moins métrique du positionnement Doppler a nécessité l'étude des systèmes de référence géodésiques spatiaux et terrestres, de leur comparaison, et de la combinaison des données terrestres et spatiales pour l'établissement de réseaux tridimensionnels [15, 16, 18].

En conclusion, les informations précédentes montrent l'apport non négligeable des travaux français dans le domaine de la géodésie sur satellite Doppler [1, 12, 15, 19, 20, 24].

N°	Nom	Organisme demandeur	Travaux de terrain	Travaux de calcul	Situation géographique	Date	N	Objectifs	Références
1	JMR-France	I.G.N.	I.G.N.	I.G.N.	France	1975	6	Test	(9, 11)
2	Algérie	I.N.C.	I.G.N.	I.G.N.	Algérie	1975	25	Réseau géodésique	
3	Lesard	CNES	I.G.N. G.R.G.S. I.G.N.E.	IGN GRGS IGNE	Europe Afrique Amérique Sud	1976	9	Positionnement sites ARIANE Liaisons intercontinentales	(4, 5, 6, 23)
4	Guyane	I.G.N.	I.G.N.	I.G.N.	Guyane F	1976	36	Cartographie	
6	EDOC-2	Conseil de l'Europe	Coopératif Européen	IGN ORB IFAG	Europe	1977	37	Réseau scientifique	(13, 14, 17)
7	Libye	S.D.L.	I.G.N.	I.G.N.	Libye	1976-1978	4	Réseau géodésique	
5	Gabon	I.G.N.	I.G.N.	I.G.N.	Gabon			Cartographie	
9	Edoref I	I.G.N.	I.G.N.	I.G.N.	France	1978	9	Recompensation du réseau français	
8	Jordanie		I.G.N.	I.G.N.	Jordanie	1978	14	Réseau géodésique	

v N = Nombre de stations.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] NOUEL F., KOVALEVSKY J. (1975) - Traitement des mesures et des résultats de Géodésie Spatiale par récepteur Doppler. *Prés. à Symp. on New Methods in Space Geodesy*, Leningrad.
- [2] NOUEL F. (1975). - Campagne EDOC. Rapport présenté aux 27^{èmes} Journées Luxembourgeoises de Géodynamique. Luxembourg (1975). *Rapport G.R.G.S.*
- [3] PIUZZI A., NOUEL F. (1976). - EDOC campaign - Complementary results. *Prés. aux 29^{èmes} Journées Luxembourgeoises de Géodynamique*, Luxembourg *Rapport G.R.G.S.*
- [4] CHARPENTIER R., PIUZZI A. (1976). - Campagne LESARD. Localisation des sites Ariane. *Rapport G.R.G.S.*
- [5] PIUZZI A., CHARPENTIER R. (1977). - Campagne LESARD. *Rapport G.R.G.S.*
- [6] PERRET A. (1977). - Géodésie Doppler. Campagne LESARD. *Rapport de stage G.R.G.S. I.G.N.*
- [7] PERRET (M.C. (1977). - Géodésie Doppler - Etude d'un récepteur. *Rapport de stage G.R.G.S. I.G.N.*
- [8] BOUCHER C. (1977). - Le système TRANSIT. - *I.G.N./S.G.N.M., NT/G, n° 2.*
- [9] BOUCHER C. (1978). Mission Doppler JMR-France (1975). *I.G.N./S.G.N.M., NT/G, n° 7.*
- [10] BOUCHER C. (1978). - Relativistic correction to satellite Doppler observation. Présenté à *Meeting of I.A.G.-S.S.G., 4 : 45. The Mathematical Structure of Gravity Field*, Lagonissi.
- [11] BOUCHER C. (1976). - Methodology and field tests of GDOP, a geodetic computation package for the short arc adjustment of satellite Doppler observations. Présenté à *International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning*, Las Cruces.
- [12] BOUCHER C. (1977). - La géodésie par satellites Doppler à l'I.G.N., France - Etat des travaux en 1977. Présenté au 15^{ème} Congrès FIG, Commission 5, Stockholm (1977). Publié aussi dans *Géomètre*, 8-9, pp. 37-39 (1977).

- [13] FONTAINE A. (1978). – Géodésie Spatiale Doppler. Campagne France 1975. Rapport sur les calculs 1977. Présenté au 2nd Symposium on the Use of Artificial Satellites for Geodesy and Geodynamics, Athènes. *I.G.N./S.G.N.M., NT/G*, n° 6 (1978).
- [14] WILSON P., BOUCHER C., PAQUET P. et al. (1978). – EDOC-2 – Status report with a summary of some preliminary results of second European Doppler observation campaign. Présenté au 2nd Symposium on the Use of Artificial Satellites for Geodesy and Geodynamics, Athènes.
- [15] BOUCHER C. (1978). – Activities of I.G.N. in the field of Doppler Satellite Geodesy. Présenté à Meeting on Satellite Doppler Tracking and Geodetic Applications. The Royal Society, London.
- [16] BOUCHER C. (1979). – Investigations on geodetic applications of satellite Doppler observations for control networks. To be presented at 2nd International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Austin, U.S.A.
- [17] BOUCHER C., PAQUET P., WILSON P. (1979). – The Second European Doppler Observation Campaign (EDOC-2) – Results and conclusions obtained by EDOC-2 computing Centers. To be presented at 2nd International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, Austin, U.S.A.
- [18] BOUCHER C. (1979). – Les transformations géométriques entre systèmes géodésiques. *I.G.N./S.G.N.M. RT/G*, n° 3.
- [19] I.G.N./S.G.N.M. (1978). – Rapport détaillé sur l'expérience acquise dans les méthodes géodésiques par procédé Doppler. *I.G.N./S.G.N.M.*, Paris.
- [20] BOUCHER C. (1977). – Géodésie terrestre et géodésie spatiale. Etude d'une méthode nouvelle : la géodésie Doppler par satellite. *I.G.N./S.G.N.M., CC/G*, n° 1.
- [21] NOUEL F. – Détermination du mouvement du pôle par trajectographie doppler. Expérience MEDOC. *Compte rendu 1975-1979 pour la Section I du CNFGG*.
- [22] BOUCHER C. (1978). – The Doppler satellite observation equation – Investigations on specific points. *I.G.N./S.G.N.M./DEC. Technical Note GDS/TN/1*.
- [23] PIUZZI A., PERRET A., PINTO G., NOUEL F., BOUCHER C. – La campagne LESARD. *Rapport G.R.G.S./I.G.N.* (à paraître 1978-1979)
- [24] BOUCHER C. (1976). – Positionnement géodésique par satellite Doppler. Présenté à 3^{ème} Conférence Cartographique Régionale de l'ONU, Djakarta.
- [25] BOUCHER C. (1978). – Standardization of description of satellite Doppler data processing programs. *I.G.N./S.G.N.M./DEC. Technical Note GDS/TN/2*.
- [26] DUFOUR H.M. (1975). – Note au sujet de l'article "Satellite Doppler solutions in terms of a single parameter" de M.K. PAUL. *Bull. Géod.* n° 116, pp. 143-148.
- [27] BOUCHER C. (1979) – Les mesures Doppler sur satellites. Modèle physique du système à chemin simple descendant. *I.G.N./S.G.N.M., RT/G* n° 1.

V – GEOÏDE EUROPEEN VERSION 1978

JJ. LEVALLOIS
140, rue de GRENELLE
75007 – PARIS

Les Ingénieurs Géographes J.J. Levallois et H. Monge ont effectué un nouveau calcul du Géoïde Européen dit version 1978, présenté au symposium d'Ancône (Sept. 1978). Il repose sur les valeurs publiées par l'A.I.G. en 1971 (Liste des Stations de déviation de la verticale rattachées au Réseau Européen – A.I.G. Liste 4) et de nouvelles valeurs obtenues dans différents pays Européens, qui leur ont été communiquées soit directement, soit par G. Birardi, Président du S.S.G., N° 5, 50.

Ce Géoïde se distingue essentiellement de la version 1975 :

- par l'introduction des nouvelles valeurs hispano-portugaises qui changent de près de 10 m les valeurs dans l'Ouest de la péninsule Ibérique ;
- par l'introduction des nouvelles valeurs et liaisons Italiennes, (Pantelleria, Sardaigne, etc) ;
- par l'incorporation d'une portion du territoire de l'U.R.S.S. obtenue en raccordant le géoïde gravimétrique de Molodensky (1942) aux avancées du géoïde de l'Europe Occidentale sur le 30^e méridien et en Iran ;
- par l'adaptation des résultats de Bomford pour l'Arabie Séoudite et l'Inde (en liaison avec l'Iran), de ceux d'I. Fischer pour l'Afrique (32^{ème} méridien) ainsi que des données disponibles pour le 12^{ème} parallèle Africain (du Soudan à Dakar). Sauf sur la mer du Nord et aux confins Iran, U.R.S.S., on n'a pas fait l'interpolation par le géoïde gravimétrique.

Dans une deuxième phase du calcul on a obtenu les valeurs suivantes des coordonnées du centre des masses terrestres et du demi grand axe d'un ellipsoïde terrestre adapté au Système Europe 50, par comparaison au modèle Grim II :

$$\begin{aligned}dx &= 65^m \\dy &= 114^m \\dz &= 130^m \\a &= 6378134^m (\pm 7^m)\end{aligned}$$

La précision des altitudes est difficile à évaluer ; dans certaines régions, de grosses discordances existent par rapport aux résultats obtenus antérieurement avec les mêmes matériaux par I. Fischer (Bulletin géodésique n° 88) et des incertitudes de l'ordre de un ou deux décimètres peuvent subsister, vers l'Afrique du Sud, vers Dakar, en U.R.S.S. et aux confins Iraniens ; l'écart moyen quadratique d'une différence altitude Grim II – altitude Européenne après ajustement est de l'ordre de ± 10 m. Il reste donc encore beaucoup à faire.

BIBLIOGRAPHIE

LEVALLOIS J.J. et MONGE H. (1975). – Le géoïde européen, version 1975. UGGI Grenoble.

LEVALLOIS J.J. (1975). – Construction du géoïde par utilisation du gradient de la pesanteur. UGGI. Grenoble.

LEVALLOIS et MONGE H. (1978). – Le géoïde européen, version 1978. ANCONE – Sept. 1978 – Présenté par A. Fontaine.

VI. CHAMP DE GRAVITE ET STRUCTURES INTERNES

A. GUILLAUME

Université P. et M. CURIE

Laboratoire de Tectonophysique

4, place JUSSIEU, 75230 PARIS — CEDEX 05

Les travaux utilisant les données gravimétriques et géodésiques pour mieux connaître les structures internes ont porté essentiellement d'une part sur l'exploitation de levés terrestres ou marins, d'autre part sur l'analyse et l'interprétation à une échelle plus globale, des données de la géodésie dynamique et de la gravimétrie.

L'interprétation des mesures de gravité a été généralement réalisée conjointement avec celle des résultats apportés par d'autres méthodes géophysiques, à l'occasion d'études tectonophysiques régionales terrestres [2, 3, 5, 7, 20, 21, 23, 25, 26, 28, 30, 32, 35, 37] ou marines [19, 22, 33, 34]. Une étude a par ailleurs été spécialement consacrée aux variations de gravité dans le temps dans une région volcanique (Guadeloupe, 8). D'autres travaux, à caractère méthodologique, ont porté sur les sujets suivants : — évaluation de la qualité et de l'homogénéité des mesures de pesanteur en utilisant la variographie [27] — comparaison de différentes méthodes d'analyse et de traitements de données [24, 36] — étude de l'anisotropie des variogrammes et des fonctions de covariance dans des buts de prédictions des anomalies [14] — étude du problème inverse dans l'interprétation gravimétrique, en particulier en utilisant des méthodes de programmation linéaire [4, 31, 38]. On doit signaler par ailleurs deux documents descriptifs (cartes africaines : 1, 29) intéressants pour l'interprétation structurale.

L'utilisation simultanée des données des satellites artificiels et des mesures gravimétriques terrestres a été particulièrement développée par G. DESVIGNES [9 à 18] et A. CAZENAVE [6].

Des géoïdes détaillés (zones de $12' \times 20'$ et $1^\circ \times 1^\circ$) ont été calculés pour l'orogène alpin ainsi que pour l'Europe et les régions voisines [9, 10, 12, 15]. Certains aspects de l'interprétation géophysique des ondulations de ces géoïdes ont été abordés, en particulier la compensation de la topographie, l'effet des variations de densité dans le manteau supérieur (phénomènes de subduction) et la corrélation avec les valeurs du flux de chaleur [7, 9, 11, 13, 14, 17, 18]. L'étude des ondulations du géoïde dans la région des Iles Kerguelen a d'autre part été réalisée [6].

Enfin, le géoïde gravimétrique concernant l'Europe a été comparé au géoïde astro-géodésique [12, 16].

REFERENCES

- [1] BAYER R., BOURMATTE A., LESQUER A., LOUIS P., RECHENMANN J. (1975). — Extension de la carte gravimétrique du Tanezrouft (Sahara, Algérie). 3^e R.A.S.T., Montpellier, 1975.
- [2] BAYER R., BLACK R., FABRE J., LOUIS P. (1976). — Anomalies gravimétriques au front de la chaîne dahoméenne (pan-africaine). 4^e R.A.S.T., Paris, 1976.
- [3] BOURMATTE A. (1977). — Etude gravimétrique du Tanezrouft (Algérie). Thèse de 3^e cycle. Montpellier — U.S.T.L., Mars 1977.
- [4] BOURMATTE A., BAYER R., LESQUER A. (1977). — Quelques applications de la programmation linéaire à l'étude des anomalies gravimétriques du Tanezrouft (Algérie). 5^e R.A.S.T., Rennes, 1977.

- [5] BOURMATTE A., CABY M. (1977). — Interpretation of the gravity survey of Western Hoggar. 9th Coll. Afr. Géol. Göttingen, 1977.
- [6] CAZENAIVE A., LAMBECK K., DOMINH K. (1978). — Studies of Geos 3 altimeter geoid undulations over seamounts of the Indian Ocean. To be published in *Geophysical Monograph series* (79).
- [7] CHENOT D., DESVIGNES G., GUILLAUME A. (1978). — The geoid undulations on Occidental Alps. *2nd symposium Ivrea-Verbano*, juin 1978. (Proceedings sous presse).
- [8] CORON S. (1977). — Gravity changes with time around the volcano La Soufrière, Guadeloupe. *Symp. on non-tidal gravity variations and methods for their study, Trieste, Boll Geof. appl.*
- [9] CORON S., DESVIGNES G., GUILLAUME A. (1977). — Ondulations du géoïde dans l'orogène alpin entre l'Europe et l'Inde. Colloque Sciences de la Terre et Mesures, Orléans. *Mém. Du BRGM*, n° 91, 1978.
- [10] DESVIGNES G. (1976). — Contribution à l'étude du champ de pesanteur sur l'Europe et l'Atlantique Nord Oriental. Thèse de 3ème cycle, Université Paris VI ; juin 1976, vol., 93 p.
- [11] DESVIGNES G. (1977). — Potentiel de gravité dû à des structures cylindriques d'extension limitée. *C.R. Acad. Sc.*, t. 285, série B, p. 21-23.
- [12] DESVIGNES G. (1977). — Calcul du géoïde gravimétrique détaillé sur l'Europe occidentale et comparaison avec le géoïde astrogéodésique. *Trav. Lab. Tectonophysique, CRE/77 N21*, 1 broch., 8 p.
- [13] DESVIGNES G. (1978). — Le géoïde isostatique sur l'Europe occidentale. Communication C.N.F.G.G. janvier 1978 ; *Trav. Lab. tectonophysique, CRE/78 N01*, 1 broch. 8 p.
- [14] DESVIGNES G. (1978). — Some numerical results on the statistical behaviour of gravity anomalies. *8th International gravity commission*. Paris, septembre 78, *Trav. Lab. Tectonophysique, Paris, CRE/78 N04*, 1 broch. 8 p.
- [15] DESVIGNES G. (1978). — Geophysical interpretation of some large scale gravity anomalies and geoid undulations. *8th international gravity commission*. Paris, septembre 78, *Trav. Lab. Tectonophysique, Paris CRE/78 N05*, 1 broch. 18 p.
- [16] DESVIGNES G. (1978). — A detailed gravimetric geoid in european and mediterranean regions and its comparison with astrogeodetic levelling values. *International symposium on the geoid in Europe and mediterranean area. Ancona, Septembre 1978*. (Proceedings sous presse). *Trav. Lab. Tectonophysique, Paris, CRE/78 N06*, 1 broch. 9 p.
- [17] DESVIGNES G., GUILLAUME A. (1977). — Detailed gravimetric geoid on European Alps and its tectonic interpretation. *4th Eur. Geophys. Soc. Meeting (Munich)* ; *Trans. Am. Geoph. Union, EOS*, 58 N° 9.
- [18] DESVIGNES G., GUILLAUME A. (1978). — Le géoïde gravimétrique sur les Alpes européennes et son interprétation tectonique. *Annales de Géophysique*, 34, p. 277-284.
- [19] FORCINAL P., 1975 : Etude géophysique de la marge atlantique de la mer de Barents. *Dipl. Ing. Géophysicien*, Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- [20] GAUYAU F. (1977). — Etude géophysique dans le Levant Espagnol (entre ALICANTE et TOTANA) : le prolongement de l'accident de MURCIA. Thèse de 3ème Cycle, Géophysique, Montpellier, U.S.T.L., nov. 1977.
- [21] GAUYAU F., BAYER R., BOUSQUET J.-C., LACHAUD J.-C., LESQUER A., MONTENAT C. (1977). — Le prolongement de l'accident d'Alhama de Murcia entre Murcia et Alicante (ESPAGNE méridionale). Résultats d'une étude géophysique. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1977, XIX, 4, 623-630.
- [22] GOSLIN J., SIBUET J.C. (1975). — Geophysical study of the easternmost Walvis Ridge, South Atlantic : Deep structure. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 86, p. 1713-1724.
- [23] FROIDEVAUX P., GUILLAUME A. (1978). — Contribution to the structural analysis of the piemontese and ligurian Alps by the study of terrestrial magnetic field. Symposium "Crust and Mantle under the Alps" de l'Association des géophysiciens Européens, Munich, Septembre 77, et *Tectonophysics*, 54 (1979), p. 139-157.
- [24] GUILLAUME A., 1977 : Les variables régionalisées ; traitement du signal en sciences de la Terre : 1 volume (DOIN).
- [25] GUILLAUME A. (1977). — La ligne du Tonale (Alpes centrales) : sens de décrochement et prolongements. *Tectonophysics*, 48, (1978), T7-T14.
- [26] GUILLAUME A. (1978). — The Ivrea zone and the Chaman fault zone : an attempt of compared tectonophysics. *2è Symposium Ivrea-Verbano*, (Proceedings sous presse).
- [27] GUILLAUME A., CORON S. (1977). — Use of variography to appreciate the quality and homogeneity of sea gravity measurements. *Bull. du Bur. Gravim. Intern.*, 44.
- [28] LOUIS P. (1977). — Gravimétrie et Géologie en Afrique occidentale et Centrale. Colloque Sciences de la Terre et Mesures, Orléans. *Mémoire du BRGM*, n° 91.
- [29] LOUIS P. (1977). — La carte gravimétrique de l'Afrique Occidentale et Centrale : modèles proposés pour quelques anomalies. Ann. 29ème congrès, Brésil, 1977.
- [30] PUVILLAND P. (1975). — Reconnaissances stratégiques par gravimétrie dans la région de Limoges. *Dipl. Ing. Géophys.* Strasbourg, 1 broch..
- [31] SAFON C., VASSEUR G., CUER M. (1977). — Some applications of linear programming to the inverse gravity problem. *Geophysics*, 42, n° 6, p. 1215-1229, 1977.

- [32] SAUVAGE-ROSENBERG M., MAYER M., LESQUER A. (1978). – Structure des nappes de schistes lustrés corses d'après la géologie et la géophysique. *C.R.A.S. Paris D.* 1978, 156-160.
- [33] SIBUET J-C., MASCLE J. (1978). – Plate kinematic implications of Atlantic Equatorial Fracture. *Zone Trends. J. Geoph. Res.*, 83, n° B7, p. 3401-3421.
- [34] SIBUET J-C., VEYRAT-PEINEY B. (1976). – Interprétation gravimétrique des zones de fractures. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), XVIII, n° 4, p. 937-939.
- [35] TIBERGHIE J. (1975). – Anomalies de Bouguer et structure profonde du Liban. *Bull. Inf. Inst. Geog. Nat.*, N° 29.
- [36] VASSEUR G., BAYER R., DAIGNIERES M., DUCRUIX J. (1975). – Quelques exemples d'applications des méthodes de prolongement (gravimétrie, géomagnétisme). 3ème R.A.S.T., Montpellier, 1975.
- [37] VICAT J-P., LOUIS P. (1975). – Etude gravimétrique du diapir de SUZETTE (VAUCLUSE). *C.R.A.S., Paris D.* 1975, 282, 819, 822.
- [38] VIGNERESSE J.L. (1977). – Linear inverse problem in gravity profile interpretation. *J. Geophys.* 43, 193-213.

VII. ETUDE DES MAREES TERRESTRES

R. LECOLAZET

Professeur à l'Université Louis Pasteur

Institut de Physique du Globe

5, rue René Descartes, 67084 STRASBOURG CEDEX

Des travaux variés ont été exécutés en France depuis 1974. La plupart d'entre eux ont fait l'objet de communications à trois réunions internationales : 16^e assemblée générale de l'UGGI (Grenoble, 1975), 8^e symposium sur les marées terrestres (Bonn, 1977), 5^e assemblée de l'E.G.S. (Strasbourg, 1978). Une synthèse basée sur le classement par sujets ne serait pas très claire et nous y avons renoncé.

Les enregistrements de marée gravimétrique se sont poursuivis au B.I.P.M. avec le gravimètre Western transformé par A. SAKUMA (méthode de zéro). Leur analyse, portant sur plus de 1000 jours a permis une excellente prévision de la marée, nécessaire pour les mesures absolues, et a montré clairement l'influence des facteurs météorologiques [11]. Un autre gravimètre enregistreur (North-American transformé) est en cours de réalisation.

A l'I.P.G. de Strasbourg le gravimètre asservi à enregistrement numérique du laboratoire a fonctionné jusqu'en février 1977. Il a été rénové et perfectionné et enregistre de nouveau depuis avril 1978. Sa précision interne est environ trois fois meilleure (0,01 μ Gal). L'analyse des enregistrements disponibles (août 1973-février 1977) effectuée par S. ABOURS a permis :

- 1) une étude statistique de l'effet de variations de la pression atmosphérique, cause principale du bruit, et son élimination partielle, [1] ;
- 2) la confirmation des effets dynamiques du noyau liquide, particulièrement sur l'onde ψ_1 , [1, 2], déjà mis en évidence en 1975 [7].

Le problème, toujours actuel, de l'interpolation des données manquantes, a fait l'objet d'une étude générale de J.P. MASSOT, [8, 9]. Une solution, basée sur l'évolution temporelle des coefficients de Fourier, a été appliquée aux enregistrements de marée gravimétrique du B.I.P.M. Le comblement de lacunes de un à trois jours est possible avec une bonne précision (e.q.m : 1 μ Gal).

J.P. MASSOT et C. QUEILLE, [8, 10] ont commencé à étudier les influences météorologiques, particulièrement celles des variations de la pression atmosphérique, sur la marée gravimétrique enregistrée à Garchy, en utilisant la dérive et l'onde S_1 .

P.A. BLUM a poursuivi l'étude des inclinaisons périodiques d'origine océanique et barométrique sur les enregistrements de 6 stations situées dans le Sud-Ouest de la France [3]. A partir de ces enregistrements et d'autres, obtenus dans diverses stations, P.A. BLUM et M. VADELL cherchent à interpréter les résidus non périodiques en fonction des diverses causes de perturbations (météorologiques et autres) afin d'extraire, avec une marge d'erreur correctement estimée, les variations d'inclinaison correspondant à un phénomène géophysique donné.

M. SOURIAU [12, 13], s'est attaché à l'étude des variations spatiales des marées gravimétrique et clinométrique en Europe occidentale où l'on dispose maintenant de nombreuses

données. L'analyse des résidus obtenus après soustraction des effets calculés des marées océaniques sur les ondes M_2 et O_1 met en évidence, en ce qui concerne la marée clinométrique :

1) l'existence prévue d'un couplage entre les contraintes (ou les déformations) et les inclinaisons (les effets de cavité en sont un des éléments), défini, pour chaque composante de l'inclinaison et chaque station, par un tenseur, réduit à 3 composantes, caractéristique du site ;

2) la possibilité du calcul des composantes de ce tenseur et du facteur γ global (il a été trouvé égal à $0,693 \pm 0,013$, valeur très voisine des valeurs calculées sur modèles).

Ces résultats montrent la possibilité d'un étalonnage aux contraintes des stations clinométriques (et extensométriques) et de son application à l'étude de la variation des contraintes tectoniques. Une expérience dans cette voie va être tentée dans la région pyrénéenne. La comparaison de ses résultats avec les mesures directes des contraintes in situ sera probablement très instructive.

N. CAPITAINE, F. CHOLLET et S. DEBARBAT [4], ont déterminé le coefficient $\Lambda (= 1 + k - l)$ à partir des mesures de latitude effectuées à l'astrolabe de Paris (1956,5-1976,5). La valeur trouvée, $1,24 \pm 0,21$, bien qu'affectée d'une erreur importante, est cohérente avec d'autres déterminations et avec les valeurs théoriques calculées sur modèles. Il faut noter (remarque du rédacteur), que les variations de marée des latitudes sont soumises, comme les marées clinométriques, aux effets de site et à ceux des marées océaniques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ABOURS S. (1977). — Exploitation des enregistrements de marée gravimétrique à Strasbourg, août 1973-février 1977. *Dipl. Ing. Géophysicien*, Université Louis Pasteur, Strasbourg.
- [2] ABOURS S. and LECOLAZET R. — New results about the dynamical effects of the liquid outer core, as observed at Strasbourg. *P.I.S.E.T.* (*)
- [3] BLUM P.A. (1977). — Discrimination dans le spectre de la marée clinométrique d'effets océaniques et barométriques. 16e Ass. Gén. U.G.G.I. *Ann. Géoph.*, t. 33, fasc. 1/2.
- [4] CAPITAINE N., CHOLLET F. et DEBARBAT S. — Détermination du coefficient de marées terrestres Λ à partir des mesures de latitude effectuées à l'astrolabe de Paris. *P.I.S.E.T.*
- [5] LECOLAZET R. (1977). — Marées terrestres. *Encycl. Scient. de l'Univers.* ; la terre, les eaux, l'atmosphère. Bureau des Longitudes. Chap. 3, p. 55-61. Gauthiers-Villars, Paris.
- [6] LECOLAZET R. — Adresse présidentielle. *P.I.S.E.T.*
- [7] LECOLAZET R. and MELCHIOR P. (1977). — Experimental determination of the dynamical effects of the liquid core of the Earth. 16e Ass. Gén. U.G.G.I. *Ann. Géoph.*, t. 33, fasc. 1/2.
- [8] MASSOT J.-P. (1977). — Reconstitution des ruptures de séquence d'un signal : application aux effets météorologiques sur la marée gravimétrique. *Thèse de 3e cycle*, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- [9] MASSOT J.-P. — New interpolation method of lacuna of earth tides records. *P.I.S.E.T.*
- [10] MASSOT J.-P. et QUEILLE C. — Les influences climatologiques sur l'enregistrement de la marée terrestre à Garchy. *P.I.S.E.T.*
- [11] SAKUMA A. (1976). — Marée gravimétrique au B.I.P.M. *Procès-Verbaux C.I.P.M.*, t. 44, p. 48.
- [12] SOURIAU M. — Computed map of M_2 tilt over France and Belgium. Analysis of residuals from 16 sites and 21 stations. *P.I.S.E.T.*
- [13] SOURIAU M. (1978). — Experimental determination of the tilt-strain coupling tensor. *5th European Geoph. Soc. Meeting*. Strasbourg 29 août-1er septembre 1978.

(*) *P.I.S.E.T.* : Abréviation pour Proceedings of the 8th International Symposium on Earth Tides (Bonn, septembre 1977). Sous presse en octobre 1978.

VIII. GEODYNAMIQUE

B. LAGO & C. BALMINO

Groupe de recherches géodésiques et spatiales
18, avenue E. Belin, 31055 TOULOUSE CEDEX

Un objectif essentiel dans ce domaine est la reconstitution du potentiel gravitationnel global de la Terre et c'est ce qui a été obtenu au GRGS en 1975-76 comme aboutissement d'efforts antérieurs.

Les données de trajectographie de satellites constituent un apport fondamental dans cet objectif. Un très grand nombre de mesures optiques de direction et de distance laser ont été utilisées.

Pour espérer restituer un potentiel de qualité, il faut couvrir de la manière la plus complète possible par des mesures précises la trajectoire de nombreux satellites sur des périodes de temps suffisamment longues.

En outre, les orbites doivent présenter une certaine diversité et notamment les inclinaisons doivent couvrir correctement l'intervalle de 0 à 90°. Ces exigences conduisent à analyser le plus grand nombre de données disponibles, sans pourtant remplir aussi complètement qu'il serait souhaitable les exigences énoncées ci-dessus. C'est ainsi que pour les modèles GRIM, les données orbitographiques analysées ont concerné 23 satellites géodésiques, observés depuis 38 stations avec des données réparties sur des arcs de 10 à 24 jours.

La disponibilité de mesures relatives à un tel nombre de stations, n'a été possible que grâce à une bonne coopération internationale en ce domaine dont un des points essentiels a été la Campagne ISAGEX. Le résultat s'est traduit en premier lieu par la détermination de 206 coefficients du potentiel (les zonaux étant figés, seuls les harmoniques tesseraux ont été calculés jusqu'au degré et ordre 10, ainsi que des harmoniques tesseraux de résonance pour les ordres $m = 12$ à 15 - le degré maximum variant de 13 à 31) ; simultanément, les coordonnées géocentriques de 36 stations ont été calculées, et c'est l'ensemble de ces résultats qui constitue le modèle GRIM 1 (1975). La qualité de ce premier modèle s'est avérée satisfaisante eu égard au nombre de coefficients déterminés.

On peut estimer que le géoïde correspondant a des caractéristiques globales (à grande échelle spatiale) bonnes mais que ses caractéristiques à faible échelle sont de qualité moindre.

Une manière de remédier à cet état de fait est d'ajouter aux données de poursuite précédentes, des mesures gravimétriques, dans les zones où ces données sont disponibles. Ceci a été fait en deux temps.

Dans un premier temps, 37 331 valeurs moyennes de gravité à l'air libre sur des carrés de 1° x 1° ont été combinées avec les informations de trajectographie utilisées dans GRIM 1 auxquelles s'étaient entre temps ajoutées de nombreuses mesures laser sur des satellites récents comme GEOS 3 et STARLETTE et de nouvelles équations pour les harmoniques de résonance et les coefficients zonaux.

Ces mesures gravimétriques sont assez inégalement réparties à la surface de la Terre (avec un net avantage de l'Hémisphère Nord sur l'Hémisphère Sud) ce qui ne permet d'espérer une amélioration locale du géoïde que dans les régions bien couvertes par les mesures gravi-

métriques. De plus, le mélange des deux types d'information a nécessité une réduction de ces valeurs moyennes à des valeurs moyennes sur des carrés plus larges $5^\circ \times 5^\circ$. La solution globale calculée consiste en 949 coefficients et les coordonnées de 38 stations : c'est le modèle GRIM 2 (1976), dont la qualité s'est avérée tout à fait comparable à celle des modèles américains GEM 8 du GSFC et Standard Earth III du S.A.O. — publiés en 1975 et 1973, respectivement.

Ensuite, la pleine résolution des données gravimétriques $1^\circ \times 1^\circ$ a été exploitée, en calculant par la formule de Stokes un géoïde les utilisant intégralement pour les détails à petite échelle, et utilisant le modèle GRIM 2 pour les ondulations à grande et moyenne longueur d'onde : c'est le Géoïde Gravimétrique DGGGG2 (1976) qui a été comparé favorablement avec celui de Vincent et Marsh du GSFC (1975), et testé sur des profils à la surface océanique moyenne (assimilée au géoïde) déterminés par l'altimètre de GEOS 3.

Dans un deuxième temps, c'est près de 800 000 valeurs moyennes sur des carrés de $4' \times 4'$ couvrant l'atlantique Nord qui ont été utilisées, conjointement à GRIM 2, pour déterminer la surface du géoïde dans cette région avec une plus grande résolution encore.

Ce géoïde local, appelé DGGNA (1977), s'est révélé d'excellente qualité pour la restitution à faible échelle des accidents du géoïde, ceci par comparaison avec un géoïde local du même type (bien que plus restreint) calculé par le GSFC (Marsh et Chang, 1977), puis par comparaison externe avec des profils altimétriques du satellite GEOS 3 où l'accord relatif est de l'ordre de grandeur de l'erreur de la mesure altimétrique.

Ce fait a constitué une incitation à utiliser les profils d'altimètre de GEOS 3 au-dessus des zones océaniques, au lieu et place des données gravimétriques, dans le même esprit de haute résolution et de bonne restitution locale.

La nécessité de disposer d'un ensemble de passages couvrant la région étudiée de manière suffisamment dense, nécessite l'organisation de campagnes spécifiques d'observation de GEOS 3. C'est ainsi qu'ont été sélectionnées dans ce but, successivement parmi les régions défavorisées du point de vue des données précédentes (Hémisphère Sud et région équatoriale), la région des Iles Kerguelen (Océan Indien), la région des Iles Tahiti, et la zone de l'océan Atlantique à l'Est des côtes de la Guyane Française.

Le traitement des données de chaque campagne fournit la restitution du secteur correspondant du géoïde.

Pour situer l'état actuel et le calendrier des diverses études dont il vient d'être question, il a semblé bon de résumer les campagnes principales et le traitement de leurs données dans le tableau ci-après.

Quelques efforts d'interprétation des résultats sont actuellement en cours dans notre groupe de recherches, mais il est encore tôt pour en faire état.

Une retombée importante de cette étude est la capacité acquise par notre groupe de recherche en matière de restitution de champ de potentiel, capacité qui a trouvé son champ d'application dans la restitution du champ gravitationnel des planètes et satellites.

Modèle	Données utilisées	Date d'acquisition des données ou de la campagne	Date de parution du modèle
GRIM 1	Poursuite de satellite (optique, laser)	1966-73	Juin 1975
GRIM 2	Mesures gravimétriques $1^\circ \times 1^\circ$; poursuite de satellites (observations de GRIM 1 + nouvelles obs. laser surtout : (GEOS 3, STARLETTE)	1963-76	Juin 1976
DGGG2 Géoïde gravimétrique global	GRIM 2 + mesures gravim. sur carrés $1^\circ \times 1^\circ$ (Formule de Stokes)	Anomalies de gravité à l'air libre : fichier de la DMAAC	Octobre 1976
DGGNA Géoïde gravimétrique local (Atlantique Nord)	GRIM 2 + mesures gravimétriques sur carrés $1^\circ \times 1^\circ$ + mesures gravimétriques $4' \times 4'$	Fichier DMAAC $1^\circ \times 1^\circ$ Données du Woods Hole Ocean. Inst. et NOAA : $4' \times 4'$	Juin 1977
Géoïde Altimétrique local (région des Iles Kerguelen)	Altimètre GEOS 3	Février-Mars 76	Janvier 1978
Géoïde Altimétrique local (région des Iles de Polynésie)	Altimètre GEOS 3	Janvier-Février 77 de 77-Janvier 78	Fin 78
Géoïde Altimétrique local (zone : Est de la Guyane Française)	Altimètre GEOS 3	Mai-Juin 78	(prévu) courant 79

BIBLIOGRAPHIE

- BALMINO G., REIGBER Ch., MOYNOT B. (1976). – A Geopotential Model Determined from Recent Satellite Observing Campaigns (GRIM 1). *Manuscripta Geodaetica* (Vol. 1, 1976-41, 69).
- BALMINO G., REIGBER Ch., MOYNOT B. (1976). – Further Evaluation of the GRIM 2 Earth Gravity Field Model. (*3rd Int. Symp. Geodesy & Physics of the Earth*, Weimar, G.D.R., Oct. 76). (Proceedings Potsdam, 1977).
- BALMINO G., REIGBER Ch., MOYNOT B. (1976). – The GRIM 2 Earth Gravity Field Model ; 19th Cospar Meeting Philadelphia (June 1976) Publication of the *Deutsche Geodätische Kommission*.
- BALMINO G. (1976). – On the Product of Legendre Functions as encountered in Geodynamics. A paraître dans : *Studia Geophysica et Geodetica* (soumis en Août 76).
- BALMINO G. – On the Product of Legendre Functions as Encountered in Geodynamics. A paraître dans : *Studia Geophysica et Geodetica* (soumis en Août 76).
- ALBUISSON M., BALMINO G., MONGET J.M., MOYNOT B., REIGBER Ch. (1977). – Detailed Gravimetric Geoid for the North Atlantic. Submitted to *Bulletin Géodésique* (XIXth COSPAR Meeting, TEL AVIV, June 1977).
- BALMINO G., REIGBER Ch., MOYNOT B. (1977). – Evaluation of the GRIM 2 Earth Gravity Field Model. Submitted for publication to the *Journal of Geophysical Research* (1977 – revision in 1978).
- BALMINO G., REIGBER Ch., MOYNOT B. (1978). – Le modèle de potentiel gravitationnel terrestre GRIM 2. *Annales de Géophysique* (1978, Tome 34, n° 2).
- BALMINO G., BROSSIER C., MOYNOT B. (1977). – Prétraitement des mesures altimétriques de GEOS 3. Description du logiciel développé. Rapport GRGS interne 1977).
- BALMINO G. (1977). – Traitement des mesures altimétriques de GEOS 3. Calcul des géoïdes locaux – Apport à la connaissance globale du champ gravitationnel terrestre (rapport GRGS interne 1977).
- BALMINO G., BROSSIER C., CAZENAVE A., DOMINH K., NOUEL F., VALES N. (1978). – Geoid of the Kerguelen Islands Area Determined from GEOS 3 Altimeter Data, (Janv. 1978, Submitted to J.G.R. March 1978).

IX. ETUDES SUR LES PLANETES

B. LAGO ; Mme A. CAZENAVE ; G. BALMINO

Groupe de Recherches géodésiques et spatiales
18, avenue E. Belin, 31055 TOULOUSE CEDEX

La restitution du potentiel de gravitation de la Terre a constitué un thème important d'étude au GRGS qui a abouti à la réalisation des divers modèles GRIM.

Le gros effort d'analyse, de réalisation de logiciels, d'interprétation de résultats fait à cette occasion, trouvent un nouvel objet d'études dans la détermination du potentiel de gravitation de tout corps du système solaire. La possibilité d'une coopération avec le JPL a fait choisir MARS comme premier objet d'étude, avec la disponibilité actuelle des données Viking et Mariner 9.

La coopération GRGS/JPL a démarré en 1977. Elle s'est traduite par un stage de 3 mois d'un membre de l'équipe JPL au GRGS Toulouse, puis de l'un d'entre nous au JPL au cours de l'année 1978.

L'effort fait en commun a consisté à adapter, compléter et transformer le formalisme et l'ensemble des logiciels mis au point à l'occasion de la réalisation des modèles GRIM.

Cet effort s'est déroulé selon le planning suivant :

Premier semestre 1977

Analyse des transformations nécessaires à la chaîne de traitement développée pour le cas terrestre.

Deuxième semestre 1977

Mise en oeuvre de ces transformations et test sur quelques arcs test des Viking Orbiter 1 et 2.

Fin 1977

Traitement systématique des arcs disponibles et préparation d'une solution pour la détermination du potentiel de Mars qui a été présentée au printemps 1978 au Symposium de Lagonissi.

L'ajustement des mesures de Viking Orbiter 1 et 2 a permis d'arriver au niveau du bruit des mesures (0,016 Hz environ) sur des arcs courts (24 heures) ou de durée moyenne (3 à 4 jours).

Au cours de 1978, le modèle obtenu, développement en harmoniques sphériques jusqu'au degré et ordre 12, a été testé avec succès en extrapolation par le J.P.L. ; les positions prédites après 1 à 4 jours étant meilleures d'un ordre de grandeur en moyenne.

Conjointement, l'utilisation d'un modèle de topographie de la planète Mars (jusqu'au degré et ordre 16 - obtenu par B. Bills en 1978) a permis une première série d'interprétations des anomalies du champ gravifique à moyenne échelle, en terme :

- (1) de variations de l'épaisseur de la croûte (après choix d'une épaisseur moyenne, d'une densité superficielle et d'un rayon moyen du noyau),
- (2) d'écarts de pression à l'interface croûte-manteau ; ces écarts, qui atteignent parfois 400 bars, posent des problèmes de vraisemblance de ce type de modèles, les seuls

néanmoins qu'il soit permis de construire jusqu'à ce jour du fait de manque de données sismiques.

La nouvelle chaîne de traitement écrite a l'avantage d'être générale et de pouvoir être utilisée pour la détermination précise du champ de gravité de n'importe quelle planète ou de certains satellites (Lune par exemple). Cet outil de travail est unique et il est possible de l'utiliser non seulement pour des objectifs de recherche mais pour la préparation de missions futures.

Des travaux antérieurs réalisés au GRGS en matière de caractérisation des marées terrestres, océaniques, atmosphériques, d'étude de la rotation de la Terre et du mouvement du pôle ont leur prolongement naturel dans le mouvement de rotation des planètes et satellites et les cas de couplage Spin Orbite.

L'intérêt s'est porté sur la rotation de la planète Vénus à la fois par l'originalité de sa rotation rétrograde, la résonance apparente ou réelle avec la Terre et les possibilités de mesures offertes par l'astronomie radar et les missions planétaires.

L'évolution passée de la rotation de Vénus a été étudiée par intégration numérique en admettant que les couples de marée solide et de marée atmosphérique ont seuls été essentiellement actifs depuis la formation de Vénus. Il a été montré qu'il est tout à fait concevable que Vénus ait eu à l'origine une rotation similaire à celle des autres planètes et qu'elle ait évolué en 4.5×10^9 ans d'une rotation rapide et directe (période de spin voisine de 12 h, obliquité voisine de 0°) à la période présente lente et rétrograde. Il est nécessaire que le mode semi-diurne de la marée solide ait été un peu plus grand que le mode correspondant de la marée atmosphérique pour permettre le ralentissement de la vitesse de rotation ; de plus, il faut que le mode diurne de la marée atmosphérique ait été de l'ordre de deux fois plus grand que le mode correspondant de marée solide afin de permettre le basculement de l'axe.

La valeur 180° de l'obliquité proche de la valeur présente apparaît comme un état d'équilibre stable atteint de manière asymptotique. La dissipation solide dans Vénus a été supposée dépendre de la fréquence et de même, la réponse atmosphérique thermique, mais les lois en fréquence ont été choisies différentes puisque les mécanismes à l'origine des marées diffèrent : cette hypothèse conduit à une éventualité intéressante : la période de rotation présente de 243 jours serait très voisine d'une période limite, conséquence d'un possible quasi-équilibre actuel des modes semi-diurnes.

Nous avons supposé que l'atmosphère de Vénus commence à être active à environ 10^9 ans après la date de formation de la planète et qu'elle reste inchangée jusqu'à nos jours. Cependant, les modifications dans la réponse de la marée atmosphérique dues à la variation d'obliquité du Soleil ont été prises en compte.

Les solutions qui permettent l'évolution souhaitée d'une rotation rapide directe à la rotation présente, ont été trouvées en assez grand nombre ; quelques différences peuvent être constatées d'un cas à un autre, mais les caractères principaux sont conservés. La sensibilité aux conditions initiales et aux valeurs des paramètres physiques utilisés dans le modèle a été discutée : la conclusion principale est qu'une forte dissipation à l'intérieur de la planète et une réponse thermique diurne importante dans l'atmosphère sont indispensables.

Pour vérifier la valeur de notre modèle en tant qu'explication de la rotation de Vénus, nous avons proposé de déterminer expérimentalement le niveau des effets présents des deux types de marée (solide et atmosphérique) sur Vénus, grâce à l'utilisation de mesures qui seront effectuées au cours de prochaines missions planétaires autour de Vénus. C'est ainsi que l'analyse du niveau de retour du signal radar après réflexion sur le sol vénusien pourrait fournir des indications sur les modes de la marée thermique.

La Figure 1 montre les courbes d'évolution sur 4.5×10^9 ans de la période de rotation en jours et de l'obliquité en d° sous l'effet des marées solide et atmosphérique dans le cadre

des hypothèses précédentes. Le cas 1 est relatif à une obliquité initiale de 5° ; le cas 2 a une obliquité initiale de 30° .

On peut noter que le cas 2 présente une évolution plus régulière ; le cas 1 comporte une phase transitoire d'accélération de la période entre deux périodes de décélération et un basculement plus brutal de l'obliquité.

Dans un autre domaine, des études théoriques de la précession et de la nutation de l'axe de rotation de Mars, d'origine solaire, ont été commencées. Une première phase s'est achevée, qui reprend, dans un cadre plus général que celui utilisé par certains auteurs comme Ward, l'étude des nutations de l'axe, en particulier celles à longues périodes (19^5 à 19^6 ans) qui sont en fait des oscillations forcées par les variations du plan orbital de Mars. Il en résulte des variations de grande amplitude de l'obliquité auxquelles peuvent être liés certains changements climatiques supposés à la surface de la planète. Cette étude, faite en variables eulériennes, a utilisé une théorie planétaire ancienne (Brouwer et Van Woerkom) ; elle est actuellement reprise en variables d'Andoyer, à l'aide de la théorie des séries de Lie. Ceci devrait conduire, en utilisant également une théorie planétaire plus précise, à une description fidèle de ces nutations de grande amplitude ainsi probablement qu'à la découverte de termes à beaucoup plus longue période.

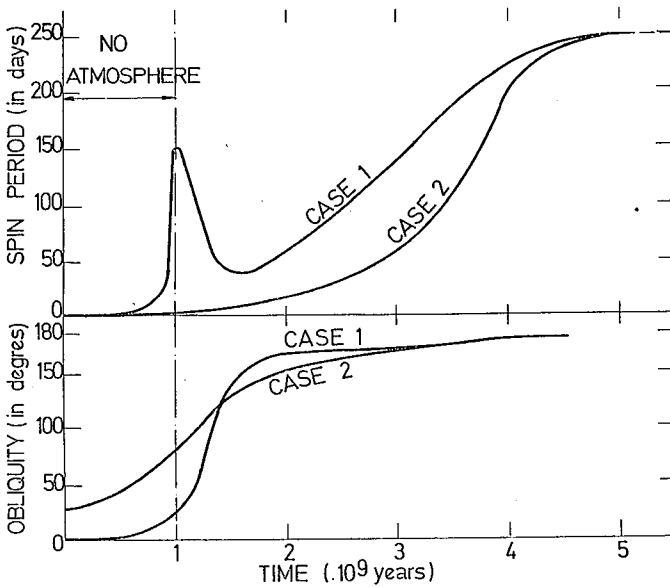


FIGURE 1

BIBLIOGRAPHIE

- BALMINO G., BORDERIES N. (1978). – Gravitational Potential of Solid Bodies in the Solar System. *Celestial Mechanics* recessed, April 77.
- BORDERIES N. (1977). – Mutual Gravitational Potential of N Solid Bodies. *Celestial Mechanics*, 13/7/77.
- BORDERIES N. (1976). – Time regularization of an Adams-Moulton-Cowell Algorithm. *Celestial Mechanics*, 7/12/76.

- CAZENAVE A., FOUCHARD F. (1976). -- Solid Rotation of Venus : role of the atmospheric tide. Rapport interne GRGS 1976. *N.B.* : Une version raccourcie et améliorée est soumise pour publication à ICARUS.
- LAGO B., CAZENAVE A. -- Possible Evolution of the Rotation of Vénus since Formation under Solid and Atmospheric Tidal Effects. Soumis pour publication à "Moon and Planets".
- BORDERIES N. -- Theory of Mars Rotation in Euler angles. Soumis à Astronomy and Astrophysics.
- BORDERIES N., BALMINO G. (1978). -- The Rotation of the Mars Planet. *Symposium*, n° 81 de l'UAI, Tokyo, Mai 1978.

X – MODELE DE LA HAUTE ATMOSPHERE NEUTRE DE LA TERRE ENTRE 200 ET 1200 KM

F. BARLIER

CERGA

8, Boulevard E. Zola, 06130 GRASSE

L'analyse des trajectoires des satellites artificiels fournit la valeur de la densité totale au voisinage du périhélie. On dispose actuellement de près de 20 années de données représentant bientôt 2 cycles d'activité solaire. Par ailleurs, on dispose aussi de mesures directes de la température exosphérique, faites notamment à partir de mesures de la raie rouge de l'oxygène atomique avec un interféromètre Fabry-Perot embarqué à bord du satellite OGO VI. De ce fait on a pu modéliser la valeur de la température exosphérique [1]. On connaît aussi avec une précision analogue le profil de la température à partir de 200 km jusqu'à l'exosphère. En-dessous, la connaissance du profil et de ses variations spatio-temporelles demeure insuffisante ; ceci explique pourquoi on a adopté la valeur de 200 km comme limite inférieure de validité. De même au-delà de 1200 km, les mesures de freinage sont trop peu nombreuses pour que le modèle soit valable.

Comme on peut considérer légitimement que les composants neutres majoritaires se répartissent comme s'ils étaient seuls selon l'hypothèse de l'équilibre hydrostatique, les composants, azote moléculaire, oxygène atomique, hélium, sont tour à tour majoritaires en fonction de l'altitude. La connaissance de la densité totale et du profil de température permet de les déterminer. On peut ainsi modéliser les trois composants les plus importants de l'atmosphère neutre entre 200 et 1200 km et, par voie de conséquence, la densité totale qui en est la somme [2]. Il faut seulement ajouter que l'oxygène moléculaire et l'hydrogène doivent être déduits d'autres types de mesures, mais ils ne représentent en général dans les zones d'altitude considérées qu'un faible pourcentage de la densité totale.

Les trois composants majoritaires sont représentés à l'altitude conventionnelle de 120 km à l'aide d'un développement en harmoniques sphériques limité aux premiers ordres, avec comme paramètres la latitude et l'heure locale solaire. On utilise aussi des coefficients dépendant de l'activité solaire et géomagnétique. Il y a 35 paramètres permettant d'estimer la densité totale et les composants majoritaires de manière simple et rapide. La précision est de l'ordre de 10 % à 20 %.

L'accord global avec les mesures in-situ [3] [4] [5] peut être considéré comme satisfaisant, l'ensemble des mesures et des résultats est très cohérent. Mais cela ne doit pas faire oublier plusieurs désaccords qui demeurent.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] THUILLIER G., FALIN J.L. and BARLIER F. (1977). – Global exospheric model of the exospheric temperature using optical and incoherent scatter measurements. *J. Atmos. , Terre. Phy.*, 39.
- [2] BARLIER F., BERGER C., FALIN J.L., KOCKARTS G. and THUILLIER G. (1978). – A thermospheric model based on satellite drag data 1978. *Annales Géophysiques*, 34, 9.
- [3] HEDIN A.E., REBER C.A., NEWTON G.P., SPENCER N.W., BRINTON H.C. and MAYR H.G. (1977b). – A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data MSIS2 composition. *J. Geophys. Res.*, 82, 2148-2156.

- [4] VON ZAHN, KOHNLEIN U.W., FRICK K.H., LAUX U., TRINKS H. and VOLLAND H. (1977). – Esro 4 model of global thermospheric composition and temperatures during times of low solar activity. *Geophys. Res. Letters*, 4, 33-36.
- [5] ALCAYDE D., BAUER P. and FONTANARI J. (1974). – Long-term variations of thermospheric temperature and composition. *J. Geophys. Res.*, 79, 629-637.

XI – RESULTATS SUR LA HAUTE ATMOSPHERE DE LA TERRE DEDUITS DES MESURES DE L'ACCELEROMETRE CACTUS

F. BARLIER
CERGA

8, Boulevard E. Zola, 06130 GRASSE

L'accéléromètre CACTUS (Capteur Accélérométrique Capacitif Tri-axial Ultra Sensible) construit par l'ONERA(*) et lancé par le C.N.E.S. en Mai 1975 à bord du satellite (quasi sphérique) CASTOR, permet de déterminer la densité totale au voisinage du périégée (270 km) et jusqu'à une altitude allant de 450 km à 600 km selon les circonstances physiques du milieu atmosphérique. La trajectoire est inclinée de 30° sur l'équateur terrestre. L'altitude de l'apogée est de 1200 km. L'appareil permet de faire une mesure chaque 2,8 s environ, ce qui représente un point de mesure chaque 20 km le long de la trajectoire. On a ainsi une très bonne résolution spatio-temporelle avec une précision qui est de l'ordre de 1 % au voisinage du périégée [1] et qui va en diminuant avec l'altitude, en raison d'autres effets qui deviennent majoritaires [2] (pression de radiation, effets liés à la charge électrique de la bille).

Il est possible d'étudier des variations à petite ou à moyenne échelle comme celles engendrées par les ondes de gravité, qu'elles viennent de la très basse atmosphère ou des régions polaires.

On peut retenir ainsi que la très haute atmosphère de la Terre est le siège permanent d'une agitation [4]. L'amplitude de cette agitation dépend bien entendu de plusieurs paramètres (latitude, longitude, heure locale, activité géomagnétique). La fréquence d'apparition de perturbations pour les passages successifs du satellite au périégée est directement fonction de l'amplitude relative de cette perturbation. Elle est rarement supérieure à 8 %. On observe par exemple que les amplitudes relatives sont plus importantes de nuit que de jour, ce qui peut être lié en partie à un freinage ionique qui introduit un amortissement du phénomène et qui est moins important de nuit que de jour.

Il apparaît aussi qu'au dessus de certaines régions terrestres, par exemple la zone de l'Atlantique Sud par opposition à la zone des Caraïbes, l'agitation est relativement moins forte.

Ce phénomène apparaît corrélé à l'apparition plus ou moins fréquente de phénomènes météorologiques importants (cyclone par exemple). Ces phénomènes peuvent induire des ondes de gravité.

L'amplitude absolue de la perturbation augmente aussi avec l'activité géomagnétique de façon très nette et importante.

La résolution temporelle permet aussi d'étudier avec précision le temps de retard qui sépare le début d'une activité géomagnétique importante et l'augmentation de la densité totale. Il y a toutefois une réserve à faire due à la nature même des mesures ; elles ne sont faites qu'au voisinage du périégée, donc chaque heure et demie. Cela impose une limite à la précision. Les temps de réponse de l'atmosphère dans la zone équatoriale pour la période considérée, apparaissent être de l'ordre de 4 à 6 heures.

(*) ONERA = Office national d'études et recherches aérospatiales.

On peut aussi étudier la variation de la densité en fonction de l'indice géomagnétique K_p . Le rapport dépend de l'heure locale solaire.

Enfin, on peut étudier statistiquement un comportement moyen de la haute atmosphère, notamment en fonction des paramètres spatiaux comme la longitude où des variations significatives apparaissent [5].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BARLIER F., BOUTTES J., DELATTRE M., OLIVERO A., CONTENSOU P. (1975). – Expérimentation en vol sur satellite d'un accéléromètre de très haute sensibilité. *Compte-Rendu Académie des Sciences*, t. 281-B, pp. 145-148.
- [2] BERNARD A., GAY M., MAINGUY A.M., JULLERAT R., WALCH J.J., BOUDON Y., BARLIER F., PALA P. (1977). – Radiation Pressures determination with the CACTUS accelerometer, XX Cospar Meeting, Tel-Aviv, Juin 1977.
- [3] JULLERAT R., PHILIPPON J.P., BARLIER F., VILLAIN J.P. (1977). – Electrification en orbite de la masse d'épreuve d'un accéléromètre à très haute sensibilité. *Compte-Rendu Académie des Sciences*, t. 284-B, pp. 275-278.
- [4] VILLAIN J.P. (1978). – Analysis of perturbations of the total density determined by the low-g accelerometer CACTUS. XXI^e COSPAR, Innsbruck, 1978.
- [5] BARLIER F., BERGER C., BORDET J.P., FALIN J.L., FUTAULLY R., VILLAIN J.P. (1977). – First analysis of 9 months data obtained with the low-g accelerometer CACTUS, Cospar Tel-Aviv 1977.
- [6] ILL M. (1978). – Determination of density scale height profiles, observatory of the hungarian Academy of Sciences, Baja, XXI^e Cospar, Innsbruck 1978.

XII – MESURE DE LA PRESSION DE RADIATION PAR L'ACCELEROMETRE CACTUS. UNE VOIE NOUVELLE POSSIBLE POUR LA MESURE DIRECTE DU BILAN RADIATIF GLOBAL DE LA TERRE

F. BARLIER

CERGA

8, Boulevard E. Zola, 06130 GRASSE

L'accéléromètre CACTUS (Capteur Accélérométrique Capacitif Tri-axial Ultra Sensible) construit par l'ONERA et lancé par le C.N.E.S. en Mai 1975 à bord du satellite CASTOR (quasi-sphérique), permet de déterminer des accélérations très faibles, nominalement de 10^{-8} ms^{-2} . En fait l'appareil s'est révélé beaucoup plus sensible que prévu ; dans certaines circonstances, la sensibilité peut atteindre 10^{-9} ms^{-2} . La précision de la mesure qui dépend des conditions dans lesquelles elle est faite, peut être de $5 \cdot 10^{-10} \text{ ms}^{-2}$ dans le meilleur des cas. Mais elle est souvent inférieure, notamment à cause du pas de télémesure. Ce pas vaut en moyenne $2.5 \cdot 10^{-9} \text{ ms}^{-2}$; il est variable car il dépend du niveau moyen de l'accélération [1].

Le phénomène le plus important qui nécessite des précautions à prendre pour faire les mesures, est dû à la charge électrique que prend la bille lorsqu'elle passe à 1 000 km au-dessus de l'anomalie magnétique de l'Atlantique Sud [2]. Il faut décharger périodiquement la bille par sa mise en contact de la bille avec la cavité pour que la perturbation soit minimisée.

Lorsqu'on se place dans de bonnes conditions (charge de bille minimum, effet de freinage atmosphérique minimum, restitution d'attitude bien connue), on peut déterminer la pression de radiation. Cette pression de radiation peut provenir directement du Soleil ; elle peut aussi être due à la rediffusion de la lumière solaire par la Terre, les nuages et l'atmosphère ; elle peut enfin être due au rayonnement infra-rouge en provenance de la Terre [3]. Comme l'appareil mesure en fait la résultante globale, il donne accès au bilan direct du flux qui traverse une surface élémentaire normale à la verticale du satellite [4].

C'est une propriété très originale de l'accéléromètre tri-axial placé à bord d'un satellite sphérique. Il faut toutefois bien connaître les propriétés optiques du revêtement du satellite qui doit être très homogène. L'Agence Spatiale Européenne a proposé une étude de recherche dans ce sens.

On peut mesurer la pression de radiation solaire directe en mesurant le saut du module de l'accélération lorsque le satellite passe de l'ombre au soleil ou réciproquement. En moyennant les valeurs obtenues au cours des différents passages mois par mois, on observe une lente variation d'environ 6 % correspondant exactement à la variation de distance Terre-Soleil. Cela prouve qu'en valeur relative, on obtient une moyenne de mesures ayant une précision proche du 1 %. Si l'on connaissait bien les propriétés optiques du revêtement on pourrait en déduire une estimation de la constante solaire. Des études sont nécessaires pour étudier si cette méthode peut déboucher sur une contribution originale à la connaissance de la constante solaire, avec une précision suffisante.

Mais on peut retenir, dès à présent, que nous disposons d'une méthode de mesures directe du bilan radiatif global de la Terre.

Les autres caractéristiques devraient être un coût intéressant du point de vue recherche spatiale et aussi une grande fiabilité. L'appareil marche encore parfaitement après plus de trois ans de mesure.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BOUTTES J., DELATTRE M., JUILLERAT R. (1976). – Qualification in orbital flight of the CACTUS high sensitivity accelerometer. XIX^e Cospar Meeting Philadelphia, Juin 1976.
- [2] JUILLERAT R., PHILIPPON J.P., BARLIER F., VILLAIN J.P. (1977). – Electrification en orbite de la masse d'épreuve d'un accéléromètre à très haute sensibilité. *Compte-Rendu Académie des Sciences*, t. 284-B 1977, pp. 275-278.
- [3] BARLIER F., BOUDON Y., FALIN J.L., FUTAULLY R., VILLAIN J.P., WALCH J.J., MAINGUY A.M., BORDET J.P. (1976). – Preliminary result obtained from the low-g accelerometer CACTUS ; XIX^e Cospar Meeting, Philadelphia, Juin 1976.
- [4] BOUTTES J., JUILLERAT R., MAINGUY A.M. (1978). – Utilisation de l'accéléromètre CACTUS pour la mesure du bilan radiatif terrestre, la Recherche Aérospatiale, 1978-2 (Mars-Avril).

XIII. METHODE DE CALCUL DES EPHEMERIDES DE SATELLITES EN STATION

M. STARON ET P. DURRENBERGER

Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
92320 - CHATILLON, France

1. INTRODUCTION

Le procédé le plus précis de localisation des satellites est celui de la télémétrie laser. La concentration de l'énergie dans un faisceau très étroit autorise des portées de plusieurs milliers de kilomètres sur un satellite muni de réflecteurs.

La finesse du faisceau laser a comme contrepartie la nécessité de le pointer très exactement en direction du satellite. Ce pointage se fait généralement par l'intermédiaire d'une tourelle de poursuite. Jusqu'à une époque récente (1970), la plupart des stations laser et, en particulier celle de l'ONERA, exploitaient des méthodes de poursuite visuelle. Les observations étaient donc limitées aux périodes pour lesquelles le satellite est éclairé par le soleil et la station dans l'ombre, ce qui correspond statistiquement à 20 ou 30 % des observations possibles pour un satellite au-dessus de l'horizon.

Pour réussir des tirs laser, même si le satellite est invisible, l'ONERA a proposé et mis au point un dispositif de poursuite semi-automatique de "tir en aveugle" [1, 4, 5].

Après une expérimentation très satisfaisante en 1973, l'ONERA réussissait le 21 mars 1975 les premières mesures laser européennes sur Starlette avant de participer aux Canaries à l'expérience de Géodésie Internationale de 1975.

Les opérations de "tir en aveugle" qui viennent d'être évoquées nécessitaient jusqu'en octobre 1975 la fourniture d'éphémérides comportant, avec une récurrence de 10 secondes, le site, l'azimut et la distance du satellite par rapport à la station.

La transmission par télex d'une telle quantité d'information est relativement longue, donc coûteuse ; elle présente un risque d'erreur non négligeable et nécessite en station un temps de préparation des passages très important pour une mission opérationnelle.

Pour réduire ce volume d'informations et, en conséquence, le temps de préparation des passages, le G.R.G.S. a proposé (3) que les coordonnées topocentriques du satellite soient calculées en station à partir d'une tabulation à pas constant des six paramètres osculateurs de l'orbite.

La quantité d'informations correspondant à cette proposition, bien que six fois moins importante que la précédente, est encore relativement volumineuse.

La méthode adoptée par l'ONERA fait usage d'un seul jeu de six paramètres osculateurs par passage de satellite.

Il en résulte un gain de temps considérable sur la transmission, mais aussi sur la préparation des passages. L'élimination des erreurs de transmission est quasi certaine et, il est possible, avantage très appréciable, de transmettre ces informations par téléphone ou par radio et non plus par télex.

2. PRINCIPE [6]

On se propose de calculer, dans un repère centré polaire OXYZ (O centre de la terre), la position \vec{OP}_i d'un satellite à l'instant T_i , connaissant sa position \vec{OP}_0 et sa vitesse \vec{V}_0 à l'instant T_0 (\vec{OP}_0 et \vec{V}_0 sont calculés préalablement à partir des six paramètres osculateurs fournis).

On suppose pour cela que sur le trajet $\widehat{P_0 P_i}$, le satellite est soumis à la seule attraction d'un centre fictif O_i dont la position \vec{OO}_i et la constante de gravitation μ_i doivent être identifiées.

À chaque instant t_i correspond un centre fictif O_i .

Il est démontré en [6] que l'erreur minimale à l'instant T_i entre la position vraie et la position résultant d'une attraction képlérienne de centre O_i s'obtient en identifiant cette dernière à la force réellement appliquée lorsque le satellite est au voisinage du tiers de tronçon de trajectoire $\vec{P}_0 \vec{P}_i$.

Soit $\vec{OP}_{i(1/3)}^*$ une estimation de la position du satellite au temps $(T_0 + (T_i - T_0)/3)$ et $\vec{\gamma}_{i,1/3}$ l'accélération à laquelle il sera soumis en ce point.

3. METHODES DE CALCUL

Entièrement exposées dans [6] – elles comportent

3-1. Une estimation de $\vec{OP}_{i(1/3)}$, qui s'effectue par résolution du mouvement képlérien de Centre O dans le plan (\vec{OP}_0, \vec{V}_0).

3-2. Une estimation de $\vec{\gamma}_i(1/3)$, par représentation approchée du Champ d'attraction réel par celui de 2 masses fictives situées sur l'axe de rotation terrestre (Méthode des deux centres fixes [2]).

3-3. Une identification du centre fictif O_i et de l'intensité d'attraction correspondante.

3-4. Le calcul de prédiction de \vec{OP}_i .

4. CONCLUSION

Le calcul précédent s'accommode pour chaque passage d'une information de 6 grandeurs caractérisant les éléments osculateurs en 1 point (données orbitales ou position/vitesse).

Elle donne une précision pratique actuelle de 2' sur les arcs et 300^m sur les positions, résultat qui peut être amélioré par une optimisation plus poussée du calcul du centre fictif.

REFERENCES

- [1] HOARAU R., STARON M. et VASSEUR D. – Dispositif de poursuite semi-automatique pour la télémétrie laser des satellites. Centre National d'Etudes Spatiales. *Quatrième Journées d'Optique Spatiale*, Marseille (6-8 novembre 1973), p. 149-159.
- [2] MARCHAL C. (1966). – Calcul du mouvement des satellites artificiels à partir des solutions exactes du problème des deux centres fixes. *Bulletin Astronomique*, 3^e Série, tome 1, fascicule 3, p. 189-213.
- [3] PIEPLU J.L. – Station laser – Tir programme – Elaboration des données de désignation sur le calculateur local. Groupe de Recherches de Géodésie Spatiale (Octobre 1973).
- [4] STARON M. (Octobre 1972). – Dispositif de poursuite semi-automatique pour satellite. *Rech. Aérop.* n° 1972-2, p. 119-122 et *Revue Navigation* (Paris), n° 80, p. 426-432.
- [5] STARON M., HOARAU H. and VASSEUR D. – Semi-automatic apparatus for satellite tracking. *VI IFAC Symposium Control in Space*. Papers Session VIII (26-31 August 1974) Tsakhkadzor, Armenian SSR, URSS, p. 7-13.
- [6] STARON M. et VASSEUR D. (1976). – Nouvelle méthode de calcul des éphémérides de satellites pour les dispositifs de trajectographie laser. *Rech. Aérop.*, n° 3, p. 171-182.

COMPTE RENDU D'ACTIVITE D'ORGANISMES INTERNATIONAUX

On trouvera ci-après des articles concernant l'activité d'organismes internationaux.

Nous remercions les Directeurs de ces organismes, ainsi que les auteurs des articles, membres de la section de géodésie, d'avoir bien voulu permettre l'insertion, dans notre volume, de comptes rendus traduisant les activités marquantes, dans le domaine géodésique, des organismes qu'ils représentent.

ACTIVITE DU BUREAU INTERNATIONAL DE L'HEURE (BIH)

B. GUINOT,

Directeur

Observatoire de Paris

62, Avenue de l'Observatoire, 75014 PARIS

Le BIH a régulièrement poursuivi son activité dans ses deux domaines principaux : rotation de la Terre, échelles de temps basées sur les horloges atomiques : Temps Atomique International TAI et Temps Universel Coordonné UTC. Aucun incident n'est à noter dans le fonctionnement du Bureau

ROTATION DE LA TERRE

On rappelle que le BIH établit les valeurs du temps universel UT1 (en fait UT1-UTC) et les coordonnées du pôle en un système homogène. Pour ce faire, il utilise toutes les observations disponibles de quelque nature que ce soit, dès que leurs causes d'erreurs systématiques et leurs incertitudes aléatoires sont suffisamment connues. Ces conditions ne s'appliquent pour le moment qu'aux observations classiques de temps universel et de latitude, faites avec 80 instruments environ, et aux déterminations du mouvement du pôle, obtenues par la Defense Mapping Agency des USA par mesure Doppler sur satellites TRANSIT (désignées par DOP-DMA dans la suite).

Parallèlement à cette solution globale, le BIH continue à établir et à publier une solution purement astrométrique (ASTR) aux fins de recherches. La considération de ASTR, DOP-DMA et de la solution globale conduit à d'intéressantes conclusions qui ont été présentées au Symposium n° 82 de l'UAI (Cadix, mai 1978) et qui sont brièvement rappelées ici.

On note l'amélioration croissante de DOP-DMA, dont les incertitudes aléatoires sont maintenant la moitié de celles de ASTR. Dans la solution globale du BIH, les incertitudes aléatoires (un sigma) des valeurs brutes calculées tous les 5 jours sont typiquement de 0",007 pour chacune des coordonnées x et y du pôle et 0,0010s pour UT1.

Les séries ASTR et DOP-DMA présentent un écart systématique qui a essentiellement un caractère annuel. Jusqu'à présent DOP-DMA est corrigé de ce terme annuel avant d'être combiné avec les mesures classiques. On se demande si l'on ne devrait pas faire l'inverse : les mesures Doppler semblent moins sujettes que les mesures classiques aux perturbations de caractère annuel. Après correction de cet effet systématique, les deux séries ASTR et DOP-DMA fournissent des coordonnées du pôle très semblables. On note des irrégularités communes qui montrent que l'excitation du mouvement du pôle n'a pas une forme simple.

On remarque que UT1 reste déterminé par la seule astronomie classique. Il est sans doute affecté d'erreur annuelle, une amplitude de 2 à 3 ms étant possible.

Des valeurs lissées de x, y, UT1-UTC sont publiées mensuellement par le BIH dans ses circulaires D, les données pour le mois m étant distribuées au début du mois m + 2. En outre, le BIH procure un certain nombre de services pour des besoins particuliers :

— Un service hebdomadaire est maintenu pour les besoins du Jet Propulsion Laboratory (USA), grâce à un contrat de cet organisme. Il fournit x, y, UT1-UTC pour la semaine s, le jeudi de la semaine s + 1. Ce service est basé sur des communications par telex. Un nombre

croissant d'observatoires y contribuent ; notamment, en 1977, l'ensemble des observations horaires de l'URSS a été introduit dans le système, ce qui a entraîné un gain important de précision. Avec l'autorisation du Jet Propulsion Laboratory, les résultats du service hebdomadaire sont communiqués à un grand nombre d'organismes et sont reproduits dans plusieurs bulletins nationaux.

– Diverses formes de lissage des résultats bruts sont établies et distribuées.

– Des valeurs extrapolées continues des coordonnées du pôle sont distribuées par les circulaires B/C et des valeurs extrapolées discontinues de x , y , UT1-UTC sont calculées pour l'US Naval Observatory.

– Les données brutes d'observation en archives ont été communiquées à plusieurs chercheurs (bandes magnétiques).

Parmi les travaux de recherche entrepris par les membres du BIH, on citera les suivants qui se rapportent directement à l'amélioration du service. M. Feissel a lancé un vaste programme de révision des coordonnées du pôle et de UT1 depuis 1955, basé sur des séries homogènes nouvelles transmises par les principaux observatoires. N. Capitaine se consacre à l'étude théorique de la Terre considérée comme un corps déformable. B. Guinot continue à étudier les ondes dues aux marées zonales dans UT1, en particulier l'onde M_f qui présente des anomalies. Le BIH participe, grâce à la collaboration de O. Calame du CERGA, à l'expérience EROLD (Earth Rotation by Lunar Distances). Il a contribué à monter la campagne MEDOC (Mouvement du pôle par trajectographie Doppler de satellites artificiels).

TEMPS ATOMIQUE

Depuis 1969, TAI est basé sur les données d'horloges à césium comparées entre elles par le LORAN-C avec une précision de quelques centaines de nanosecondes. Le nombre d'horloges participantes s'est accru, mais ni leur qualité, ni la précision des méthodes de comparaison ne se sont beaucoup améliorées. L'algorithme ALGOS du BIH garantit au TAI une bonne stabilité mais il ne peut assurer que la durée de l'intervalle unitaire du TAI soit conforme à la seconde, ni même que cette durée reste constante, à cause d'effets aléatoires et systématiques affectant les horloges. L'évènement marquant de ces dernières années a été l'introduction des étalons primaires de fréquence dans l'élaboration du TAI, destinée à assurer l'exactitude de son intervalle unitaire.

Tout d'abord, les étalons primaires du National Bureau of Standards, du National Research Council et de la Physikalisch-Technische Bundesanstalt ont montré que l'intervalle unitaire du TAI était trop court de 10×10^{-13} s. La correction correspondante a été apportée le 1^{er} janvier 1977, conformément à une recommandation de l'UAI. Ensuite, pour maintenir l'exactitude du TAI, des corrections de "pilotage" sont apportées quand la nécessité en apparaît. Pour le moment, ces corrections consistent en ajustements de la fréquence du TAI par sauts de $0,2 \times 10^{-13}$, à des intervalles jamais inférieurs à 60 jours. De telles corrections sont du même ordre que les fluctuations aléatoires qui affectent TAI, elles sont inobservables par ses usagers. On a montré qu'elles assurent l'exactitude et la stabilité à très long terme (au-delà de 5 à 10 ans) sans dégrader sensiblement la stabilité à plus court terme. On a eu recours quatre fois à ces corrections de pilotage au cours de 1977.

On sait que UTC diffère de TAI d'un nombre entier de secondes, de façon que UTC et UT1 restent approximativement en accord. La gestion du système UTC par le BIH n'a soulevé aucune difficulté. Il a fallu introduire des secondes intercalaires à la fin de chaque année ; une dizaine de circulaires par an portent à la connaissance des stations émettrices de signaux horaires les valeurs de DUT1 ($DUT1 = UT1 - UTC$ à 0,1 s près) à diffuser.

TAI et UTC sont connus en temps différé (1 à 2 mois de retard) par les corrections à appliquer aux horloges des laboratoires. Dans les cas les plus favorables, c'est-à-dire dans les

pays d'Amérique du Nord et d'Europe couverts par le LORAN-C et parfois par des liaisons horaires par télévision complémentaires, l'exactitude est de quelques $0,1 \mu\text{s}$: il est alors possible, par extrapolation des marches d'horloges, d'avoir TAI et UTC en temps réel à $1 \mu\text{s}$ près. Malheureusement pour d'autres régions du globe, l'incertitude peut être beaucoup plus grande : l'extension et l'amélioration des comparaisons d'horloges à grande distance sont cruciales dans le développement des travaux sur le temps atomique.

Des travaux de recherche ont porté sur l'estimation optimale de la durée de l'intervalle unitaire des échelles de temps. Ils ont fourni un filtre utilisé d'une manière courante pour publier des données sur l'exactitude du TAI. On a aussi entrepris l'étude théorique du problème du "pilotage" en fréquence. On a étudié les corrections relativistes à appliquer dans les diverses méthodes de comparaison de temps : ces corrections qui atteignent plusieurs $0,1 \mu\text{s}$ dans les méthodes utilisant des satellites ne sont plus négligeables.

Bien que le BIH soit, en principe, un centre d'évaluation, les développements récents dans le domaine des comparaisons de temps montrent qu'il ne peut se dispenser de participer à des travaux expérimentaux. En liaison avec le Laboratoire Primaire du Temps et des Fréquences, à l'Observatoire de Paris, il a participé à diverses synchronisations par transport d'horloge et à une campagne de synchronisations par les satellites NTS1 et NTS2. Il a aussi participé à l'organisation d'expériences de comparaison de temps par les satellites Symphonie entre la France, l'Allemagne (Rép. Fédérale) et le Canada, ainsi qu'à la présentation du projet LASSO, synchronisations par tirs de lasers sur satellites artificiels, à l'Agence Spatiale Européenne.

PUBLICATIONS

Le Rapport Annuel du BIH présente l'ensemble des résultats obtenus par le BIH. Il comprend en outre des informations annuellement tenues à jour sur les émissions de signaux horaires. Il est tiré à 750 exemplaires dont 680 sont immédiatement distribués. Le Rapport pour l'année a est envoyé en juin de l'année $a + 1$. En complément au Rapport, un état des observations portant sur la rotation terrestre traitées par le BIH est envoyé aux établissements qui participent à ses travaux.

Les autres publications du BIH sont les suivantes :

- Circulaire A, annuelle, donnant les valeurs de UT2-UT1 (130 exemplaires).
- Circulaire B/C, mensuelle, coordonnées extrapolées du pôle et UT1-UT0 (60 exemplaires).
- Circulaire D, mensuelle, rotation de la terre ($x, y, UT1-UTC$), temps universel coordonné, temps atomique international, informations diverses (750 exemplaires).
- Circulaire E, irrégulière, annonce des secondes intercalaires de UTC (250 exemplaires).
- Circulaire F, irrégulière, annonce des valeurs de DUT1 (60 exemplaires).

Toutes les publications du BIH sont distribuées gratuitement. Pour certains services particuliers, le remboursement des frais engagés est demandé.

ACTIVITE DU BUREAU GRAVIMETRIQUE INTERNATIONAL (BGI)

JJ. LEVALLOIS,

Directeur

11, Quai Saint-Bernard – Tour 14 – 75005 PARIS

Les activités du BGI, définies par le comité directeur en Février 1976, ont été centrées sur quatre sujets principaux :

1) La mise en route d'une banque de données gravimétriques dont la tenue est assurée par le Bureau des Recherches Géologiques et Minières. (BRGM)

Cette étape est délicate et s'est heurtée en 1977-1978 à des difficultés dues au manque de personnel au Bureau Gravimétrique et à l'inexpérience des personnels sur un sujet nouveau. Une collaboration internationale étroite est indispensable.

Ces difficultés devraient être surmontées en 1979 par reconversion d'une partie du personnel.

2) La compensation d'une carte ou d'un catalogue d'anomalies à l'air libre sur des aires équivalentes au trapèze équatorial de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$. Il est nécessaire dans ce but de disposer des valeurs actuellement calculées par les différentes organisations, de les comparer et de compiler le tout. C'est un travail permanent qui doit subir de fréquentes mises à jour ; une première édition est en cours de calcul basée sur les valeurs publiées par la DMAAC, corrigées par les valeurs calculées au B.G.I. lorsqu'elles paraissaient plus sûres.

Sur les océans on fonde de grands espoirs sur les valeurs calculées par l'Ohio State University par collocation d'après les variations d'altitudes des satellites sondeurs.

Tous ces travaux doivent être menés en connection avec ceux de la carte générale des anomalies de Bouguer.

3) Le projet d'unification des réseaux gravimétriques d'Afrique sur le réseau I.G.S.N. 1971 pour lequel le B.G.I. a passé contrat avec l'U.N.E.S.C.O.

Une première partie du travail a été traitée en 1977 – 1978. On pense pouvoir le mener à terme en ce qui concerne les calculs proprements dits en 1979.

4) La maintenance et publication du réseau I.G.S.N. 1971 qui est le réseau mondial de base.

Toutes ces activités sont fortement ralenties par le manque de personnel qui doit faire face aux multiples et nécessaires travaux quotidiens.

BIBLIOGRAPHIE

Bulletin d'information n° 36 (Mars 1975) à 42 (Mai 1978)

TRAVAUX GEODESIQUES AU CERN

Jean GERVAISE

Organisation européenne pour la Recherche nucléaire
CERN—CH—1211 GENEVE 23

Au cours des années 1975, 1976, 1977, 1978, le Service de Géodésie et de Métrologie du CERN a eu pour mission essentielle d'exécuter les travaux de sa vocation pour la mise en service de l'accélérateur de 400 GeV (SPS) dont la circonférence est de 7 km. L'énergie de 400 GeV a été atteinte pour la première fois le 17 juin 1976 [1].

Pour relier le synchrotron aux zones expérimentales, il a fallu procéder à l'installation des éléments des faisceaux primaires de protons dans les tunnels de transfert jusqu'aux cibles et aligner les aimants dipolaires et quadripolaires des faisceaux secondaires jusqu'aux détecteurs de particules. Ceci a représenté des mesures de précision dans plus de 11 km de tunnel.

Les dimensions des détecteurs de particules n'ont cessé de croître et peuvent atteindre aujourd'hui des volumes de l'ordre de 900 m³. Ceci a nécessité la création, dans les zones d'expériences, de référentiels tridimensionnels permettant la mise en place, sur le faisceau de particules incidentes, des éléments de détection, d'apporter les modifications qui apparaissent pendant la durée d'une expérience (un ou deux ans) et d'exécuter tous les contrôles nécessaires, avant, pendant et après les périodes actives de fonctionnement.

L'ensemble de ces travaux a bénéficié de l'expérience acquise lors des installations du Synchrotron de 28 GeV (CPS) et des Anneaux de Stockage à Intersections (ISR) [2]. Mais l'augmentation des dimensions du SPS par rapport aux accélérateurs existants a très largement influencé les techniques de la géodésie et de la métrologie.

Les efforts du Service ont porté sur le développement de nouveaux instruments, l'amélioration des étalonnages pour les mesures de longueurs, l'affinement des méthodes et le perfectionnement des calculs de compensation sur ordinateur.

Le tunnel du SPS étant *souterrain* [3], il a fallu d'abord effectuer un *réseau géodésique* de surface pour relier entre eux les ouvrages souterrains, distants les uns des autres de plus d'un kilomètre. La précision obtenue, définie par son écart-type, a été de 1.3 mm au sommet des puits qui permettent la liaison entre la surface et le tunnel ($\approx 10^{-6}$).

Pour obtenir cette précision, l'effort a porté sur les mesures de distances. Les appareils électroniques de mesure de distances, apparus sur le marché depuis les années 1970, ont tous été étudiés et calibrés sur les bases du CERN, l'une installée dans un tunnel spécial pour l'étalonnage des fils d'invar, de 0.40 à 60 m, l'autre à l'extérieur, pour l'étalonnage et la détermination des constantes des distancemètres.

La base d'étalonnage des fils d'invar [4] utilise deux étalons primaires :

- la règle de 4 m en invar contrôlée régulièrement avec le mètre étalon par l'intermédiaire d'une règle de 1 m ;
- la fréquence, stabilisée par effet Zeeman, du laser de l'interféromètre Hewlett-Packard.

Pour le forage du tunnel, le Service a entièrement automatisé un gyrothéodolite [11] gagnant ainsi un facteur deux dans l'emploi de cet appareil capricieux. Grâce aux soins pris dans l'exécution des mesures, l'écart maximum entre les références issues de la géodésie de

surface ramenée au niveau du tunnel et le cheminement gyroscopique souterrain n'a pas dépassé 26 mm. On doit signaler que c'est la première fois qu'un tunnel de cette importance a été entièrement piloté en positionnant le laser qui servait à guider la machine à forer à partir des seules mesures effectuées au gyrothéodolite.

La chaîne de métrologie souterraine [5], formée de 216 quadrilatères complets, s'étend sur les 7 km de la circonférence de l'anneau. Si l'on divise par 1 000 chacun des paramètres de cette chaîne, on perçoit mieux la précision recherchée : il s'agit de mettre en place une chaîne circulaire de 7 m, chaque maillon ayant une longueur de 32 mm, une largeur de 3.5 mm. L'écart à la circonférence idéale de chaque maillon ne dépasse pas 2.5 μm et l'homogénéité de trois maillons successifs 0.08 μm .

Pour réaliser cette performance, ont été inventés et développés au sein du Service de Géodésie et de Métrologie les appareils suivants [6] :

- le distinvlar [7], appareil de mesure de distances utilisant le fil d'invar comme étalon secondaire, avec une tête de mesure et un point fixe logés dans des alésages de précision. Pour des distances allant jusqu'à 60 m, l'écart-type sur les mesures est de 34 μm ;

- l'appareil de mesure des écarts par rapport à une droite matérialisée par un fil nylon [8] sous-tension ($\epsilon_t = 70 \mu\text{m}$ sur 100 m) ;

- le laser avec tête de lecture asservie [12] ($\epsilon_t = 90 \mu\text{m}$ sur 100 m) pour la mesure des écarts ;

- des inclinomètres [10] pour les mesures d'inclinaisons transversales des aimants ($\epsilon_t = 10^{-5}$ radian) ;

- des vérins à pastille de polyuréthane [9] permettant des déplacements précis et sans jeu à rattraper pour la mise en position fine des éléments lourds (quadrupoles et dipôles).

De cette nouvelle instrumentation a résulté une industrialisation des mesures géodésiques qui a permis de les insérer aisément dans le planning de la construction.

L'ensemble de ces mesures a fourni de nombreuses observations redondantes (angles, écarts par rapport à une ligne droite, distances, dénivelées), en tout 1900 équations d'observation pour 857 inconnues, dont la combinaison harmonieuse n'a pu être obtenue sans la résolution de grands systèmes d'équations, par l'application du principe des moindres carrés à ces observations surabondantes. Le traitement de ces grandes matrices particulières en géodésie a fait l'objet d'un symposium qui s'est tenu au CERN en mars 1977 [13].

De nombreux laboratoires de physique nucléaire en Europe et aux USA, ainsi que des firmes spécialisées dans l'auscultation des ouvrages d'art utilisent aujourd'hui les instruments développés par le Service de Géodésie et de Métrologie, et plus particulièrement le distinvlar.

L'étude des nouveaux projets du CERN a donné lieu à des recherches sur de nouveaux matériels de mesure et de simulation sur ordinateur, pour le projet d'anneaux de collision e^+e^- (LEP) [14].

BIBLIOGRAPHIE

[1] CERN Rapport annuel 1976, p. 109-122, 1977-CERN ISSN 0304-2601, 1977.

[2] GERVAISE J. - "Positioning of the CERN Intersecting Storage Rings, The Geodetic Approach", CERN 70-18, juin 1970.

[3] GERVAISE J. - "Topométrie souterraine", Compte rendu des Journées d'Etude des 5 et 6 mars 1974, CAST, Lyon, Mars 1974.

[4] GERVAISE J. - "Invar Wire Measurements, a Necessary Evil", CERN SPS/SU/78-2, juin 1978.

[5] GERVAISE J. - "Geodesy and Metrology at CERN, a Source of Economy for the SPS Programme", CERN 76-19, November 1976.

- [6] GERVAISE J. - "High-Precision Survey and Alignment Technics in Accelerator Construction", Proceedings of the Meeting on Technology Arising from High Energy Physics, Vol. 1, p. 45-66, Geneva 1974.
- [7] Proceedings of the Meeting on Technology Arising from High-Energy Physics, Vol. 2, p. 478-479, 1974.
- [8] Proceedings of the Meeting on Technology Arising from High-Energy Physics, Vol. 2, p. 480-481, 1974.
- [9] Proceedings of the Meeting on Technology Arising from High-Energy Physics, Vol. 2, p. 482, 1974.
- [10] Proceedings of the Meeting on Technology Arising from High-Energy Physics, Vol. 2, p. 485, 1974.
- [11] Proceedings of the Meeting on Technology Arising from High-Energy Physics, Vol. 2, p. 483-484, 1974.
- [12] GERVAISE J. - "Evolution de la Métrologie Laser au CERN", CERN SPS/SU/76-20, 1976.
- [13] Proceedings of the Meeting on Processing of Special Large Matrices for Geodesy, Interpretation of the Results, Geneva Workshop 1-4 March 1977, CERN, November 1978.
- [14] GERVAISE J. - "The Survey System", Design Study of a 15 to 100 GeV e^+e^- Colliding Beam Machine (LEP), Chapter 13, p. 113-118, CERN/ISR-LEP/78-17, 1978.

BIBLIOGRAPHIE COMPLEMENTAIRE

- ANNABI F. (Bureau des longitudes), (1975). – Etude des perturbations planétaires directes de la Lune. Thèse de Doctorat de troisième cycle (Université de Paris VI) (Avril 1975).
- AZOUBIB J., GRANVEAUD M., GUINOT B., (1977). – Estimation of the scale unit duration of time scales, *Metrologia*, 13, 87.
- BALMINO G. (G.R.G.S. Toulouse), (1975). – Coriolis forces in numerical integration of satellite orbits and absolute reference systems. *Celestial Mechanics*, vol. 10, p. 423 (1975).
- BALMINO G. (G.R.G.S. Toulouse), (1975). – Numerical methods of orbital dynamics. *Springer Verlag*, p. 50 (1975).
- BALMINO G., CASTEL R., BORDERIES N, (G.R.G.S. Toulouse), (1975). – Nouvelles méthodes de calcul des coefficients de Hansen et de leurs dérivées. *Rapport interne G.R.G.S.* (Novembre 1975).
- BALMINO G., MOYNOT B., (1977). – Grands systèmes linéaires, nouvelles techniques, *Note technique G.R.G.S.*, 1977.
- BALMINO G., CASTEL L., FOUCHER P., (1977). – Results of a LOW – LOW S.S.T. Simulation study between SPACELAB and a sub-satellite. International Astronautical Federation XXVIII Congress Prague – September 77.
- BALMINO G., (1978). – Least squares collocation (Ramsau Summer School lectures).
- BARANOV W., (1975). – Potential fields and their transformations in Applied Geophysics, Gebrüder Borntraeger, Stuttgart. *Geoexploration Monographs*, Series 1, n° 6.
- BARLIER F., BORDET J.P., ORFEUIL J.P. (G.R.G.S. Grasse et ARMINES, Fontainebleau), (1975). – Methods of satellite orbital analysis based upon statistical treatment and factorial analysis, Présenté au *COSPAR*, Varna (1975).
- BARLIER F. FALIN J.L., BERGER C., THUILLIER G., (1976). – Global experimental model of total density deduced from direct exospheric temperature and satellite drag data. Présenté à l'*European Geophysical Society*, Amsterdam, Septembre 1976.
- BARLIER F., BERGER C., FALIN J.L., KOCKARTS G. et THUILLIER G., (1977). – Comparison between a new three dimensional thermospheric model based on satellite drag data and other models based on mass spectrometer measurements or optical measurements. Présenté à *Seattle*, septembre 1977.
- BERGER X. (G.R.G.S. Grasse), (1975). – Importance of the Moon-Earth coupling effect in the motion of an artificial satellite : semi-analytical computed solution of this and similar problems. *Satellite Dynamics* (Springer Verlag), p. 35 (1975).
- BERGER X. (G.R.G.S. Grasse), (1975). – Importance of the coupling effects between Earth potential harmonics in the motion of an artificial satellite ; computed and checked solution of this coupling problem ; case of J7. *Satellite Dynamics* (Springer Verlag), p. 111 (1975).
- BERGER X. (G.R.G.S. Grasse), (1975). – Théorie analytique programmée du mouvement des satellites artificiels sous l'action gravitationnelle de la Terre. *Celestial Mechanics*, vol. 11, P. 281 (1975).
- BERGER X. (G.R.G.S. Grasse), (1975). – Théorie semi-analytique programmée du mouvement des satellites artificiels. Thèse de Doctorat d'Etat soutenue à l'Université de Paris VI (29 Octobre 1975).
- BERGER C. (1976). – Analyse et modélisation statistique de l'atmosphère neutre ; asymétries hémisphériques. Thèse de Doctorat d'Etat, Paris VI, soutenue le 9 avril 1976.
- BERGER C., ALCAYDE D., BARLIER F., (1976). – Behaviour of atomic oxygen at 200 km deduced from satellite drag data and OGO-6 temperature. Comparison with incoherent scatter data at 45°N. Présenté au *Cospar*, Philadelphie, Juin 1976.

- BERGER X., WALCH J.J., (1977). – Programme de la théorie analytique du mouvement des satellites artificiels sous l'action des harmoniques J_2 à J_7 . *Manuscripta Geodaetica*, Vol. 1 1977.
- BRACHET G. (CNES), (1975). – Position de GEOLE par rapport aux programmes américains. *Bulletin I.G.N.*, n° 29 (p. 24 à 27).
- BORDERIES N., (1976). – La méthode de centrage en Géodésie Spatiale. Thèse (Docteur de Spécialité en Géophysique – Option Physique Spatiale). Université Paul Sabatier, Toulouse, 22 Octobre 1976.
- CALAME O. (CERGA Grasse), (1975). – Première détermination d'une longue base terrestre par télémétrie Laser-lune et localisation du réflecteur de Lunakhod 1. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, tome 28, p. 551 (1975).
- CALAME O. (CERGA Grasse), (1975). – Etude des mouvements libratoires lunaires et localisation des stations terrestres à partir des mesures laser de distances. Thèse de Doctorat d'Etat soutenue à l'Université de Paris VI (29 Octobre 1975).
- CALAME O., (1976). – Free libration of the Moon determined by an analysis of laser range measurements, *The moon*, vol. 15, p. 343, 1946.
- CALAME O., (1976). – Description des mouvements Terre-Lune dans le cadre de l'analyse des mesures par laser. *Manuscripta Geodaetica*, vol. 1, pp. 173 – 260, 1976.
- CALAME O. MULHOLLAND J.D., (1978). – Lunar crater Giordano Bruno : A.D. 1178 impact observations consistent with Laser Ranging Results. *Science*, Feb. 1978, vol. 199, n° 4331, p. 875.
- CALAME O. MULHOLLAND J.D., (1978). – Lunar Tidal Acceleration determined from Laser Range Measures. *Science*, 3 March 1978, vol. 199, n° 4332, p. 977.
- CALAME O. (1977). – Effect of Tidal Friction on the Orbit and the Rotation of Earth and its Determination by Laser Ranging : papier invité, *Symposium "Tidal Friction and Earth Rotation"*, Bielefeld, Germany, oct. 1977.
- CALAME O., (1977). – Free Librations of the Moon from Lunar-Laser Ranging in Scientific Applications of Lunar Laser Ranging. *Astrophysics and Space Science Library*, n° 62, Reidel Publ. C° 1977, p. 53.
- CAPITAINE N., (1977). – "Corrections to some terms of nutation deduced from the Paris astrolabe observations", *IAU Symposium n° 78*, Kiev, 1977.
- CAPITAINE N., CHOLLET F., DEBARBAT S., (1977). – "Recherche de termes de nutation dans l'analyse des observations de latitude effectuées à Paris", *IAU Symposium n° 78*, Kiev, 1977.
- CAPITAINE N. (G.R.G.S. Observatoire de Paris), (1975). – Total effect of any nearly-diurnal wobble of the Earth's axis of rotation in latitude and time observations. *Geophys. J.R. Astr. Soc.*, vol. 43, p. 573 (1975).
- CAPITAINE N., FEISSEL M. (Observatoire de Paris), (1975). – Systematic differences between global or local solutions of polar motion derived from astronomical and spatial measurements. *Colloque UAI n° 26*, p. 415 (1975).
- CAPITAINE N., CHOLLET, F. DEBARBAT S., (1977). – "Détermination du coefficient de marées terrestres à partir des mesures de latitude effectuées à l'astrolabe de Paris". A paraître dans les *Proceedings of the 8th International Symposium on Earth tides*, Bonn (RDA), Sept. 1977.
- CAPITAINE N., (1977). – Correction to Total Effect of any nearly diurnal wobble of the Earth's axis of rotation in latitude and time observation. (Correction à l'effet total d'une nutation presque diurne de l'axe de rotation terrestre sur les observations de latitude et de temps). *Geophys J.R. astr. Soc.*, 49, 695.
- CAPITAINE N., CHOLLET F., DEBARBAT S., (1977). – "Recherche des Termes de nutation dans l'analyse des observations de latitude effectuées à Paris" A paraître dans les *Proceedings of the IAU Symposium N° 78* on Nutation and the Earth's rotation. Kiev (URSS), Mai 1977.
- CAPITAINE N., CHOLLET F., DEBARBAT S., (1978). – "Comparaison des mesures astronomiques de la latitude obtenues par des astrolabes à Paris et à Potsdam". *Ve International colloquium of Geodetic Astronomy and Astrometry*, Dresden, Juin 1978.
- CAPITAINE N., (1978). – "Nutation in space and diurnal nutation in the case of an elastic Earth". (Nutation dans l'espace et nutation diurne dans le cas d'une Terre élastique). A paraître dans les *Proceedings of the IAU Symposium n° 82* on Time and the Earth's Rotation, Cadix (Espagne), Mai 1978.
- CAZENAIVE A. (G.R.G.S. Toulouse), (1975). – Interaction entre les irrégularités de la vitesse de rotation de la Terre et les phénomènes météorologiques et climatiques Thèse de Doctorat d'Etat soutenue à l'Université de Toulouse (1-12-75).
- CAZENAIVE A., DAILLET S., LAMBECK K., (1977). – Tidal studies from the perturbations in satellite orbits. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* A 284 (77).
- Comité National Français de Géodésie et Géophysique (C.N.F.F.F.), (1975). – *U.G.G.I. Grenoble (1975), Rapport national sur les travaux Français (1971 - 74)* publié par G.M. WEILL ; section I Géodésie (pages 1, 1 à I, 37).
- Comité National Français de Géodésie et Géophysique (C.N.F.G.G.). – Section I Géodésie Rapports annuels 1975 – 76 – 77, *JGN n°* : 26 779 – 26 680 – 26 676.
- DAILLET S., (1977). – Etude des marées océaniques par les perturbations orbitales de satellites artificiels, Thèse de 3^{ème} Cycle, Toulouse 1977.

- DAILLET S., (1977). – Détermination par observation des trajectoires des satellites artificiels des ondes semi-diurnes de la marée océanique. Application au calcul de l'accélération séculaire de la Lune. *Annales de Géophysique*, tome 34 (78).
- DUFOUR H.M. (I.G.N.), (1975). – Rapport du Groupe d'Etudes 4.35 : Résolution des grands systèmes linéaires UGGI, Grenoble, Août 1975 (AIG Travaux).
- DUFOUR H.M., (1977). – Résolution des grands systèmes d'équations linéaires. C.R. du groupe d'études 4.35, SOPRON (Hongrie), *JGN* n° 26, 715.
- DUFOUR H.M. (I.G.N.), (1975). – Utilisation des documents cartographiques existants (anomalies de Bouguer, cartes d'anomalies) pour une définition précise du potentiel dans l'espace extérieur au géoïde vrai. *I.G.N./S.G.N.*, n° 26.762, Siena, Italie, Avril 1975.
- DUFOUR H.M., BOUCHER C. (I.G.N.), (1975). – Rapport d'activité de la Section IV : Traitement de l'information, collocation, fonctions et champ de pesanteur. Géodésie différentielle UGGI, Grenoble, Août 1975 (A.I.G. Travaux).
- DUFOUR H.M., (1978). – Problèmes posés par l'analyse détaillée du géoïde. *Bolletino di geod. & Sci. aff.* 2-3 (1978).
- FALIN J.L., BARLIER F., THUILLIER G., (1976). – Variations of the thermospheric constituents as a function of geomagnetic activity deduced from a new model of exospheric temperature and total density. Présenté à l'*European Geophysical Society*, Amsterdam, Septembre 1976.
- FEISSEL M., GUINOT B., (1976). – Preliminary Study of the 18,6 year nutation in polar motion and universal Time. Methode de LOHRMANN – OBSERV. 33, 949.
- FEISSEL M., (1977). – The determination of UT1 by the Bureau International de l'Heure (La détermination de UT1 par le Bureau International de l'Heure). *8th Precise Time and Time Interval Meeting*, p. 47. Communication en 1976.
- FEISSEL M., (1978). – On the computation of accurate Earth rotation by the classical astronomical method (sur le calcul exact de la rotation de la Terre par la méthode astronomique classique). *Symposium UAI n° 82*, "Time and the Earth's Rotation", Cadix (Espagne), 8 – 12 mai 1978.
- FEISSEL M., GUINOT B., (1978). – A determination of the principal term of nutation (Une mesure du terme principal de la nutation). *Symposium UAI n° 78* sous presse. Communication en 1978.
- FOGLIANI R. (Université de Paris VI), (1976). – Etude analytique de l'influence du frottement atmosphérique sur le mouvement des satellites artificiels. *Bulletin G.R.G.S.*, n° 15, Mars 1976.
- GRUPE DE RECHERCHES GEODESIQUES et SPATIALES (G.R.G.S.). – Bulletin n° 14 (Déc. 1974) ; Bulletin n° 15 (Mars 1976). Rapports d'activité annuels.
- GUINOT B., NOUEL F., (1976). – Medoc experiment of the French Polar Motion Project. *Proc. Int., Géod. Symp.*, Las cruces, USA (oct. 76), Vol 1, p. 159.
- GUINOT B., (1978). – Basic problems in the kinematics of the rotation of the Earth (Problèmes fondamentaux de la cinématique de la rotation de la Terre), à paraître dans les *Proceedings of the LAU Symposium, n° 82*, on Time and the Earth's Rotation, Cadix, Espagne, Mai 1978.
- GUINOT B., (1978). – Irregularities of the polar motion (Irrégularités du mouvement du pôle) ; à paraître dans les *Proceedings of the LAU Symposium, n° 82*, on Time and the Earth's Rotation, Cadix, Espagne, Mai 1978.
- GUINOT B., (1978). – Rotation of the Earth and Polar Motion, Services, (Rotation de la Terre et mouvement du pôle), à paraître. Proceedings of the 9th Geodesy/Solid Earth and Ocean Physics Research Conference, Columbus, Ohio, USA, 2 – 5 octobre 1978.
- KOVALEVSKY J. (CERGA Grasse), (1975). – Some problems related to the definition of reference systems. *Colloque UAI*, n° 26, p. 123 (1975).
- KOVALEVSKY J. (CERGA Grasse), (1975). – Results of the ISAGEX campaign. *Space Research XV*, p. 3 (1975).
- KOVALEVSKY J. (CERGA Grasse), (1975). – Contributions possibles de l'astrométrie spatiale à la définition d'un système de référence absolu. *ESRO/CESR Scientific and Technical Review*, vol. 6, p. 267 (1975).
- KOVALEVSKY J., (1977). – Scientific Expectations in the Selenoscience in Scientific Applications of Lunar Laser Ranging. *Astrophysics and Space Science Library*, n° 62, Reidel Publ. C° 1977, p. 21.
- KOVALEVSKY J., (1977). – Lunar Orbital Theory. *Philosophical Transactions of Royal Society of London*. Vol. 284, p. 419, 1977.
- KOVALEVSKY J., (1977). – Géodésie et Géodynamique Spatiales. *Le courrier du CNRS*, juillet 1977, p. 12.
- LALA P., BARLIER F., OYHARCABAL C., (1978). – Interpretation of the D58 satellite measurements and the new model of the Earth's albedo. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia* (soumis en 1977 à paraître en 1978).
- LAMBECK K. (1975). – Effects of tidal dissipation in the oceans on the Moon's orbit and the Earth's rotation. *Journal of Geophysical Research*, vol. 80, p. 2917 (1975).
- LAMBECK K. & CAZENAVE A., (1976). – Long term variations in the length of day and climatic changes *Geophys. J.R. Astron. Soc.* (1976), 46.
- LAMBECK K. & CAZENAVE, (1976). – The Earth's variable rate of rotation : a discussion of some meteorological and oceanic causes and consequences. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.*, A 284 (77).
- LECOLAZET R., STEINMETZ L., (1975). – Sur la structure fine du spectre diurne de la marée gravimétrique. Assemblée Générale de l'AIG, Grenoble, 1975.

- LIGIER C., (1977). – Intégration semi-analytique à grand pas du mouvement des satellites artificiels. Détermination des harmoniques zonaux impairs du potentiel terrestre. Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Paris 6, octobre 1977.
- MIGUS A., (1977). – Théorie analytique du mouvement de rotation de la Lune. Thèse de Doctorat d'Etat, juin 1977.
- MIGUS A., (1977). – Analytical Theory for the Rotation of the Moon in Scientific Applications of Lunar Laser Ranging. *Astrophysics and Space Science Library* n° 62. Reidel Publ. C° 1977 P. 79.
- MOGNARD. N. LAGO B., (1978). – The Computation of wind speed and waveheights from GEOS 3 DATA (JGR Série verte).
- NOUEL F., PIUZZI A., GAMBIS D., BROSSIER D., ETCHEGORRY L., ETCHEGORRY N. – MEDOC Bulletin (janvier 77, juillet 1977, janvier 78).
- ORFEUIL J.P., (1975). – Etude par analyse des données de la structure de la haute atmosphère. Thèse de Doctorat de troisième cycle soutenue à l'Université de Paris VI (Janvier 1975).
- SOUBARI AL HOUSSINE, (1977). – Etude d'une nouvelle méthode de traitement des cartes de champs magnétique et de pesanteur par voie optique. Diplôme d'Ingénieur-Géophysicien, Université Louis Pasteur de Strasbourg 1977.
- STOYKO A., STYKO N., (1974). – La chronométrie et la variation de la rotation de la terre. *Annales Françaises de Chronométrie et de Micromécanique*, Année 1974 9, A9/1 – A 9/4.
- STOYKO A., STOYKO N., (1974). – Extrapolation du Temps Universel à court intervalle, *Annales Françaises de Chronométrie et de Micromécanique*, Année 1974, 9, 63/1 – 63/3.
- STOYKO A., STOYKO N., (1975). – Mouvement des blocs continentaux. *Problems of recent crustal movements UGGI*, édit. "Valgus", Tallinn, 1975, pp. 205 – 210.
- STOYKO N., STOYKO A., (1977). – Résultats de la détermination de mouvements des continents d'après les méthodes astronomiques, *Bulletin géodésique*, vol. 51 n° 3, année 1977, pp. 219 – 225.
- STOYKO A., (1978). – Bibliographie des publications ayant rapport avec l'Astrolabe DANJON ou d'autres astrolabes de types nouveaux (1948-1976). Observatoire de Paris.
- THUILLIER G., FALIN J.L., WACHTEL C., (1976). – Experimental global model of exospheric temperature based on measurements from the FABRY-PERROT interferometer on board of the OGO-E satellite, Présenté au COSPAR, Philadelphie, juin 1976.
- WACHTEL CL. (1975). – Températures thermosphériques neutres déduites des mesures d'interférométrie à bord du satellite OGO 6. Thèse de Doctorat de troisième cycle soutenue à l'Université de Paris VI (novembre 1975).

SECTION II

SISMOLOGIE ET PHYSIQUE
DE L'INTÉRIEUR DE LA TERRE

TABLE DES MATIERES

	Pages
I – Sismologie théorique G. JOBERT.....	63
II – Séismicité et séismotectonique J.P. ROTHÉ	68
III – Sismogénèse F.H. CORNET	75
IV – La protection antiséismique P. TEISSIER.....	77
V – Ondes diffractées par le noyau terrestre Y. ROCARD.....	85
VI – Etude du manteau, ondes superficielles et vibrations propres N. JOBERT.....	89
VII – Zones de convergence et lithosphère continentale G. PERRIER.....	94
VIII – Profils sismiques A. HIRN	97
IX – Prospection sismique G. GRAU et D. MICHON	102
X – Microséismes météorologiques P. BERNARD	108

I – SISMOLOGIE THEORIQUE

Georges JOBERT

Laboratoire d'Etude Géophysique des Structures Profondes
4, place Jussieu, 75005 PARIS

1 – SOURCES SISMIQUES, FAILLES ET FISSURES

1a – Cavité en milieu précontraint

On a étudié la relaxation des contraintes due à la croissance d'une cavité dans un milieu uniformément précontraint en cisaillement, en utilisant l'approximation de la source transparente d'Archambeau. On a obtenu (Minster, Suteau, 1977) une représentation simple de la radiation en champ lointain. On a construit une dislocation plane et circulaire de même croissance temporelle que la cavité qui fournit les mêmes phases en champ lointain sauf pour des effets géométriques. Des dislocations différentes pour les ondes P et S doivent être utilisées si la vitesse de rupture est transsonique. Le modèle pourrait fournir une représentation adéquate pour la radiation due à un relâchement de contraintes tectoniques causé par une explosion souterraine.

1b – Méthodes matricielles et sources générales

On a montré que, pour une stratification plane, la méthode matricielle permettait d'obtenir simultanément les fonctions de Green pour les problèmes de l'excitation d'un milieu par une force de volume et par une dislocation (G. Jobert, 1975). On évite ainsi la représentation classique des dislocations par des systèmes de doubles couples qui obligeait à des dérivations des fonctions de Green. Ces résultats ont été généralisés au cas d'une sphère gravitante stratifiée (G. Jobert, 1977).

Le concept d'écart de contrainte (stress glut) introduit par Backus et Mulcahy, utilisé dans la théorie matricielle, permet de montrer aisément l'équivalence de dislocations et d'une infinité de systèmes de dipôles (G. Jobert, 1977).

1c – Modélisation et détermination des paramètres à la source des tremblements de terre

La radiation des ondes sismiques a surtout été étudiée sur des modèles cinématiques, le plus commun étant celui de Haskell (Madariaga 1978a). Il a été démontré récemment que ce modèle est en contradiction avec certaines hypothèses fondamentales de la mécanique des solides (Madariaga, 1976b). La continuité de la matière, par exemple, n'est pas respectée et le champ des tensions présente des singularités inacceptables. Les observations modernes de la radiation des ondes sismiques dans les champs lointain et proche ainsi que les études expérimentales, montrent que la majorité des séismes sont dus à la propagation dynamique d'une rupture sur le plan de faille (Madariaga, 1977a). Des méthodes numériques ont été développées pour étudier des modèles de fracture cisaillante ; par ailleurs quelques modèles de fissures de forme connexe (par exemple, ellipse, carré, etc. . .) (Madariaga, 1977b), avec une vitesse de rupture et une contrainte variables, ont également été étudiés. Nous sommes en train de développer des techniques qui permettent d'incorporer des critères de rupture dans le problème et de déterminer ainsi l'histoire de la rupture sur la faille. Des calculs tridimensionnels ont été faits pour la faille rectangulaire.

Chute de contrainte. Des études récentes ont montré que la chute de contrainte pour les gros séismes ($M > 6$) est comprise entre 10 et 100 bars. Ces valeurs sont nettement inférieures à celles observées dans les expériences de laboratoire de type glissement saccadé (stickslip) (~ 1 K b). La chute de contrainte est déterminée à partir des observations en utilisant un modèle très simple : une source circulaire avec chute de contrainte instantanée. Ce modèle ne donne en fait qu'une borne inférieure à la chute de contrainte (Madariaga, 1977a). L'étude avec des modèles de géométrie différente mais connexe, montre que l'écart entre les observations sismologiques et celles faites à la suite d'expériences de même type n'est pas réductible.

Beaucoup d'observations récentes indiquent que les sources des gros tremblements de terre sont complexes : la source est constituée d'une collection de petites fissures distribuées dans le plan de faille. Dans un tel modèle, on a démontré que la chute de contrainte dans une fissure peut être beaucoup plus importante que celle déterminée avec un modèle simple de faille (Madariaga, 1978c, d).

1d – Etude de la convergence de la méthode numérique dite de discontinuités de déplacements en vue de l'étude de la propagation quasistatique des fractures

On exploite une méthode de Crouch, pour l'étude de la propagation quasistatique des fractures. Utilisant la représentation de Neuber-Papkovitch des champs de déplacements on obtient 2 ensembles de fonctions correspondant à des conditions aux limites supplémentaires, qui permettent de calculer contraintes et déplacements dans un milieu élastique contenant une dislocation. En discrétisant la frontière d'un corps de forme quelconque on peut alors par l'emploi de ces solutions élémentaires traiter de nombreux problèmes. La méthode a été testée sur un certain nombre de cas où la solution exacte était connue. Les recherches actuelles portent sur la convergence de la méthode de discrétisation (F. Cornet).

2 – PROPAGATION DES ONDES SISMIQUES DANS LES MILIEUX COMPLEXES

2a – Méthodes analytiques

A la suite d'études effectuées sur la méthode de Thomson-Haskell en vue de calculer la dispersion des ondes de Rayleigh dans un milieu à stratification cylindrique ou sphérique, on a cherché les conditions les plus générales dans lesquelles cette méthode garde son efficacité. On a montré que les seules stratifications qui permettent une séparation en modes généralisant les modes sphéroïdaux et les modes toroïdaux sont en fait les stratifications classiques : plans parallèles, sphères concentriques, cylindres coaxiaux. On a proposé une méthode de perturbation pour résoudre les problèmes dans des structures différant peu de ces stratifications (G. Jobert, 1976a, b, 1977). Les sismogrammes synthétiques correspondant à la propagation d'ondes de Love dans une structure présentant un relief de différentes formes ont été calculés. On a trouvé que la réponse en fréquence pour chaque mode dépend de 3 facteurs : source, forme de la perturbation, terme d'interférence (Cisternas, Jobert, 1977).

On a montré (Jobert, Suteau, 1978) que les sources de volume introduites se réduisent à des sources de surface équivalentes à celles trouvées par Kennett dans le cas de milieu stratifié à frontières irrégulières. Les formules obtenues sont généralisées au cas où des forces de volume sont présentes.

2b – Modèles numériques et analogiques

L'étude de la propagation des ondes sismiques dans des structures complexes se heurte à d'énormes difficultés si l'on sort du domaine où la théorie des perturbations peut s'appliquer. On est donc conduit à utiliser des méthodes numériques bien adaptées aux calculs sur ordinateur. La méthode des éléments finis est une de ces méthodes que L. Martel a entrepris de développer.

Echelon sur un demi espace. Comme test de ces méthodes numériques on peut envisager pour des modèles simples, une comparaison de leurs résultats avec ceux obtenus sur des modèles réduits analogiques (plaques dans lesquelles on étudie la propagation à deux dimensions d'ondes ultrasonores). Un tel test a été réalisé dans l'étude de la propagation des ondes de Rayleigh à travers une marche sur un demi-espace homogène et montré un bon accord entre les résultats expérimentaux et ceux fournis par une méthode de différences finies (Martel et al. , 1977).

Un autre programme permet de traiter de même la propagation des ondes de cisaillement SH, et plus particulièrement la transmission des ondes de Love à travers une simple marche continentale. Une méthode générale de filtrage permet de séparer les modes normaux d'ondes de surface des ondes de volume diffractées.

Surfaces courbes. Les modèles réduits analogiques peuvent servir de guide dans la recherche d'autres solutions numériques. On a pu ainsi, à partir d'une étude expérimentale sur quelques structures cylindriques simples, proposer une méthode numérique applicable dans le cas le plus général de la propagation des ondes de Rayleigh dans des milieux dont la surface a des irrégularités topographiques de grandes dimensions par rapport aux longueurs d'onde (Martel 1976).

2c – Application de la théorie des rais à la propagation d'ondes de surface (écarts à la symétrie sphérique)

Des applications ont été faites :

- à l'étude de l'effet de l'aplatissement de la Terre sur les ondes du manteau : les trajectoires ne sont plus des grands cercles, mais des courbes voisines de géodésiques de l'ellipsoïde. Un effet progressif de déviation, augmentant avec l'incidence sur un parallèle, focalise les trajectoires après un tour le long d'une caustique plus ou moins allongée suivant un parallèle (N. Jobert, 1976a) ; on trouve que l'hétérogénéité du modèle change peu le résultat (N. Jobert 1976b) ;
- à l'étude de l'effet des hétérogénéités présentées par les bordures continentales (Virieux, 1976).

3 – PROBLEMES INVERSES

Foyers sismiques proches

Une méthode très rapide a été proposée (Cisternas, G. Jobert, 1977 ; Jobert, Cisternas, 1978) pour résoudre le problème inverse des foyers sismiques proches. L'introduction d'une norme hyperbolique quadratique dans l'espace-temps permet de traiter la non-linéarité du problème en se ramenant à une simple équation algébrique scalaire. L'analyse des cas singuliers est possible.

Hétérogénéités latérales

Si l'on suppose connues la source excitatrice et la matrice de Green d'un milieu stratifié simple voisin du milieu étudié, la méthode de perturbation (cf. 2a) permet de ramener le problème inverse des hétérogénéités latérales à un problème linéaire. L'utilisation des amplitudes des vibrations forcées pour une corde élastique donne des résultats satisfaisants (G. Jobert et al. , 1978).

BIBLIOGRAPHIE

1 - Sources sismiques

- MINSTER J.B. (1976). - Transformation of multipolar source fields under a change of reference frame : *Geophys. J., R. Astr. S.*, 47, p. 397-409.
- MINSTER J.B. et SUTEAU A.M. (1977). - Far field waveforms from an arbitrarily expanding, transparent spherical cavity in a prestressed medium : *ibid.*, 50, p. 215-233.
- MINSTER J.B. (1978). - Transient and impulse responses of a one-dimensional linearly attenuating medium. -I Analytical results *R.A. S. Geophys. J.*, 52, p. 479-501.-II A parametric study. *Ibid.* p. 503-523.
- JOBERT G. (1975). - Propagator and Green matrices for body force and dislocation. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 43, p. 755-762.
- JOBERT G. (1977). - Gravitating Earth flattening approximations of propagators and Green matrices for body force and dislocation sources. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 48, 123-130.
- JOBERT G. (1977). - On equivalent models of seismic sources *J. Geophys.* 43, 329.
- MADARIAGA R. (1976). - Dynamics of an expanding circular fault. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 65, 163-182.
- MADARIAGA R., (1977 a). - Implications of stress drop models of earthquakes for the inversion of stress drop from seismic observations. *Pageoph*, 117, p. 301-316.
- MADARIAGA R. (1977 b). - High frequency radiation from crack (stress drop) model of earthquake faulting. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 51, p. 625-651.
- MADARIAGA R. (1978 a). - The dynamic field of Haskell rectangular dislocation model. *Bull. seism. Soc. Am.*, 68, 869-887.
- MADARIAGA R. (1978 b). - A relation between stress drop and seismic moment of complex earthquakes. Proc. Fault. Mech. Conf., Stanford, Ca, USA.
- MADARIAGA R. (1978 c). - On the seismic moment of complex events. *G.J.R.A.S.*, sous presse.
- MADARIAGA R. (1978 d). - Seismic radiation from earthquake models based on fracture mechanics. AMS-SIAM Symp. on math. probl. in fract. mech. Burridge ed. Amer. Mathem. Soc.
- DZIEWONSKI A.M. and ROMANOWICZ B. (1977). - An exact solution to the problem of excitation of normal modes by a propagating fault. Lincoln Labs report.

2 - Propagation d'ondes dans des milieux complexes.

- JOBERT G. (1974). - On Earth flattening transformation in body wave theory. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 39, p. 189-193.
- JOBERT G. (1976 a). - Sur une transformation préalable à l'extension de la méthode de Thomson-Haskell à la sismologie tridimensionnelle. *C.R.A.S.* 282 B, p. 33-34.
- JOBERT G. (1976 b). - Sur une extension de la méthode de Thomson-Haskell au cas d'un milieu à stratification légèrement irrégulière. *C.R.A.S.*, 281B, 413-415.
- JOBERT G. (1976). - Matrix methods for generally stratified media. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 47, 351-362.
- JOBERT G., JOBERT N., KENNETT B.L.N. (1975). - Comments on the paper "On variational principles and matrix methods in elastodynamics", by B.L.N. Kennett. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 43, p. 721-725.
- CISTERNAS A. and JOBERT G., 1977. - Extension of matrix methods to structures with slightly irregular stratification. *J. Geophys.* 43, 59-64.
- JOBERT G. and SUTEAU A. (1978). - Volume and surface sources due to laterally varying boundaries of elastic homogeneous layers. *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 55, 669-77.
- JOBERT N. (1976). - Effet de la stratification ellipsoïdale de la Terre sur la dispersion des ondes du manteau. *C.R. A. S.*, séance du 15/03/1976, t. 282 B, p. 411.
- JOBERT N. (1976). - Propagation of surface waves on an ellipsoidal Earth. *Pure and applied Geophysics*, t. 114, n° 5, p. 797.
- LEGROS H. et HOANG TRONG P. (1975). - Répartition non orthogonale des sens du premier mouvement des ondes P. *Tectonophysics*, 27, p. 211.
- MARTEL L. (1976). - Rayleigh waves in a medium with an undulated surface *Pageoph*, 114, n° 5, p. 811.
- MARTEL L., MUNASINGHE M. and FARNELL G.W., (1977). - Transmission and reflection of Rayleigh waves through a step. *Bull. Seism. Soc. Am.* 67, n° 5, p. 1277.
- SUBHASH S.M.G., GIR R., CHOUDHURY M.A. (1977) - Analysis of P wave spectra from underground nuclear explosions. *Publ. Inst. Geophys. Pol.*, A-4 (115) p. 39-50.
- VIRIEUX J. (1976). - Etude de certaines hétérogénéités latérales. Rapport de DEA, IPG Paris.

3. Problèmes inverses

- JOBERT G., BRUNEAU C., CISTERNAS A., (1978). - Problème inverse linéaire pour les amplitudes spectrales. Exemple de la corde vibrante. *C.R.A.S.*, 287 B, p. 153-155.

- JOBERT G. and CISTERNAS A. (1978). — On the inverse problem of local seismic foci. Applied inverse problems. P. Sabatier éd., Springer Verlag. Lecture notes in physics, n° 85.
- CISTERNAS A. et JOBERT G. (1977). — Problème inverse des foyers sismiques pour un réseau local tridimensionnel. *C.R.A.S.*, 284 B, 69-72.

II. SEISMICITE ET SEISMOTECTONIQUE

Jean-Pierre ROTHÉ

Professeur honoraire à l'Université Louis-Pasteur (Strasbourg)
160, rue d'Alco, 34100 MONTPELLIER

SEISMES EN FRANCE (1975-1978)

L'activité séismique en France a été particulièrement faible pendant la période 1975-1978 et aucun séisme de magnitude supérieure à 4,5 n'a été enregistré ou ressenti. Quelques secousses méritent cependant d'être signalées en raison de leur localisation exceptionnelle : l'épicentre du séisme du 8 janvier 1975 à 09 h 12 mn coïncide avec le petit gisement de gaz de Valempoulières (Jura) ; les deux chocs du 27 février 1976 à 07 h 35 mn et à 10 h 42 mn se sont produits en mer sur la "pente armoricaine" (47°06'N, 5°30'W), à 45 km au nord d'un point où, la veille, un fort dégagement gazeux avait été observé par un bâtiment de la Marine Nationale : on peut penser que les deux phénomènes sont liés et pourraient s'expliquer par la naissance d'un volcan sur une faille de distension en bordure de la plateforme continentale (PAUTOT, 1976) ; le 24 octobre 1976, à 20 h 53 mn, de légers dégâts se sont produits à Jeumont (Nord) ; l'épicentre de la secousse du 3 avril 1978, à 06 h 26 mn, était situé sur la côte orientale de la Corse, au voisinage d'Aléria (42° 10'N, 9°33'E).

Quelques secousses ont encore été localisées en 1975 et 1976 au curieux foyer dont l'activité avait débuté en septembre 1971 et qui est situé sous le plateau lorrain, au Nord-Est d'Epinal et à 20 km au Sud-Est des cheminées basaltiques de la côte d'Essey.

Le séisme du 8 septembre 1976, à 19 h 54 mn, largement ressenti dans le Limousin et le détroit du Poitou, a fait l'objet d'une étude détaillée et d'une détermination de mécanisme focal (MECHLER, 1976).

Deux essaims de secousses se sont produits à partir du 6 avril 1977 dans la région d'Éguzon et à partir du 27 avril 1977 dans la région de Cosne d'Allier ; ils ont pu être étudiés en détail par le Laboratoire de Détection et de Géophysique (L.D.G.) ; dans les deux cas la bonne situation des stations du réseau L.D.G. a permis un calcul de mécanisme au foyer de bonne qualité (coulissage senestre à Eguzon, dextre à Cosne) et un contrôle assez complet de l'évolution de la sismicité (DELHAYE, LACHAIZE et SANTOIRE, 1978).

ETUDES REGIONALES DE SEISMICITE EN FRANCE

La mise au point de réseaux de sismographes portatifs à enregistrement téléométré a amené un grand développement des recherches de sismicité — et surtout de "microsismicité" (1). Dans la Haute-UBaye, sur l'arc séismique briançonnais (FRECHET, POUPINET et PAVONI, 1978), sur le front nord-pyrénéen dans la région d'Arette (CISTERNAS, GAGNEPAIN et RUEGG, 1978) et dans la région de Lourdes (CISTERNAS et al., 1978) (2), sur le plateau

(1) Activité des microsecousses ; on sait que les "microséismes" sont un phénomène tout à fait différent

(2) Après une première installation du réseau temporaire de l'I.P.G. de Strasbourg, un réseau permanent téléométrique de 8 stations, dont 3 à 3 composantes, est en cours d'installation. 5 stations fonctionnent (juin 1978). Les données déjà obtenues confirment les résultats des stations temporaires. Les rapports V_p/V_s sont de l'ordre de 1,78-1,80.

lorrain au nord-est d'Epinal (CHOU DHURY, 1977). de nombreux microchocs ont été enregistrés dont les épicentres et les profondeurs de foyers ont pu être calculés et interprétés. Par contre, la microsismicité a été très faible dans les Alpes-maritimes (CONDIS, HAESSLER et HOANG TRONG, 1978) : dans cette région le dernier grand séisme date de 1887 alors que dans les autres régions mentionnées ci-dessus des séismes importants s'étaient produits beaucoup plus récemment (1959, 1967, 1971) ; ainsi la microsismicité pourrait apparaître plus comme le reliquat d'une activité passée que comme le signe prémonitoire d'une activité future.

Dans le Bassin d'Aquitaine l'exploitation du gisement pétrolifère de Lacq s'est accompagnée depuis 1969 d'une activité sismique notable (ROT HE, 1972) dont l'étude a été poursuivie au moyen de stations mobiles : plusieurs centaines de microchocs ont été enregistrés ; de même le remplissage de la retenue de Sainte-Croix-du Verdon a entraîné le déclenchement de plusieurs dizaines de séismes dans l'aire concernée (HAESSLER et WITTLINGER, 1975 ; HAESSLER, HOANG TRONG et WITTLINGER, 1975 ; WITTLINGER et HAESSLER, 1975, 1976).

L'installation depuis 1973 d'un réseau sismologique à télé mesure et enregistrement magnétique déclenché (5 stations en Martinique, une en Dominique et 3 en Guadeloupe) a permis de préciser la sismicité, liée à la subduction de la plaque atlantique sous la plaque Caraïbe, dans la région centrale de l'arc des Petites Antilles.

Cette étude s'accompagne de la détermination des mécanismes focaux pour les séismes les plus importants. Les résultats ont été présentés dans la thèse de doctorat d'Etat de J. DOREL (1978).

L'implantation depuis 1963 d'un réseau sismique de 10 stations en Polynésie française a permis de détecter une activité sismique, jusque-là inconnue, dans le centre du Pacifique Sud ; la région de Tahiti-Mehetia a été étudiée en détail : l'observation d'essaims de séismes dans deux sites bien définis indique la présence de deux volcans sous-marins actifs (TALANDIER, KUSTER et MASSINON, 1976).

ETUDES REGIONALES DE SEISMICITE A L'ETRANGER

Les grands séismes du Frioul (mai et septembre 1976) ont fait l'objet de nombreuses recherches. Pour le choc principal (6 mai 1976) une carte macrosismique couvrant une grande partie de l'Europe a été tracée : en France la secousse a été ressentie assez fortement dans le fossé rhénan ; par contre elle n'a pas été perceptible sur le massif cristallin des Vosges ; en Alsace le rayon-limite de la surface macrosismique mesure presque exactement 500 km (KARNIK, ROT HE et al., 1976). Plusieurs équipes françaises ont participé sur le terrain à une étude particulièrement fructueuse des répliques ; plusieurs milliers de secousses ont pu être enregistrées et, pour la plupart, localisées en profondeur ; l'interprétation des résultats a fait l'objet de plusieurs réunions de discussions (EUROPEAN MEDITERRANEAN SEISMOLOGICAL CENTER, 1976 ; FINETTI et al., 1976 ; HOANG TRONG, WITTLINGER et HAESSLER, 1976 ; ROULAND et PETERSCHMITT, 1977 ; WITTLINGER, HOANG TRONG et HAESSLER, 1976 ; WITTLINGER, HAESSLER et HOANG TRONG, 1977 a, 1977 b ; WITTLINGER, 1977 ; BARBREAU et al., 1977 ; DELHAYE, MASSINON, MECHLER et RIGAUD, 1977).

Dans le cadre des recherches géophysiques concernant l'Afar (ancien territoire français des Afars et des Issas) l'installation de 6 stations permanentes a permis une très bonne détermination de tous les séismes du Golfe de Tadjoura, de l'Ouest du Golfe d'Aden et de la zone active émergée du Fossé d'Asal-Ghoubbet. A partir des données obtenues de 1974 à 1977 une étude de la sismicité régionale liée à la frontière en extension entre les plaques arabe et africaine a été réalisée ; 15 000 séismes ont été enregistrés (LEPINE et RUEGG, 1976 ; RUEGG, LEPINE et VINCENT, 1978).

Dans le but de corrélérer les données de la sismicité avec la tectonique des zones d'accrétion (pour la plupart situées en mer) des cartes bathymétriques ont été établies dans le golfe de Tadjoura au cours de plusieurs campagnes réalisées à partir de 1973. En 1977 une campagne de Géophysique marine a été effectuée à bord du navire océanographique "Le Suroit" dans le golfe d'Aden et le Sud de la Mer Rouge dans le but d'obtenir des données géophysiques et géologiques sur ces deux zones de jonction avec l'Afar.

L'activité sismique en Afghanistan a fait l'objet d'enregistrements par stations mobiles ; la répartition en profondeur des foyers des séismes intermédiaires de l'Hindou-Kouch a été étudiée (CHATELAIN et al., 1978).

L'étude systématique de la localisation des séismes algériens, de leur profondeur et de leur solution focale, étude portant sur la période un peu courte de 20 années (1950-1970), montre que la sismicité de l'arc de Gibraltar et du nord de l'Algérie ne peut être liée à une marge active mais plutôt à des accidents tectoniques connus ou à des frontières de domaines géologiques ; la convergence entre plaques Europe et Afrique ne se manifeste pas par une création de subduction lithosphérique mais par le rejeu d'accidents anciens (HATZFELD, 1976 ; GIRARDIN, HATZFELD et GUIRAUD, 1977 ; HATZFELD, FROGNEUX et GIRARDIN, 1977). Une étude d'ensemble a été publiée sous forme de thèse de Doctorat (HATZFELD, 1978).

Les effets de surface liés au séisme d'Orléansville (1954), observés sur le terrain par J.P. ROTHE, ont été à nouveau examinés et analysés sous l'angle structural ; une direction de raccourcissement SSE-NNW permet d'expliquer les plus significatives des structures engendrées ; le mécanisme au foyer est un mécanisme de faille inverse selon une direction de compression identique (ROTHE, LEPVRIER et TRUILLET, 1977).

Dans une thèse de Doctorat préparée à l'Université de Strasbourg EL SAID MAAMOUN (1976) a présenté un tableau d'ensemble de la sismicité du Moyen et du Proche Orient replacée dans le cadre de la séismotectonique mondiale.

LA CARTE SEISMOTECTONIQUE DE FRANCE

A l'initiative du C.E.A. une vaste étude de synthèse portant sur la géologie, la tectonique, la géophysique et couvrant l'ensemble de la France, a été entreprise ; elle doit aboutir au tracé d'une carte séismotectonique à 1:1.000.000. Une étude-test sur la Provence, effectuée au B.R.G.M., a marqué le début de la réalisation ; la carte géophysique présentée est celle des accidents profonds établie à partir des données magnétiques, gravimétriques et de prospections sismiques ; les cartes de sismicité ont été réalisées en collaboration avec J.P. ROTHE (BARBREAU et al., 1976).

Dans le cadre de la préparation de la carte séismotectonique J.P. ROTHE a rédigé une série de catalogues chronologiques régionaux de séismes couvrant l'ensemble du territoire français : pour chaque séisme on a cherché, chaque fois que cela était possible, à déterminer les coordonnées épicentrales ; des détails ont été donnés sur les intensités observées et éventuellement sur la localisation et l'ampleur des dégâts. Au total, sans compter les répliques et les séries de secousses (essaims), 2436 séismes ont été étudiés, portant sur la période 468-1976. Plus de 600 références bibliographiques figurent dans les catalogues régionaux.

Par ailleurs, J.P. ROTHE a préparé une liste des paramètres de 210 séismes importants ou destructeurs ressentis en France depuis l'année 579 et dont les épicentres permettent de définir 18 provinces séismotectoniques différentes. Cette liste doit être annexée à l'arrêté, actuellement en préparation, relatif à la prise en considération du risque sismique dans la sûreté des réacteurs nucléaires (ROTHE, 1976 a). A partir des données instrumentales et macrosismiques une liste de 205 séismes dont la magnitude a dépassé 4,0 au cours de la période 1901-1975 a été établie. Pour la France l'extrapolation du graphique fréquence-

magnitude conduirait à des périodes d'apparition des séismes de grande magnitude en contraction avec les données historiques ; on est amené à affecter à chaque grande région géologique française un chiffre de magnitude maximale (ROTHE, 1975).

Le Laboratoire de Détection et de Géophysique a repris l'étude des enregistrements effectués dans son réseau depuis 1962 ; 4000 séismes environ, dont les magnitudes se situent entre 1,5 et 6,5 ont été localisés en France et dans les pays limitrophes ; la carte des épacentres présente une grande similitude avec les documents antérieurs traduisant l'activité séismique "historique", documents basés soit sur les enregistrements de séismes de magnitude supérieure à 3,5 environ, soit sur les observations macroséismiques et les cartes d'isoseistes (DELHAYE et PLANTE, 1976, MENECHAL, MASSINON et PLANTET, 1978 ; PLANTET, 1978).

Des recherches approfondies, comportant en particulier l'examen minutieux des sources anciennes, ont permis à VOGT et à ses collaborateurs de réviser et de corriger un certain nombre de renseignements historiques ; les cartes qu'on peut tracer à partir de ces nouvelles données ne présentent par rapport aux documents antérieurs que quelques modifications localisées (VOGT et WEBER, 1978).

TECTONIQUE GLOBALE

Les travaux de tectonique globale s'appuient de plus en plus sur les résultats d'études de séismicité. On citera en particulier l'importante thèse consacrée par TAPPONNIER aux mécanismes de la déformation intracontinentale ; l'hypothèse du poinçonnement avec écrasement rigide-plastique a été appliquée à la collision Inde-Asie centrale : l'argumentation fait appel aux cartes d'épicentres, à de nombreux calculs de mécanismes au foyer et à l'existence de spectaculaires accidents photographiés par satellites (TAPPONNIER et MOLNAR, 1977 ; TAPPONNIER, 1977, 1978).

De son côté GRINDA explique la séismicité du Sud des Alpes par le jeu de trois tectoniques indépendantes : tectonique d'écoulement consécutive au soulèvement alpin, tectonique de distension autour de la Méditerranée occidentale, tectonique de décrochement intracontinentale indépendante des frontières des plaques (GRINDA, 1977).

SEISMICITE MONDIALE

Le Centre séismologique européen-méditerranéen (C.S.E.M.) qui fonctionne à Strasbourg sous la direction de E. PETERSCHMITT a diffusé de très nombreuses déterminations d'épicentres (580 en 1976 ; 570 en 1977). Des déterminations rapides ont été faites chaque fois que l'intérêt public ou scientifique l'exigeait ou que des demandes particulières étaient faites. C'est ainsi que la diffusion des premières informations (magnitude, analogie avec le séisme de 1940) concernant le séisme de Roumanie du 4 mars 1977 a pu être faite à 22 heures, deux heures après que le séisme se soit produit ; la première détermination précise de l'épicentre a été diffusée le lendemain à midi. Les anomalies de propagation constatées à l'occasion de ce séisme ont fait l'objet d'une note (PETERSCHMITT, 1977).

L'UNESCO a poursuivi la publication d'un "Résumé d'informations sur les catastrophes naturelles" ; le chapitre consacré aux tremblements de terre, rédigé par J.P. ROTHE, comporte dans chaque fascicule annuel l'indication des paramètres (heure-origine, coordonnées hypocentrales, magnitude) de 500 à 600 séismes classés par grandes régions séismotectoniques, des renseignements sur l'ampleur des dégâts causés par ces séismes et une bibliographie. Dans l'historique des séismes, 1976 s'inscrit comme une année particulièrement meurtrière avec un bilan de près de 700.000 morts : les tremblements ont fait en un an plus de victimes que n'en avaient causé tous ceux qui s'étaient produits au XX^e siècle ; on notera cependant que

l'énergie sismique totale libérée en 1976 est restée à un niveau normal, bien inférieur par exemple à celui qui avait caractérisé l'année 1906. Le bilan catastrophique du séisme chinois du 27 juillet 1976 montre que le problème de la prévision est encore loin d'être résolu ; l'évaluation précise du risque sismique reste l'une des tâches primordiales des sismologues (ROTHE, 1976 b).

BIBLIOGRAPHIE

- ACHELE H. et PETERSCHMITT E. (1977). – Refinement of geographical and seismic regionalisation, *Polish Acad. Sc., Public. Inst. Geophysics*, A-6 (117), Warszawa, p. 45.
- AUZENDE J.M., BONNIN J. et OLIVET J.L. (1975). – La marge nord-africaine considérée comme marge active, *Bull. Soc. géol. France*, (7), t. XVII, p. 486-495.
- BARBREAU A., BODELLE J., ESCALIER DES ORRES P., MOHAMMADIOUN B., VOGT J. et WEBER C. (1976). – Essai de confrontation de la sismicité historique et de données structurales nouvelles en Vence occidentale et centrale. *Bull. Soc. géol. France*, (7), t. XVIII, n° 5, p. 1111-1118.
- BARBREAU A., MOHAMMADIOUN B., FERRIEUX H. et MOHAMMADIOUN G. (1977). – Etude des répliques du séisme du 6 mai 1976 au Frioul, Réunion O.C.D.E. Rome, 11-13 octobre 1977 (Le tremblement de terre du Frioul et la conception parasismique des installations nucléaires).
- BLOT C. (1976). – Volcanisme et sismicité dans les arcs insulaires, Prévision de ces phénomènes, *Cahiers de l'O.R.S.T.O.M., Géophysique*, 13, 206 p.
- CHATELAIN J.L., ROECKER S., HATZFELD D., MOLNAR P. and PERRIER G. (1978). – Seismic activity in Hindu-Kush (Afghanistan), XVIème Assemblée générale C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- CHOUDHURY M.A. (1977). – Anisotropie de vitesse des ondes S dans la zone focale d'Epinal (Vosges), *C.R. Ac. Sc. Paris*, t. 284, Série B, p. 45-48.
- CISTERNAS A., GAGNEPAIN J. et RUEGG J.C. (1978). – Etude de la microsismicité et surveillance sismique de la région d'Arette (Pyrénées), XVIème Ass. gén. C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- CISTERNAS A., RUEGG J.C., HATZFELD D., MODIANO T., HOANG TRONG P., WITTLINGER G. (1978). – Microsismicité de la région Arette-Lourdes, XVIème Ass. générale C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- CONDIS C., HAESSLER H. et HOANG TRONG P. (1978). – Surveillance sismique de l'arrière-pays niçois (Alpes maritimes), XVIème Assemblée générale C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- DELHAYE A., LACHAIZE M. et SANTOIRE J.P. (1978). – Sismicité récente et tectonique de la bordure nord du Massif central français, XVIème Assemblée générale C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- DELHAYE A. (1976). – Etude de la sismicité récente de la région d'Oléron, Thèse de Doctorat de 3ème cycle, Université Paris VI, 21 janvier 1976, 59 p. et annexes.
- DELHAYE A. et PLANET J.L. (1976). – Sismicité générale de la France, *Bull. Soc. géol. France*, (7), t. XVIII, n° 5, p. 1095-1102.
- DELHAYE A., MASSINON B., MECHLER P. et RIGAUD (1977). – Quelques mécanismes au foyer concernant les principaux séismes du Frioul de 1976, Réunion O.C.D.E., Rome, 11-13 octobre 1977 (Le tremblement de terre du Frioul et la conception parasismique des installations nucléaires).
- DOREL J., ESCHENBRENNER S., VIODE J.P. (1975). – Sismicité de la Martinique, *C.R. Ac. Sc. Paris*, 280 D, p. 2203-2206.
- DOREL J. (1978). – 1) Sismicité et structure de l'arc de Petites Antilles et du bassin Atlantique. 2) Enregistrement des ondes P en France et anomalies d'atténuation. Thèse Paris, 21 nov. 1978, 326 p.
- EL SAID MAAMOUN M.M. (1976). – La sismicité du Moyen et du Proche Orient dans le cadre de la sismotectonique mondiale, Thèse de Doctorat es-Sciences, Université Louis-Pasteur, Strasbourg, 16 novembre 1976, 315 p.
- EUROPEAN MEDITERRANEAN SEISMOLOGICAL CENTER (C.S.E.M. Strasbourg) (1976). – Working group on the Friuli earthquakes : Revised hypocenters and magnitude determinations of major Friuli shocks 1976, Proceedings of the meeting on Friuli Earthquakes, 4-5 December 1976, Udine, *Boll. geof. teorica ed applic.*, vol. XIX, 72, p. 581-585.
- FINETTI I., GIORGETTI F., HAESSLER H., HOANG TRONG P., SLEJKO E. et WITTLINGER G. (1976). – Time-Space epicenter and hypocenter distribution and focal mechanism of 1976 Friuli Earthquakes, Proceedings of the meeting on Friuli Earthquakes, Udine, 4-5 december 1976.
- FOURNIGUET J. et WEBER C. (1978). – Etude des mouvements verticaux dans l'Est de la France à partir de nivellements répétés ; corrélation avec les données sismologiques, XVIème Assemblée générale C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- FRECHET J. (1978). – Sismicité du Sud-Est de la France, nouvelle méthode de zonage sismique, Thèse Doctorat 3ème cycle, Univ. sc. et méd. Grenoble, 29 juin 1978, 159 p.

- FRECHET J., POUPINET G. et PAVONI N. (1978). – Seismicity of Ubye-Queyras recorded in september-october 1977 with 11 portable seismographic stations, XVI^{ème} Assemblée générale C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- GIRARDIN N., HATZFELD D. et GUIRAUD R. (1977). – La sismicité du nord de l'Algérie, *C.R. sommaire Soc. géol. France*, 1977, fasc. 2, p. 95-100.
- GRANET M., HOANG TRONG P., LEGROS H. (1976). – Apport des spectres des ondes SH à l'étude des répliques sismiques. *Tectonophysics*, 31, p. 291-300.
- GRINDA L. (1975). – Mouvements actuels en Méditerranée occidentale, *Rapports Commission intern. Etude Méditerranée*, fasc. 23, 4 a, p. 39-44.
- GRINDA L. (1977). – Les causes de la sismicité du sud des Alpes occidentales, *Polish Ac. Sc., Public. Inst. Geophysics*, A-6 (117), Warszawa, p. 85-86.
- HAESSLER H. et WITTLINGER G. (1975). – Etude des séismes de la cuvette de Sainte-Croix-du-Verdon (Alpes de Haute-Provence), Rapport à l'Electricité de France.
- HAESSLER H., HOANG TRONG P. et WITTLINGER G. (1975). – Sur la sismicité au voisinage d'un lac-barrage et d'un champ de gaz naturel, Journée spécialisée "Rupture des Roches", Soc. géol. du Nord, Lille.
- HAESSLER H., HOANG TRONG P. et WITTLINGER G. (1978). – Microsismicité et tectonique : quelques résultats concernant la région d'Arete (Pyrénées-atlantiques), *C.R. Ac. Sc. Paris*, t. 286, série D, p. 1285-1288.
- HAESSLER H., HOANG TRONG P. et WITTLINGER G. (1978). – Expériences sismologiques au barrage de Sainte-Croix-du-Verdon, Participation Inst. Phys. Globe Strasbourg au Comité français des grands barrages, 20 p.
- HATZFELD D. (1976). – Etude de sismicité dans la région de l'Arc de Gibraltar, *Ann. Geophys.*, t. 32, fasc. I, p. 71-85.
- HATZFELD D. (1978). – Etude sismotectonique de la zone de collision ibéro-maghrébine, Thèse de Doctorat es Sciences, Université scientifique et médicale de Grenoble, 31 mars 1978, 281 p.
- HATZFELD D., FROGNEUX M. et GIRARDIN N. (1977). – Etude de sismicité dans la région de l'arc de Gibraltar et l'Algérie du nord, *Bull. Soc. géol. France*, (7), t. XIX, n° 4, p. 741-747.
- HOANG TRONG P. (1976). – Mission sismologique dans le Frioul, *Courrier du C.N.R.S.*, n° 21, p. 56-57, Juillet 1976, Ephémérides.
- HOANG TRONG P. (1977). – FRIULI Earthquakes of 1976 : seismological aspects, *Newsletter*, American Acad. in Rome, April 1977, 20 p.
- HOANG TRONG P. et ROULAND D. (1977). – Interventions sismologiques : séisme du 12.9.1977, Larrau (Pyrénées atlantiques), Rapport I.N.A.G., 4 p. et 2 cartes ; séisme du 10.10.1977, région de La Rochelle-Ile d'Oléron, Rapport I.N.A.G., 4 p., 5 fig.
- HOANG TRONG P., WITTLINGER G. et HAESSLER H. (1976). – Enregistrement et distribution temporelle des répliques, 80 heures après le séisme destructeur du Frioul (Italie) du 6 mai 1976, *C.R. Ac. Sc. Paris*, t. 283, série D, p. 611-614.
- KARNIK V., ROTHE J.P. et al. (1976). – Macro seismic Effects of the Friuli Earthquake of May 6, 1976, in Austria, Czechoslovakia, F.G.R., France, Poland, Switzerland and Jugoslavia, *Boll. geof. teor. ed applic.*, vol. XIX/72, p. 729-737.
- LEPINE J.C. et RUEGG J.C. (1976). – La sismicité du Territoire français des Afars et des Issas, (Colloque de la lithosphère océanique), *Bull. Soc. géol. France*, (7), t. XVIII, n° 4, p. 841-846.
- LEPINE J.C., RICHARD O., RUEGG J.C., TREUIL M. et VARET J. (1976). – Mise en évidence d'une zone de faille transformante reliant la vallée axiale de la dorsale de Tadjoura à celle de Ghoubbet Asal (T.F.A.I.), *C.R. Ac. Sc. Paris*, t. 283, série D, p. 9.
- MECHLER P. (1976). – Mécanisme du séisme d'Oradour-sur-Vayres (8 septembre 1976), *C.R. Ac. Sc. Paris*, t. 283, série D, p. 1727-1729.
- MENECHAL Y., MASSINON B. et PLANTET J.L. (1978). – Présentation de la carte de la sismicité instrumentale de la France, XVI^{ème} Assemblée générale C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- MOLNAR P. and TAPPONNIER P. (1975). – Cenozoic Tectonics of Asia : effects of a Continental Collision, *Science* (U.S.A.), 8 august 1975, vol. 189, p. 419-426.
- PAUTOT G. (1976). – Un volcan sur la pente armoricaine ?, *La Recherche*, n° 71, vol. 7, p. 866-867.
- PETERSCHMITT E. (1977). – Notes sur le séisme de Vrancea, Centre sismologique europeo-méditerranéen, 20 juillet 1977, 4 p.
- PETERSCHMITT E. (1978). – Le rôle du C.S.E.M. en cas de séisme catastrophique, XVI^{ème} Assemblée générale C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- PLANTET J.L. (1978). – Formules de magnitudes locales (ML et MD) adaptées à la sismicité de la France, XVI^{ème} Assemblée générale C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- PONTOISE B., LEPINE J.C. et RUEGG J.C. (1976). – Atténuation des ondes sismiques en T.F.A.I., *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), t. 18, p. 847-849.
- ROTHE J.P. (1972). – La sismicité de la France de 1961 à 1970, *Ann. Inst. Phys. Globe Strasbourg*, 3^{ème} partie, t. IX, voir page 117-118.
- ROTHE J.P. (1975). – Les recherches de sismicité historique et la magnitude maximale à envisager en un site donné, E.S.C. symposium on earthquake risk for nuclear power plants, Walferdange 20-22 octobre 1975, 5 p.

- ROTHER J.P. (1976a). – Séismicité de la France : I. Principaux séismes classés par provinces sismotectoniques, 13 p. ; II. (avec C. RADU), Séismes de magnitude supérieure à 4,0 (1901-1975), France et régions frontalières, 9 p., Service central de sûreté des installations nucléaires, groupe de travail : prise en compte du risque sismique dans la sûreté des réacteurs nucléaires, Paris.
- ROTHER J.P. (1976b). – Tremblements de terre, Résumé annuel d'information sur les catastrophes naturelles, UNESCO Paris, n° 9 (1974), p. 7-60 et une carte d'épicentres ; n° 10 (1975), sous presse ; n° 11 (1976), sous presse.
- ROTHER J.P. (1977). – Séismes et Volcans, coll. Que Sais-je ?, n° 217, 7ème éd., 51e mille, P.U.F., Paris, 127 p.
- ROTHER J.P., LEPVRIER C. et TRUILLET R. (1977). – Les déformations liées au séisme de 1954 d'El-Asnam (ex-Orléansville, Algérie), *Bull. Soc. géol. France*, (7), t. XIX, n° 3, p. 641-644.
- ROULAND D. et HOANG TRONG P. (1975). – Etude sismique de la zone du Zagros, (périmètre 51°-54° E ; 27°-29° N), Iran, Rapport à la Société E.L.F.
- ROULAND D. et PETERSCHMITT E., 1977. – On the computation of focal mechanism of Friuli earthquakes, *Boll. geof. teorica ed applic.*, vol. XIX, p. 889-894.
- RUEGG J.C., LEPINE J.C. et VINCENT C., 1978 – Microsismicité le long de la dorsale du Golfe de Tadjoura ; relations avec la tectonique de l'Afar, XVI^e Assemblée générale C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- TALANDIER J., KUSTER G. et MASSINON B., 1976. – Séismicité de la Polynésie française, *Bull. Soc. géol. France*, (7), t. XVIII, n° 5, p. 1103-1110.
- TAPPONNIER P. and MOLNAR P., 1977. – Active faulting and tectonics in China, *J. Geophys. Research*, 82, n° 10, p. 2905-2930.
- TAPPONNIER P., 1977. – Evolution tectonique du système alpin en Méditerranée : poinçonnement et écrasement rigido-plastique, *Bull. Soc. géol. France*, (7), t. XIX, n° 3, p. 437-460.
- TAPPONNIER P., 1978. – Les mécanismes de la déformation intracontinentale : exemple de la tectonique alpine en Asie et en Europe, Thèse de Doctorat d'Etat, Université des Sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, 23 mars 1978, 240 p.
- VOGT J. et WEBER C., 1978. – La carte sismotectonique de la France, XVI^e Assemblée générale C.S.E., Strasbourg, août 1978.
- VOGT J. – L'apport des archives à la connaissance géologique du Vaucluse : glissements, éboulements, séismes, *Etudes Vauclusiennes* n° 18, 1977. *La Gazette des Archives*, n° 98, N. 5, 1977.
- WEBER C. et COURTOT P., 1978 – Le séisme du Frioul du 6 mai 1976 dans son contexte sismotectonique. Colloque O.C.D.E. Rome à paraître dans : *Revue de géographie physique et de géologie dynamique*, 20, n° 3, p. 247-257.
- WITTLINGER G. et HAESSLER H., 1975. – Etude des séismes de la zone de Lacq (Pyrénées atlantiques), Rapport à la Société nationale des Pétroles d'Aquitaine.
- WITTLINGER G. et HAESSLER H., 1976. – Etude du rapport V_p/V_s avant et après la mise en eau d'un lac-barrage, *C.R.Ac. Sc. Paris*, t. 282, série B, p. 137-140.
- WITTLINGER G., HOANG TRONG P. et HAESSLER H., 1976. – Enregistrement des répliques du séisme destructeur du Frioul (Italie) du 6 mai 1976, Near-Field Seismology Symposium, XV^e Ass. génér. E.S.C., Krakow, septembre 1976.
- WITTLINGER G., 1977. – Time space epicenter and hypocenter distribution and focal mechanism of Friuli earthquakes, *Boll. geof. teorica ed applic.*, vol. XIX.
- WITTLINGER G., HAESSLER H. et HOANG TRONG P., 1977 a. – Etude des variations temporelles du rapport V_p/V_s pour les répliques des séismes du Frioul de 1976. *C.R.Ac.Sc.Paris*, t. 284, série B, p. 479-482.
- WITTLINGER G., HAESSLER H. et HOANG TRONG P., 1977 b. – Contribution to the near field study of the aftershocks of the earthquakes on May 6th and september 15 th, 1976 in Friuli (Italy), Proceedings of the specialist meeting on the 1976 Friuli earthquakes and the antiseismic design of nuclear installations, Roma, Italy, 11-13 octobre 1977.

III. SISMOGENESE

François CORNET

Institut de Physique du globe
5, place Jussieu 75005 PARIS

Un programme d'étude de sismogenèse a débuté en 1976 à l'Institut de Physique du Globe de Paris. Ce programme comprend actuellement des études purement théoriques sur la propagation des fractures, des études expérimentales sur l'activité sismique liée à l'injection d'eau sous pression en terrain granitique, des études de terrain sur la sismicité naturelle des Pyrénées atlantiques et plus particulièrement sur celle de la région d'Arette.

1. MODELISATION NUMERIQUE DE LA PROPAGATION DES FRACTURES.

Un modèle numérique, basé sur la technique des discontinuités de déplacements ou dislocations, a été mis au point pour étudier la propagation quasistatique des fractures (Cornet 1976, 1979). Ce modèle a été appliqué d'une part à l'étude du développement des fractures en champs de contrainte de compression (Cornet 1978), d'autre part à l'analyse de la propagation des fractures hydrauliques. Ce dernier aspect est actuellement appliqué à la mise au point d'une nouvelle technique de mesure des contraintes et de leurs variations temporelles (Cornet 1977a et b).

2. ETUDE DE L'ACTIVITE SISMIQUE LIEE A L'INJECTION D'EAU SOUS PRESSION

Après avoir considéré le comportement mécanique des roches saturées par un fluide (Cornet 1977c), un travail a été entrepris pour étudier l'activité sismique et acoustique liée à l'injection d'eau sous pression et à ses conséquences quant au développement de fractures hydrauliques (Cornet 1977d). Cette étude devrait permettre de préciser les contours des fractures hydrauliques et ainsi favoriser le contrôle des liaisons puits à puits nécessaires à l'exploitation de l'énergie géothermique des roches chaudes et sèches.

3. SISMOGENESE SUR LE SECTEUR D'ARETTE

Ce programme de recherche a débuté fin 1976, il a pour but de favoriser une approche pluridisciplinaire du problème de la prévision sismique. Un réseau permanent a été implanté sur le secteur d'Arette (Pyrénées Atlantiques) afin d'obtenir une surveillance continue de l'activité sismique de ce domaine. Simultanément des études de *sismicité* menées au moyen de stations temporaires a permis de préciser l'extension de la zone active (Cisternas et al.).

Des mesures d'inclinaison ont été entreprises ainsi qu'une surveillance des variations du champ magnétique de cette région. Finalement la mise au point d'une méthode de mesure de contrainte par surcarottage (Bonnehère et Cornet 1977) qui permet d'obtenir le tenseur complet des contraintes en une seule opération, a permis d'obtenir une quarantaine de mesures

dans la vallée d'Aspe. L'interprétation géomécanique de ces données sera entreprise en 1979 et se poursuivra normalement dans les années suivantes, au fur et à mesure que de nouvelles données de terrain seront obtenues.

BIBLIOGRAPHIE

- ANGELIER J., MECHLER P. (1977). – Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également applicable en tectonique de faille et en sismologie : la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Géol. France*, 7^e ser. 19, n° 6, p. 1309-18.
- BONNECHERE F.J. et CORNET F.H. (1977). – "In situ stress measurements with a borehole deformation cell" ; Field measurements in rocks mechanics ; Int. Symp. Zurich ; Kovari ed., p. 151-160.
- CORNET F.H. (1976). – "Crack propagation in rock normal to the maximum compression stress", N.S.F. report Grant nb GK 41220, National Science Foundation
- CORNET F.H. (1977 a). – "Application de la fracturation hydraulique à la mesure in situ des contraintes". Colloque Goguel, BRGM, Orléans. Mémoires BRGM n° 91, p. 173-181
- CORNET F.H. (1977 b). – "New hydraulic fracturing technique for deep in-situ stress measurements". Iaspei-Iavcei Meeting, Durham, workshop on stress measurements
- CORNET F.H. (1977 c). – Etude du comportement élastique et fragile des roches saturées par un liquide. *Revue Française de Géotechnique*, n° 2. p. 81-100.
- CORNET F.H. (1977 d). – Study of acoustic and microseismic emissions associated with a hydraulic fracture. *Geothermal Energy Seminar*, C.E.E., pp. 685-691, Bruxelles.
- CORNET F.H. (1978). – Crack Propagation in triaxial stress fields : a numerical investigation. A.G.U. Spring meeting, Miami, paper T 64. *EOS*, 59, p. 378.
- CORNET F.H. (1979). – Comparative analysis by the displacement discontinuity method of two energy criteria of fracture. *J. appl. Mechanics*, june 1979.
- MECHLER P. 1978. – Détermination du mécanisme au foyer d'un séisme. Exemple du séisme du Frioul (6 mai 1976). *Rev. Géogr. phys. dynam.* (2), 20, fasc. 3, p. 235-46.

IV. LA PROTECTION ANTISEISMIQUE

Général P. TEISSIER

Centre d'Etudes et Recherches sismologiques
26, Rue Censier, 75005 PARIS

Les Comptes Rendus quadriennaux des Travaux Français concernant la Séismologie n'ont pas jusqu'à présent consacré une rubrique à la Protection Antiséismique.

En effet depuis l'indépendance de l'Algérie (le séisme d'Orléansville fut la cause de l'établissement du Règlement français sur les constructions antiséismiques) la France est un pays peu concerné par les dangers séismiques (1). C'est pourquoi pendant très longtemps les officiers du Génie s'intéressèrent seuls aux dangers de destruction des constructions par les vibrations dans les solides (2). Mais il n'en est pas de même dans les pays à forte sismicité : ARNOULD [1], étudiant les primes d'assurances contre les dangers séismiques, donne quelques précisions significatives à cet égard : En 15 ans (1926-1950) les séismes ont fait 850 000 morts et 10 milliards de dollars de dégâts matériels. Au prix de la vie humaine (estimée en 1976 à 76 000 dollars en Europe et à 360 000 dollars aux USA) le séisme de 1971 à Los Angeles a coûté aux USA le quart de leur budget annuel. La prime d'assurance annuelle contre les seuls dégâts matériels dus aux séismes varie en Californie de 1,5 à 3 % de la valeur de l'immeuble, de 0,6 % à 5 % au Japon, de 0,2 % à 4,5 % en Turquie (suivant la région et la nature de la construction). La réduction de ces coûts justifie dans ces pays le supplément de dépense entraîné par la protection antiséismique.

En France, par contre, à l'heure actuelle, la protection contre les effets des séismes naturels ne provoque d'intérêt que pour deux motifs :

- l'énorme risque que courrait peut être la population dans un assez grand rayon autour d'une centrale nucléaire qu'un séisme détruirait ;
- le fait que beaucoup de grandes entreprises françaises sont appelées à construire des bâtiments, des ouvrages d'art, des centrales nucléaires très importants dans des pays étrangers où la sismicité est très grande.

Mais les grandes entreprises gardent pour elles les progrès qu'elles ont fait tant qu'ils ne sont pas suffisamment couverts par des brevets ou matérialisés par de grands travaux où tout le monde peut les déceler. C'est pour l'ensemble de ces raisons que les publications françaises ne sont pas plus nombreuses dans le domaine qui nous occupe. Nous les classerons en 5 catégories :

1. Réglementation

(1) Un seul tué de leur fait au cours des 50 dernières années sur ses territoires actuels. Le cas des îles-départements d'Outre-Mer est cependant particulier.

(2) Accident du pont suspendu d'Angers qui se rompit il y a plus de 100 ans par résonance sous le pas cadencé d'un bataillon. Rupture de grandes poutres en béton armé par inversion du moment de flexion au cours de la vibration imposée par l'éclatement de gros obus sur d'autres parties de l'arsenal pendant la guerre 1914-1918. Effondrement de grands ponts en maçonnerie par l'effet séismique de grosses bombes de 5 à 10 tonnes qui les avaient manqués en 1940-1945 et dont l'une avait d'ailleurs été baptisée "Tremblement de terre". Enfin destruction par effet séismique de cloisons et d'installation électriques de Télécommunications à l'intérieur d'abris restés indemnes mais secoués par l'explosion dans le sol à courte distance de grosses bombes en 1944 et d'une bombe atomique française en 1963.

2. Recherches expérimentales
3. Recherches théoriques ou mathématiques
4. Commentaires français sur des accidents sismiques survenus à l'étranger et description de mesures antiséismiques prises dans des cas concrets.
5. Protection contre les ébranlements sismiques dus à des tirs à l'explosif à courte distance (percement de tunnels, exploitations de carrières ou de mines)

Les références [2] et [17] indiqueront d'autre part ce qui a trait à l'installation (très générale en France) dans les grands barrages et les centrales nucléaires d'appareils d'enregistrement systématique des séismes très faibles. Les mesures sont, en réalité, faites pour déceler et étudier les vibrations transitoires dont l'origine est dans la construction elle même ou dans le sol d'appui, plutôt que les vibrations sismiques proprement dites.

I. REGLEMENTATION

1. Immeubles.

La réglementation française n'a pas été modifiée au cours de ces 4 dernières années. Elle reste donc dans l'édition 1976 [3] celle indiquée dans les "règles parasismiques 1969 et annexes". Toute réglementation devant nécessairement être mise à jour au bout d'un certain nombre d'années, diverses publications peuvent être rattachées à cette mise à jour :

- celle de DESPEYROUX sur les immeubles de grande hauteur [4] ;
- les commentaires de PHILIPPE [5] sur la réglementation japonaise ;
- l'étude [6] sur les particularités de comportement des structures précontraintes ;
- l'étude très générale [7] des principes concernant la sécurité en béton, armé ou non ;
- une note de FROMONT [8] sur l'emploi et la tenue aux séismes des structure en béton, armé avec des fers profilés étirés à froid au lieu des fers ronds classiques nervurés ou non ;
- l'étude de BORDET [9] qui préfère la carte des plus gros séismes historiques (en France on a leur relevé depuis l'an 1020 c'est à dire depuis plus de 750 ans) plutôt que la notion de "séisme maximum probable" (3).

2. Centrales nucléaires.

Une réglementation spéciale est en train de se développer [5, 8, 10 à 13].

En outre l'étude des équipements de ces Centrales a été faite par HURE [14] et HURE et MARYSE [15] en ce qui concerne les canalisations de gros diamètre suspendues ou enterrées, les réservoirs avec et sans surface liquide libre, les équipements électriques et électroniques. Signalons en particulier le résultat suivant : lorsqu'un matériel électrique et électronique satisfait aux conditions d'homologation "Marine" (normes françaises) il résistera aux séismes d'intensité VIII MSK.

3. Grands barrages.

Les Services d'Etat (Electricité de France et Génie Rural) qui les contrôlent en France imposent dans chaque cas particulier des règles de protection antiséismique qui varient en fonction de l'importance du barrage et du risque que sa rupture ferait courir à la population. On n'a donc pas établi de réglementation générale des barrages. Par contre on suit avec beau-

(3) Par exemple, le séisme d'Oléron en 1972 a dépassé le SMP de sa "province".

coup d'attention celle des pays très sismiques et les dégâts causés dans ces pays aux quelques barrages atteints ou détruits [16]. Enfin un article de BALDY et THEROND [17] donne des renseignements sur la surveillance sismique que l'on ne trouve d'ordinaire que dans les archives des barrages.

II. RECHERCHES EXPERIMENTALES

1. Centrales nucléaires.

A) En ce qui concerne le bloc de béton Armé ou Précontraint qui contient le Réacteur et son appareillage, une longue étude vient d'aboutir à un dispositif qui paraît bien au point : le bloc repose sur ses fondations par l'intermédiaire d'une série de plots en néoprène fretté occupant une vingtaine de centimètres en hauteur. Ces plots permettent au sol de se déplacer de ± 15 cm environ par rapport au bloc horizontalement. Le bloc revient élastiquement se remettre en place.

De plus, entre les plots et le bloc deux plaques métalliques inoxydables épaisses fixées l'une sur le bloc l'autre sur les plots glissent l'une par rapport à l'autre avec un coefficient de frottement réglable de 0,12 à 0,20. Dès que le sol tend à prendre une accélération supérieure à 0,20 g (réglage retenu actuellement) le bloc se déplace avec cette accélération par rapport à la plaque liée au sol par les plots. Le glissement cesse dès que l'accélération tombe au-dessous de 0,20 g.

La fiabilité et la durabilité de ce matériel ont fait l'objet de très longues expériences à diverses températures et aussi sur la grande table de simulation des séismes "VESUVE" de Saclay qui est la plus puissante d'Europe. Le système est installé dans les deux Centrales nucléaires en construction en Afrique du Sud, le sera en Iran et dans les nouvelles centrales nucléaires Françaises [18 à 23].

B) BERRIAUD, CEBE, LIVOLANT et BULAND [24] ont soumis un modèle de réacteur nucléaire à haute température à des accélérogrammes de séismes d'intensité VII et VIII MSK reproduits par la table "Vesuve". Ils ont comparé les relevés aux résultats d'un calcul d'un modèle non linéaire nettement plus représentatif que le modèle linéaire habituel.

C) Les équipements des Centrales nucléaires ont aussi été étudiés expérimentalement par les ingénieurs du Bureau VERITAS [14, 15].

2. Grands bâtiments

NAYROLES et DELFOSSE [25] ont étudié expérimentalement un modèle pesant près d'une tonne d'un immeuble de 20 étages reproduit à l'échelle de 1/20. La table de Marseille simulait les séismes de Taft et d'El Centro. Le modèle était fixé sur elle tantôt par des boulons (fondations encastrées) tantôt par l'intermédiaire de plots de néoprène armé. Les auteurs ont trouvé, en plus d'une très bonne fiabilité, que l'accélération et la vitesse maximales prises par les divers étages, l'effort tranchant et le moment de renversement étaient divisés par un peu plus de 8 par l'emploi du néoprène armé.

DELFOSSE [26] a complété ensuite le dispositif par un "stabilisateur de vent" pour éviter dans les plus hauts étages l'inconfort sous les rafales de vent violent : le stabilisateur se met lui-même hors circuit quand l'accélération dépasse celle due aux coups de vent les plus violents, et se remet ensuite automatiquement en service. Les caractéristiques mécaniques du néoprène armé employé sont indiquées dans (27).

3. L'amortissement dans les structures.

PAQUET [28] a voulu déterminer expérimentalement les modes de vibration, la flexi-

bilité et l'amortissement des structures réelles. L'emploi de phénomènes aléatoires naturels (vent, microséismes) est à éliminer parce que beaucoup plus long et moins précis et la méthode du "lâcher" n'est valable que pour les modes. Le procédé à employer est la vibration entretenue par des appareils à masse excentrée (balourds). Puis il démontre que l'obtention des valeurs de l'amortissement conformes à la réalité exige que dans le calcul matriciel l'amortissement soit représenté par une matrice non diagonale et qu'il n'est pas compatible avec l'assimilation courante à des systèmes d'un seul degré de liberté.

4. Poutres en béton armé.

Une étude expérimentale à la table "Vésuve" a été faite et comparée avec des résultats de calcul par LIVOLANT, HOFFMAN et GAUVAIN [29].

5. Fondations sur pieux

FENOUX [30] motive sa préférence pour les fondations sur pieux, en particulier lorsqu'il y a appui par la pointe. La fiabilité a été excellente dans toute la France et le contrôle phonique des pieux battus a toujours permis de déceler les malfaçons.

LEVANDIS et TASSIOS [31] ont soumis la tête de pieux battus dans divers sols à des vibrations horizontales aux fréquences sismiques pendant une période, plusieurs périodes, et un grand nombre de périodes. Ils ont mesuré la déformation et la variation progressive de la résistance dans des sols très différents.

6. Etudes diverses

On peut signaler : la partie relative aux critères de nuisance des vibrations dynamiques pour les personnes et les biens de BOCQUENET, GIRARD, LE HOUEDÉC et PICARD (32). Il y est fait mention de quelques dispositifs simples de protection contre les vibrations du trafic routier (centré sur 20 à 22 Hz) ; la partie sismique de l'étude du Laboratoire des Ponts et Chaussées [33] concernant la réfraction des vibrations sismiques sur les cavités souterraines à détecter ; en ce qui concerne les fondations, la détection par réfraction sismique de l'altération et de la diminution de résistance des roches granitiques en place de CHEVAS-SUS [34].

III. RECHERCHES MATHÉMATIQUES EN VUE D'AMÉLIORER LES MÉTHODES DE CALCUL ET DE RÉDUIRE LEUR DÉLAI.

L'étude et même la simple vérification de la tenue d'une structure aux séismes est interminable et finalement assez peu précise malgré l'emploi de gros ordinateurs (4). Il en résulte des dépenses importantes et un sérieux allongement des délais d'étude d'un projet. Aussi des recherches se poursuivent elles en vue d'arriver à des simplifications d'approximation suffisante.

1. Séismes de référence et spectres de réponse.

BORDET [9] demande le découpage de la France en "provinces" séismotectoniques beaucoup plus petites dans la carte en préparation, la connaissance de la France étant beaucoup plus précise que celles des USA et bien plus étendue historiquement. La plupart des séismes connus y ont leur foyer à faible profondeur (5 à 10 km) ce qui facilite le découpage, mais doit aussi faire prendre en compte dans les spectres de réponse des maxima d'amplification pour des fréquences plus élevées.

(4) Six degrés de liberté pour un poteau entre étages, de 3 à 15 modes de vibration significatifs par degré de liberté, de 12 à 55 étages dans les grands bâtiments, plus les poutres, les planchers, les murs et les fondations.

LIVOLANT, BARBREAU et COSTES [12] ont aussi étudié les accélérogrammes et les spectres de fréquence des séismes qu'ils ont retenus, ainsi que l'intensité MSK à leur appliquer en France. Ils en ont fait la simulation sur la table "Vésuve" et comparé les mesures aux calculs.

2. Fondations encastrées.

COSTES [35] a étudié une schématisation monodimensionnelle du sol et fait l'analyse de la réponse sismique des fondations encastrées.

3. Etude générale des structures

DELFOSE [36], grâce aux fonctions de Green, construit une matrice élémentaire de la flexibilité dynamique.

ARRIBERT et WALLECAMPS [37] proposent une méthode qui, pour les structures à nœuds (structures en acier le plus souvent), permet de ne faire intervenir qu'en 2^e étape, comme "corrections" en quelque sorte, les sollicitations de torsion et de flexion.

CHEBAT a consacré sa thèse d'Ingénieur Docteur [38] au calcul dynamique des bâtiments. Il la conclut en donnant un programme baptisé "SAMI" de calcul à l'ordinateur.

BETBEDER a traité de l'analyse sismique des Centrales nucléaires [13] et exposé leur analyse modale [39].

La tenue des réacteurs nucléaires sous les séismes a été étudiée [10,11] par JEAN PIERRE et LIVOLANT qui ont calculé l'effet des grands mouvements du sol sur le plancher de la future Centrale nucléaire Superphénix [40] ainsi que sur les poutres en béton armé [29].

IV. COMMENTAIRES SUR LES DEGATS SISMIQUES. — DOCUMENTATION SUR LES PRECAUTIONS ANTISISMIQUES PRISES DANS DIVERS OUVRAGES D'ART OU IMMEUBLES

1. Accidents sismiques

Le séisme de Roumanie du 4 Mars 1977 a fait 5000 morts dont 1500 dans 35 grands immeubles effondrés à Bucarest. Le maximum de l'accélération du sol a à peine atteint 0,20 g à Bucarest mais la fréquence du mouvement maximum a été 0,67. D'où de graves dégâts à des immeubles que leur basse fréquence propre aurait dû protéger et de faibles dégâts à des immeubles que leur fréquence propre menaçait dans le cas des spectres de fréquence que l'on prend d'ordinaire en compte. DESPEYROUX [41] attire l'attention sur ce qu'il faudra peut être modifier de ce fait la réglementation actuelle.

Les énormes pertes en vies humaines au cours du séisme de Managua du 4 février 1976 dérivent d'une toute autre cause : MONTENEGRO [42] signale en effet que les maisons sont construites en pisé avec contreforts tous les trois ou quatre mètres et que les toitures sont faites de branchages jointifs plus ou moins enchevêtrés et noyés dans une épaisse couche de pisé. C'est une situation typique que l'on retrouve partout en zone chaude chez les populations pauvres : sous l'effet d'un séismes la toiture fait fendre ou s'écarter les murs et vient écraser sous sa masse les occupants. Au Guatemala et au Nicaragua la situation est encore aggravée par la coutume d'installer des greniers à provisions au-dessus des logements et de faire le plancher intermédiaire comme le toit.

2. Précautions antisismiques dans divers ouvrages.

Ayant eu à réaliser en Tunisie un immeuble de 15 étages devant résister à l'intensité IX, MASTOURI [43] signale qu'il a dû le calculer par la méthode quasistatique du fait qu'il

n'existe pas en Tunisie de gros ordinateurs adaptés ni de tables vibrantes ni d'appareils de mesure pour employer la méthode modale ni à plus forte raison la méthode dynamique. C'est une confirmation de ce que nous disions en tête du paragraphe III.

PHILIPPE [44] décrit la structure antisismique du Mitsui Building au Japon (55 étages). Les fondations et le noyau central sur les premiers étages ont pu être réalisés en béton armé mais le reste de l'immeuble a dû être construit en acier malgré ses inconvénients.

Des précautions antisismiques sont relatées à propos des viaducs de Martigues [45] et de Stalussa [46] et, dans un très long article consacré aux Centrales nucléaires [47], on peut relever les mesures antisismiques qui y sont prises.

V. PROTECTION CONTRE LES EBRANLEMENTS SISMIQUES DUS AUX TIRS D'EXPLOSIFS

Il s'agit des méthodes d'emploi de l'explosif qui évitent d'occasionner des dégâts aux bâtiments voisins par ébranlement sismique lors de tirs assez proches ou au moment de l'effondrement brutal d'un édifice à détruire (cheminées d'usine le plus souvent).

En France, l'utilisation dans ces buts d'amorces à retards ou à microretards est tellement passée dans la pratique courante qu'elle ne donne même plus lieu à des publications. DE SAMBUCY [48] a cependant rassemblé dans un article les mesures de protection contre les effets sismiques sur les constructions anciennes de Lyon prises au cours du percement en pleine ville du Tunnel de la Croix Rousse et une étude a été publiée [49] au sujet des recommandations de l'AFTES sur les tirs à l'explosif et leurs effets sismiques.

Lorsque nous avons eu à tirer de très grosses charges d'un coup (de 5 à 10 tonnes) pour des expériences sismologiques, il a bien fallu nous fier à des formules établies par nous en fonction de la nature géologique supposée du sol. Nous croyons nécessaire de rappeler aussi l'existence de phénomènes dont on ne parle jamais qu'en hésitant : ceux du "guidage" des ondes sismiques auxquels donne parfois naissance la géologie du sous sol. Nous avons eu l'occasion de le constater au moins une fois avec une absolue certitude : 3 charges de 80 kg tirées à 2 secondes d'intervalle ont suffi pour faire fissurer à 3 km,100 de distance les murs de la cave et des 3 premiers étages d'un hôpital qui venait d'être construit. L'étude géologique détaillée du terrain a pu être faite : elle a expliqué le fait que des immeubles moins solides et plus proches n'aient subi aucun dégât : ils étaient en dehors du "guide d'onde".

D'autre part, dans les tirs, séismiques ou non, faits en surface ou à faible profondeur, une bonne part de l'énergie libérée l'est sous la forme d'une onde de choc aérienne. Or la vitesse de ces ondes est d'autant plus grande que leur surpression de crête est plus grande, ce qui n'est pas le cas des ondes sismiques. Après avoir calculé les charges et l'espacement des tirs (pour faire effondrer au sol un bâtiment en quelques secondes) de telle sorte que les ondes sismiques occasionnées par le choc sur le sol des débris successifs ne soient pas dangereuses pour les bâtiments voisins, il nous est arrivé d'être obligé de refaire tout ce calcul parce que, si les vitres et verrières les plus proches n'avaient rien à craindre des ondes de choc aériennes, par contre, à une certaine distance la superposition de ces ondes aériennes résultait en une surpression de crête dépassant celle que supportent les vitres.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ARNOULD, (1977). — Risques Géologiques, assurances et aspects légaux, séismes et inondations, données économiques et géologiques nécessaires au calcul des primes. *Bul. Lab. Ponts et Chaussées*, n° 87, p. 21-32.
- [2] La surveillance et la prévention contre les risques sismiques en France. *Rev. Industr. Minérales*, juin 1975, 57, n° 6, p. 308-12.

- [3] Les règles parasismiques françaises et leurs annexes. Paris, Eyrolles 1976
- [4] DESPEYROUX. — La construction des immeubles de grande hauteur en zone sismique. *Travaux*, n° 467 (14^e conf. des Journées Francophones de l'Urbanisme vertical)
- [5] PHILIPPE D. — La réglementation japonaise sur les immeubles de grande hauteur. *Construction*, nov. 1976, n° 11, 6p;
- [6] Conférences des Français au 7^e Congrès de la Précontrainte. Chapitre de la tenue aux séismes. New York, 26 mai-1^{er} juin 1974.
- [7] Principes de sécurité du 1^{er} ordre pour les codes de calcul du béton. Développement et réalisation des principes approfondis de la sécurité des ouvrages. Derniers progrès de la théorie des réalisations et des prévisions. *Communic. françaises à la Commission Européenne du béton. Bul. Lab. des Ponts et Chaussées*, n° 112, juil. 1976, 43 p.
- [8] FROMONT. — Les constructions mixtes. Profil à froid et béton. *Profil*, 14, mars-avril 1976, 4 p.
- [9] BORDET — Centrales Nucléaires et géothermie. Contribution à attendre des géologues dans l'analyse de leurs sites. Nécessité de l'étude de l'action des séismes sur leur site. Règles à appliquer. *Ann. Inst. du Bâtiment et des Travaux Publics*, 1976, n° 338, p. 73-98.
- [10] JEANPIERRE et LIVOLANT — Analyse de la tenue des réacteurs nucléaires aux séismes. Méthode de calculs et d'expérimentation. Colloque sur les méthodes d'étude et de simulation des chocs. oct. 1974, Lyon.
- [11] JEANPIERRE et LIVOLANT — Méthodes usuelles et analyse sismique des Centrales Nucléaires. Obtention des spectres de planchers avec application à deux centrales l'une à neutrons rapides, l'autre à eau pressurisée. Colloque des spécialistes OCDE sur la conception antisismique des réacteurs nucléaires. 1-3 déc. 1975.
- [12] LIVOLANT, BARBREAU et COSTES — Protection des Centrales nucléaires contre les séismes. Etude des mouvements sismiques. Les séismes de référence. Méthodes de calcul et essais sur tables vibrantes. *Rev. du Génie nucléaire*, n° 1 janv. 1977. 8 p.
- [13] BETBEDER — Analyse sismique des Centrales Nucléaires. Conf. à la Section Construction et séismes. Ecole Nat. Ponts et Chaussées, 1977.
- [14] Bureau VERITAS (HURE). — Règles pour la tenue aux séismes d'équipements et installations nucléaires. Oct. 1975. Note d'information M-164-BM 3, 53 p.
- [15] HURE et MARYSE. — Comportement d'une tuyauterie de réacteur nucléaire sous un séisme, amélioration des méthodes usuelles. *Bul. Tech. du Bureau Veritas*, 58, n° 2, fév. 1976.
- [16] Une révision du calcul sismique des grands barrages. Commission Internationale des grands barrages. Comité des tremblements de terre. Bul. n° 27, mars 1975.
- [17] BALDY et THEROND. — Le remplissage du lac de retenue de Ste Croix du Verdon. Contraintes enregistrées et surveillance sismique. *Travaux*, 493, mars 1975, 7 p.
- [18] Plichon. — Les élastomères frettés et les appuis à friction, moyens modernes de supportage antisismique. Colloque des Spécialistes OCDE, Déc. 1975, 17 p.
- [19] Plichon. — Appuis antisismiques pour Centrales Nucléaires. Conf. à la Section Construction et Séismes. E.N.P.C., oct. 1977.
- [20] Plichon. — L'utilisation des appuis en élastomères dans la construction parasismique. *Les Travaux Publics*, n° 1019, 1978.
- [21] JOLIVET et RICHLI — Un système de fondations antisismiques pour les Centrales Nucléaires. Conf. SMIRT à San Francisco 15-19 août 1977.
- [22] PAVOT, RENAULT et RICHLI. — Première application des appareils antisismiques à friction. La Centrale Nucléaire de KOEBERG en Afrique du Sud. Conf. 9 mai 1978 à l'Inst. du Bât. et des Trav. Pub., Paris (à paraître).
- [23] BETBEDER-MATIBET et LIVOLANT. — Protection des Centrales Nucléaires contre les séismes. *Revue PCM*, n° 10, oct. 1977.
- [24] BERRIAUD, CEBE, LIVOLANT et BULAND — Essai sur table vibrante du cœur d'un réacteur nucléaire à haute température. Comparaison avec les résultats obtenus à l'aide d'un modèle mathématique non linéaire. Colloque des Spécialistes OCDE, 1975.
- [25] NAYROLES et DELFOSSE — Projet de bâtiment prototype équipé du nouveau système antisismique GAPEC. Essai du modèle à la table vibrante. Rapport final à la DGRST 7571230, 9 p., 9 h.t.
- [26] DELFOSSE G. — Un nouveau système asismique très efficace : le système GAPEC. 6^e conf. Intern. du Génie Parasismique à New Delhi, jan. 1977.
- [27] NAYROLES B. — Le système GAPEC. *Courrier du CNRS* 1978, n° 27, p. 3-8.
- [28] PAQUET — Etude expérimentale du comportement dynamique des structures. *Ann. Inst. Bât. et Trav. Publ.*, dec. 1976, n° 345, 22 p.
- [29] LIVOLANT, HOFFMAN et GAUVAIN. — Mesures et calcul de poutres en béton armé soumises à des efforts dynamiques. Conf. sur l'analyse des structures des Centrales Nucléaires, leur projet et leur construction. (Rio de Janeiro, avr. 1978).

- [30] FENOUX. — Centrales nucléaires et Géothermie. Les fondations des Centrales. *Ann. Inst. Bâtiment et Trav. Publ.* 1976, N° 338, p. 73-93.
- [31] TASSIOS et LEVANDIS. — Effet répétitif de vibrations horizontales sur la tête des pieux, *ibid.* mars 1974, n° 105. Ser. Sol et fondations.
- [32] BOCQUENET, LE HOUEDÉC, PICARD et GIRARD. — Les vibrations dues au trafic routier. Action sur l'environnement, Isolation. *ibid.* 1978, n° 355, 14 p.
- [33] La détection des cavités souterraines. *Bul. Lab. des Ponts et Chaussées*, n° 92, nov.-déc. 1977.
- [34] CHEVASSUS. — Les roches granitiques et leur altération en Bretagne. Rapport de Recherche du Lab. des Ponts et Chaussées, 134 p., nov. 1977.
- [35] COSTES. — Schématisation monodimensionnelle du sol pour l'analyse de la réponse sismique dans le cas des fondations encastrées dans le sol. Centre d'Etudes Nucléaires de Saclay à Gif/Yvette.
- [36] DELFOSSE G. — Utilisation des fonctions de Green pour la construction d'une matrice élémentaire de flexibilité dynamique. *Ann. Inst. Bâtiment et Trav. Publics*, n° 325, p. 113-126, 1975.
- [37] ARRIBERT et WALLECAMPS. — Calcul des sollicitations de torsion et de flexion dues à des actions horizontales sur des structures à multi étages. *La Construction Métallique Française*. 1976, 13, n° 4, p. 6-20.
- [38] CHEBAT. — Calcul dynamique parasismique des bâtiments compte tenu des considérations économiques et des probabilités. Thèse Ing. Doct. 1978 (CNRS n° 2199) 187 p.
- [39] BETBEDER-MATIBET. — Analyse sismique modale. Journées de la Dynamique des sols tenues à l'Ecole Centrale. juin 1977.
- [40] JEANPIERRE et LIVOLANT. — Le calcul direct de la réponse des planchers (par le spectre en transformée de Fourier) aux grands mouvements du sol. Application au projet de réacteur rapide Super Phénix. Colloque ELCALAB, Berlin, 8-11 sep. 1975.
- [41] DESPEYROUX. — Analyse et Enseignements du séisme de Roumanie du 4 mars 1977. Etendue des dommages. Désordres sous l'action des séismes. *Actualités SOCOTEC*, n° 3, mars 1977.
- [42] MONTENEGRO. — Après le tremblement de terre du Guatemala : les dégâts aux constructions en adobe cause des désastres. Solution d'avenir. *Bâtir*, sept. 1976.
- [43] MASTOURI. — Immeuble de 15 étages résistant à un séisme d'intensité IX en Tunisie. *L'équipement*. n° 17, p. 65-70, juil. 1976.
- [44] PHILIPPE D. — Etude parasismique d'immeuble de grande hauteur au Japon. Le Mitsui Building de 55 étages. *Construction*, jan. 1977, 32, n° 1, 14 p.
- [45] DROIN et CORBIERES. — Le viaduc de Martigues. *Travaux*, dec. 1974, n° 477, 8 p.
- [46] Le viaduc de Stalussa en Italie du Sud. *Acier-Stahl-Steel* Fév. 1974, 39, n° 2, 11 p.
- [47] Les Centrales Nucléaires. *Travaux*, 1977, 113, n° 1019, 43 p.
- [48] DE SAMBUCY. — Le tunnel de la Croix Rousse à Lyon. *Bul. Lab. des Ponts et Chaussées*. Fév. 1974, 10 p.
- [49] A.F.T.E.S. Recommandations sur l'étude des effets sismiques des tirs à l'explosif. *Tunnels et Ouvrages souterrains*. Mars-Avr. 1974, 4 p.

En terminant ce relevé, nous nous devons d'adresser tous nos remerciements pour l'aide qu'ils nous ont apportée à M. MOHAMMADIOUN, Docteur ès Sciences au CEA, pour les Centrales Nucléaires, et à M. GRASSET, Ingénieur E.P. au Centre de documentation du Bâtiment et des Travaux Publics, en ce qui concerne les structures.

V. ONDES DIFFRACTÉES PAR LE NOYAU TERRESTRE

Yves ROCARD

Association A.L.P.E.N.S.

2, rue des Fossés St-Marcel — 75005 PARIS

Au début de notre période quadriennale, la France a décidé une campagne de tirs nucléaires souterrains au Pacifique.

J'ai pu faire à ce moment la remarque que l'on connaissait mal les ondes P K P des tirs nucléaires, du fait que les antipodes des principaux champs de tir (Névada, Kazakstan, Nouvelle Zemble, Lob Nor) tombent largement en mer loin de terres habitées, tandis que les antipodes de l'atoll de Mururoa, champ de tir prévu, tombent dans les parages de La Mecque, ce qui donne pour la limite des P K P (un cercle de 4000 km de rayon, à partir des antipodes) des zones très habitées et faciles d'accès, notamment le Sud-Est de la France, l'Est de la Suisse, l'Italie du Nord, l'Est de la Bavière, etc. . .

Cette situation a été appréciée par le L.D.G. (Laboratoire de Détection et de Géophysique) s'occupant de la détection lointaine des explosions nucléaires au Commissariat à l'Energie Atomique, qui a fait profiter A.L.P.E.N.S. de quelques unes de ses stations mobiles d'enregistrement lors des occasions qui s'offraient. M^{lle} BEAUFILS et quelques chercheurs du Laboratoire de Géophysique Appliquée, Professeur Pierre MECHLER, Université PARIS VI, ont participé au travail, ainsi que G. BONNET à la Station du L.D.G. à LORMES (Nièvre) dont nous aurons à parler.

Le point le plus intéressant à éclaircir était celui de la *frange caustique limite des P K P* ayant tangenté le noyau et connue pour procurer une amplification d'environ 10 sur les signaux arrivant à une distance de $143^{\circ}5$ de l'épi-centre. Cette donnée qui est la conclusion d'un travail de HAI (1963 — Annales de Géophysique) était obtenue à partir de deux bons exemples de séismes (Iles Tonga, Nouvelles Hébrides) ayant donné des rapports d'amplitude de 10 à 1 chacun sur deux sismographes par hasard bien placés en distance.

Il nous est apparu que les tirs nucléaires allaient pouvoir fournir beaucoup plus d'informations :

1 — La connaissance d'un point de tir permet de grouper un grand nombre de sismographes aux distances à expérimenter.

2 — Le fait qu'une série de tirs a lieu presque au même point permet de juxtaposer sur un même diagramme amplitude-distance, des données de sismographes déplacés d'un tir à l'autre, et définir la courbe d'amplitude pas à pas avec une grande densité de points.

3 — Les tirs ont lieu pratiquement à une profondeur minimum, qui, au point de vue sismique, procure des séismes de profondeur nulle, permettant d'observer une caustique des P K P pour des séismes superficiels.

L'expérience nous a montré en outre que le caractère concentré, quasi ponctuel du tir nucléaire, était nécessaire pour procurer une courbe amplitude-distance assez détaillée et reproductible d'un événement à l'autre, ce que nous n'avons jamais pu retrouver dans les séismes naturels.

Une autre conclusion concerne la sensibilité de la réception au point de vue "détection" des tirs nucléaires : si on est bien calé sur la frange dans une station à faible bruit, un tir d'un 1/2 KT donne des signaux parfaitement lisibles.

Ne pouvant dans ce rapport que donner les grandes lignes des résultats, nous les citerons plutôt dans un ordre historique.

1 - L'Atoll de Fangataufa (50 km de Mururoa) a envoyé vers le Sud-Est de la France des signaux PKP plus faibles que lorsque les tirs sont passés à Mururoa : probablement en raison de la structure Moho sous ces atolls.

2 - Le travail de HAI nous invitait à nous placer à $143^{\circ}5$ des tirs ce qui a conduit à expérimenter un sismographe sur la *côte des Chavants*, village des *Houches*, près de *Chamonix*, sur un granit en principe excellent : le bruit de fond dû aux passages de camions sur la route Genève-Chamonix située à 600 m de distance à vol d'oiseau a rendu impossible la détection de tirs même de 8 à 10 KT bien enterrés.

3 - Nous nous sommes alors déplacés à des distances un peu plus grandes des tirs, plus proches des antipodes. Un site au fond d'une galerie de mine du *Valgaudemar* a été équipé d'une petite cave qui reste disponible ; et nous avons trouvé une situation excellente à *Bonneval sur Arc*, au fond de la vallée de la Maurienne : le sismographe vertical courte période est installé près de l'enregistreur, à une altitude de 1800 m. Il est à 40 m d'une Centrale électrique qui le sature complètement par son bruit (à 12 Hz vraisemblablement 50 Hertz/4) mais on s'est débarrassé entièrement de ce bruit par un filtre passe bas à 5 Hertz - On ne trouve plus alors qu'un bruit de $40 A^{\circ}$, trois fois plus faible que dans les meilleures stations du Réseau Sismique Français - De plus, le bruit n'augmente pas dans le vent, propriété que nous n'avions encore jamais rencontrée. Bonneval-sur-Arc nous a paru mériter *une station permanente* que nous avons montée (G. BONNET) avec du matériel L.D.G.

Au point de vue des PKP de Mururoa, des tirs de l'ordre de 8 ou 10 KT et moins nous y ont donné des signaux excellents.

4 - Les stations fixes de *St-Paul-en-Forêt* et de *La Mourre* (vers Draguignan) du L.D.G. reçoivent des PKP sur les mêmes tirs, mais plus faibles qu'à Bonneval et surtout dans un bruit bien plus élevé, tandis que Lorgues (dans la même région) reçoit beaucoup moins bien. Nous avons expérimenté de nombreux sites provisoires dans l'extrême Sud-Est : le *Tanneron* atteint et dépasse *St-Paul-en-Forêt*, et on a enregistré des amplitudes doubles à *Castellar* au Nord de Menton.

Ceci incitait à passer en Corse : trois stations entre Calvi et Bastia nous ont fourni des amplitudes encore meilleures : le maximum se situait donc en mer.

5 - Nous avons eu ensuite connaissance des signaux obtenus à *Davos* (Suisse), *Gräfenberg* et *Bad Reichenhall* pour un tir de l'ordre de 10 KT, avec des amplitudes bien supérieures à ce que nous avions en France. Il devenait évident que le maximum de la frange caustique n'était pas à $143^{\circ}5$ mais plutôt au-delà de 145° .

En disposant alors quatre stations mobiles en Italie, lors d'un tir heureusement plus puissant (ordre de grandeur 100 KT) nous avons pu encadrer correctement le maximum de l'amplitude sur la caustique que nous plaçons avec assez de précision à $145^{\circ}55$ de distance de l'épicentre d'un séisme en surface.

6 - Les résultats (amplitude en fonction de la distance) obtenus lors de deux tirs à peu près aussi puissants et d'épicentres extrêmement voisins ont alors été portés sur un même diagramme qui dans sa première version fournissait une courbe [1] amplitude-distance pour la magnitude 5,8 définie par 32 points et plaçant à $15.000 A^{\circ}$ le maximum d'amplitude à $145^{\circ}55$.

Depuis, quelques éléments nouveaux nous sont parvenus.

a) un sismographe italien à Salo (Lac de Garde) a fourni un enregistrement avec $20.000 A^{\circ}$

Mais ce sismographe est installé sur un terrain d'alluvions qui peut procurer une augmentation d'amplitude par son impédance caractéristique ρc plus faible.

b) trois sismographes allemands dans les Alpes (Dr. GEBRANDE, Dr. SCHMEDES, Institut für theoretische und angewandte Geophysik, München) qui auraient été très bien placés en distance, ont fourni des signaux valant 1/2, 1/3 et 1/6 de ce qu'on aurait lu sur la courbe. Il semble que la structure géologique sous les Alpes dévie les signaux, même si elle ne module pas leurs amplitudes.

c) par contre, quand nous avons cherché l'extrapolation de la caustique au Nord des Alpes, vers Passau et la frontière autrichienne, un signal aussi fort qu'autour du Lac de Garde nous a appris que les phénomènes y redevenaient réguliers, la caustique y procurant la même amplification de signaux.

L'examen (même superficiel) de la répartition des amplitudes sismiques dans la région de la caustique appelle fatalement la remarque de *l'aspect* d'un ensemble de franges d'interférences.

J.P. MASSOT, chercheur au Laboratoire de Détection et de Géophysique du CEA, a eu le mérite de réaliser qu'il pouvait s'agir d'interférences réelles [2] : en partant de signaux synthétiques issus de sources soumises à un pas de déplacement de $0^{\circ}1$, il retrouve exactement la position en distance des pics d'amplitude principaux et secondaires. Ainsi les oscillations de la courbe d'amplitude peuvent s'expliquer par des franges d'interférences composées à partir de trois ondes (PKP₁ - PKIKP - PKP₂) suivant des trajectoires différentes mais arrivant en même temps à la précision d'une, voire deux périodes, soit une ou deux secondes, introduisant ainsi la notion de *fréquence* du signal dans la magnitude observée en un point.

Dans le cas de séismes profonds, le calcul comme la simple géométrie du phénomène vis-à-vis du noyau montrent que la distance de la caustique à l'épicentre va se raccourcir quelque peu : pour les séismes profonds (600 km) on va la retrouver à $143^{\circ}5$ environ, raccordant ainsi les résultats actuels pour la profondeur nulle, à ceux de Haï.

L'analyse des temps de propagation permet en outre à J.P. MASSOT de proposer provisoirement un modèle nouveau de la face externe du noyau [2].

REFERENCES

[1] ROCARD Y. - Les ondes sismiques interfèrent. *Pour la Science*, mai 1978, p. 12-14

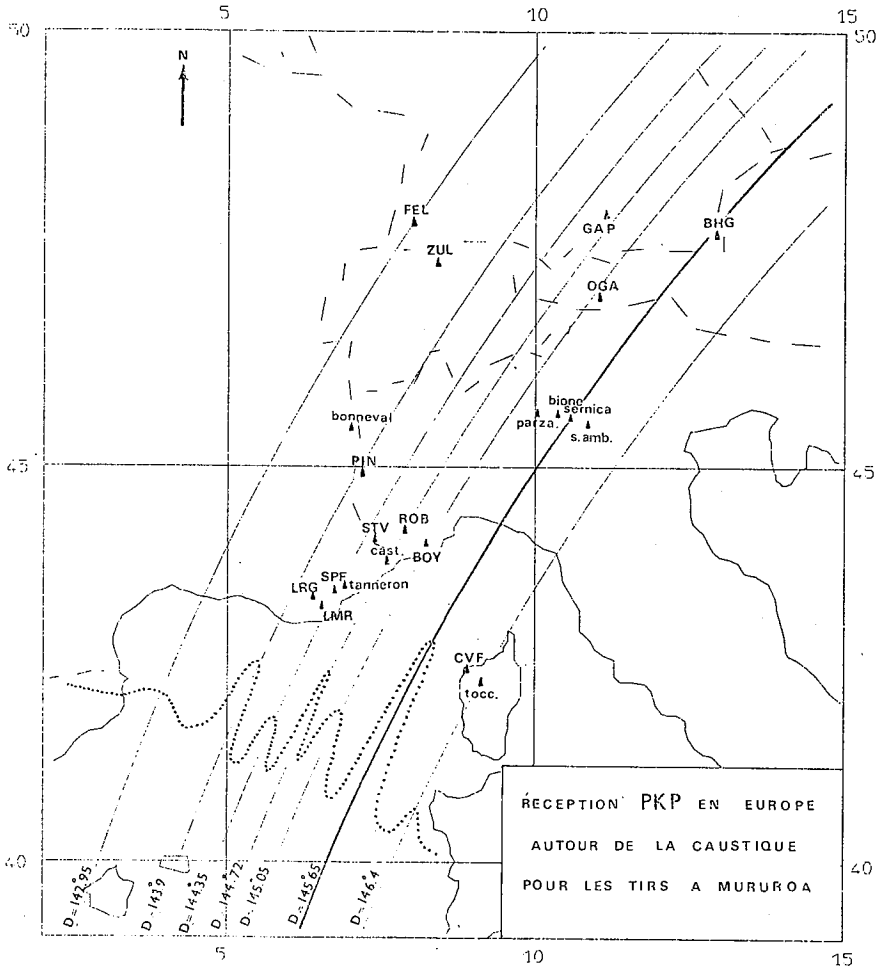
Il a été récemment possible de préciser l'influence d'un changement de puissance dans les tirs sur la forme de la courbe d'amplitude.

Lorsque, par exemple, le tir passe de 100 à 10 KT, la fréquence sur le sismogramme change de 1,0 à 1,4 Hz environ. Le changement de longueur d'onde provoque une modification de la courbe d'amplitude qui se déplace, de part et d'autre de la distance $145^{\circ}55$ pour la diffraction au bord du noyau interne, et, pour les interférences entre les différentes phases PKP, autour de la frange d'ordre zéro, définie sur la carte par une ligne Menton-Munich.

Le diagramme amplitude-distance indiqué sur la figure se déforme donc d'une manière assez complexe et, vers $145^{\circ}30$, nous prévoyons des stations possédant un minimum de sensibilité pour les gros tirs et un maximum pour les petits tirs, propriété qu'il est très avantageux de rechercher pour le travail de détection.

Grâce aux enregistrements fournis par les Drs H. Gebrande et P. Schmedes, on a pu mettre en évidence un tel effet, et trouver des stations présentant un record de sensibilité pour les petits tirs.

[2] MASSOT J.P. - Analyse des phases sismiques PKP reçues en Europe de tirs souterrains au Pacifique. Essai de modélisation. *Communic. CSE Strasbourg* 2 sept. 1978.



Courbe de variation de l'amplitude observée (en pointillé) suivant la distance à l'épicentre indiquée par les cercles concentriques. (d'après J.P. Massot).

VI. ETUDE DU MANTEAU ONDES SUPERFICIELLES ET VIBRATIONS PROPRES DE LA TERRE

Nelly JOBERT

Institut de Physique du globe, 4, place Jussieu, 75005 PARIS

MODELES REGIONAUX POUR LES ONDES P ET LES ONDES S

Des modèles pour les ondes S ont été obtenus jusqu'à 200 km de profondeur à partir de la dispersion des ondes de surface (A. Souriau-Thévenard, 1976 a et b). Cette étude est faite à partir de 3 stations mobiles à longues périodes à enregistrement numérique sur mini-cassettes, qui s'ajoutent aux observatoires permanents.

Pour les ondes P, une étude des résidus des temps de propagation des explosions nucléaires a été faite en France et dans le Benelux (A. Souriau-Thévenard, 1977).

Ces deux études ont permis de mettre en évidence l'existence de fortes hétérogénéités latérales du manteau supérieur. Dans les régions stables (Bretagne, Bassin Parisien, Bassin d'Aquitaine), on trouve une structure proche de celle des boucliers canadien et scandinave. Les modèles d'ondes S obtenus pour ces régions sont en bon accord avec ceux obtenus pour les ondes P à partir de grands profils sismiques. Contrairement aux régions stables, les zones d'extension oligocènes sont caractérisées par une couche à faible vitesse prononcée ; les Alpes, le Sud Est du Massif Central et le Bassin Algéro Provençal présentent également de très faibles vitesses, rappelant celle des rifts africains ou de l'Ouest des Etats-Unis. La bordure Nord des Pyrénées semble au contraire présenter des vitesses élevées, et l'étude des variations azimutales des résidus des temps de propagation des ondes P dans le fossé rhénan a montré l'existence possible d'anisotropie dans cette région (A. Souriau, 1978).

Une étude plus détaillée de la Belgique et du Luxembourg a été faite. Des structures anormalement lentes corrélées à de fortes anomalies gravimétriques y ont été mises en évidence, elles sont attribuées à l'existence possible d'appareils volcaniques sous ces régions (A. Souriau-Thévenard, 1979).

Pour l'étude des Pyrénées, où d'autres études ont lieu parallèlement (voir la rubrique Sismicité), 3 stations ont été installées par A. Souriau.

Ces études de structure profonde permettent une corrélation des paramètres caractéristiques du manteau supérieur avec le flux de chaleur, cette corrélation met en évidence l'apport de chaleur dû au refroidissement de la zone à faible vitesse.

D'autre part, une comparaison des structures hercyniennes et antécambriennes conduit à envisager une accréation de la croûte par différenciation de la partie supérieure du manteau (A. Souriau-Thévenard, 1978).

ONDES DE SURFACE ET STRUCTURE DES REGIONS OCEANIQUES

L'étude de la vitesse de groupe des ondes de Love et de Rayleigh engendrées par des séismes d'Afrique du Nord et enregistrées à Rabat et à Beni-Abes en Algérie, a conduit à envisager une croûte de vitesse assez faible et d'épaisseur totale de l'ordre de 30-35 km pour le Nord de l'Afrique (Cara, Hatzfeld, 1977). Par ailleurs, une mesure isolée de vitesse de phase

d'onde de Love entre les stations de Malaga et de Ifrane montre l'existence d'une couche sédimentaire très importante — de l'ordre de 10 km d'épaisseur — et suggère l'existence d'une croûte moyenne assez mince dans une région comprenant le Rif et la mer d'Alboran.

Des mesures de vitesse de groupe des ondes de Rayleigh ont été effectuées de part et d'autre de la ligne Açores-Gibraltar dans l'Atlantique. Les valeurs trouvées sont explicables par un modèle de bassin océanique classique compte tenu de l'épaisse couche sédimentaire existant près des marges continentales. Bien qu'un manteau anormalement lent ait été proposé au voisinage de la ligne Açores-Gibraltar, l'étude du projet AG-RBA montre que cette hypothèse n'est pas nécessaire pour expliquer les données (Cara, Hatzfeld, 1976, 1977).

La vitesse de groupe des ondes de Rayleigh dans les bassins du Cap-Vert et des Canaries entre 15 s et 30 s de période a été mesurée à partir d'enregistrements provenant des stations de M'Bour et Ponta-Delgada. Les courbes de dispersion obtenues, compte tenu de la couche d'eau, sont proches de celles du bassin océanique du Pacifique (L. Dorbath, 1976). On constate cependant que dans le Sud de la zone étudiée (région comprenant la crête de la Sierra Leone) les vitesses sont plus basses que la moyenne au-delà de 20 s et qu'au niveau des îles du Cap-Vert elles sont plus élevées.

L'analyse des ondes de Rayleigh sur des trajets parallèles à la dorsale des Reykjanes a permis d'observer un accroissement de la vitesse de groupe avec l'âge de la lithosphère (de 0 à 20 MA). Bien qu'une large famille de modèles soit compatible avec ces données, on trouve, en supposant qu'une zone à faible vitesse existe sous la lithosphère, que l'épaisseur de la lithosphère reste constante de 0 à 20 MA (60 à 80 km) et que la vitesse des ondes y croît avec l'âge. De plus, si la vitesse sous la croûte est supposée égale à 4.5 km/s (ondes S_p) (Evans, Sacks et Girardin, 1977), l'existence d'une zone partiellement fondue dans la "lithosphère" peut être envisagée pour les régions très proches de la dorsale (0-8 MA) (Girardin et Jacoby, 1978 ; Evans, Sacks et Girardin, 1976).

La variation de la distribution de la vitesse des ondes P avec la profondeur en milieu océanique est étudiée (N. Girardin) en associant l'écart des temps de propagation de l'onde PP (corrigé des anomalies de station et d'épicentre) avec le point de réflexion, et en comparant avec les réflexions sous un bouclier.

Dans le cadre de l'ATP "Géodynamique" de l'INAG, un projet de recherches sur la structure du manteau a été entrepris par N. Jobert et R. Gaulon. Une station à longue période a été implantée à Tahiti et fonctionne depuis janvier 1977 avec la collaboration de l'ORSTOM ; une deuxième station vient d'être installée à Kipapa (Hawaï) avec l'aide du Pacific Tsunami Warning Center.

FACTEUR DE QUALITE

Les recherches sur les écarts à l'élasticité parfaite par l'exploitation systématique des enregistrements numériques de 4 stations à très longue période des Instituts de Physique du Globe a permis un développement des recherches sur le facteur de qualité des vibrations propres de la Terre et de la vitesse de phase associée à un tour de Terre (G. Roult, 1975 ; N. Jobert, G. Roult, 1976).

Les estimations du facteur de qualité ont été obtenues pour les modes fondamentaux sphéroïdal et toroïdal et quelques harmoniques, dans le domaine de 100 à 600 secondes ; les moyennes de ces résultats ont été utilisées dans une inversion permettant d'obtenir un modèle de répartition du facteur de qualité intrinsèque avec la profondeur dans l'Intérieur du Globe : A. Deschamps (1977) a obtenu un modèle de dissipation pour la Terre en inversant les mesures du facteur de qualité des modes sphéroïdaux et toroïdaux. Les modèles obtenus sont similaires, avec deux zones de forte atténuation entre 100 et 350 km de profondeur, et en-dessous de 750 km de profondeur, et une zone de faible atténuation entre ces deux zones.

HETEROGENEITES LATERALES DU MANTEAU SUPERIEUR

Les écarts à la symétrie sphérique ont été étudiés d'un point de vue global, à l'échelle régionale et par modélisation.

Vibrations propres et ondes du manteau (mode fondamental)

Un procédé permet de mesurer, sur le spectre des vibrations propres obtenu en une station, les écarts systématiques en vitesse de phase liés aux hétérogénéités latérales le long du grand cercle, et obtenus habituellement par le procédé classique qui utilise les phases des différents trains d'ondes progressives (N. Jobert et al., 1978).

A très longue période, les vitesses de phase observées suivant des grands cercles sont nettement en relation avec les régions traversées par les ondes du manteau (N. Jobert et G. Roullet, 1976). Une recherche de régionalisation a été effectuée par J.J. Lévêque (1976, 1978) à l'aide de données anciennes et récentes ; une régionalisation du Globe en 4 zones (océans jeunes, océans anciens, boucliers, régions tectoniques) est la plus satisfaisante. Les vitesses de phase correspondantes mesurées pour les ondes de Rayleigh ont été inversées (vitesse des ondes S) et les modèles obtenus présentent des différences à des profondeurs supérieures à 300 km ; le modèle tectonique, en particulier, se caractérise par de grandes vitesses en profondeur. Les vitesses sont plus faibles pour les océans jeunes que pour les océans anciens, et les régions de bouclier ne présentent pas de couche à moindre vitesse.

Dispersion régionale des premiers modes supérieurs

L'analyse spatiale de trains d'ondes de surface à travers un réseau de stations sismologiques longue période s'étendant sur une distance de l'ordre de 4000 km rend possible la mesure de la dispersion des premiers modes supérieurs entre 20 et 100 s de période (Cara, 1976, 1977).

Le manque de pouvoir de résolution régionale intrinsèque à cette méthode pose un problème qui a pu être en partie résolu par l'utilisation de filtres en vitesse de phase, permettant d'isoler un mode d'ondes de surface avant d'en analyser la dispersion par des méthodes classiques. Une application à des enregistrements de séismes intermédiaires des Nouvelles Hébrides enregistrés aux Etats Unis a montré qu'on pouvait mettre en évidence des variations régionales : le premier mode supérieur de l'onde de Rayleigh, par exemple, présente des vitesses de phase plus élevées au centre des Etats-Unis qu'à l'Ouest de ceux-ci. Les vitesses de phase observées à travers l'océan Pacifique sur une lithosphère de 90 Ma sont par ailleurs proches de celles observées dans l'ouest des Etats-Unis (Cara, 1977, 1978a).

Une inversion linéaire de ces données a été faite en perturbant la vitesse des ondes S d'un modèle moyen de Terre (Cara et Deschamps, 1978). Les variations principales de vitesse des ondes S sont confinées dans les premiers 250 km de profondeur, l'Ouest des Etats-Unis présentant les vitesses les plus faibles et l'Est les vitesses les plus fortes. Entre 300 et 500 km de profondeur une situation inverse semble se présenter, bien que l'assez faible écart de vitesse obtenu à ces profondeurs soit à la limite des barres d'erreur des modèles. Aucune information ne peut être extraite de nos données aux profondeurs supérieures à 600 km. Les modèles absolus correspondants sont en bon accord avec ceux obtenus à partir du mode fondamental seul, pour l'Océan Pacifique et les Etats-Unis, dans les premiers 200 km de profondeur. Notons par ailleurs, que d'assez forts gradients verticaux de vitesse des ondes S ont été trouvés sous les Etats-Unis, vers 360 et 540 km de profondeur.

Une inversion d'un ensemble de données similaires pour l'Europe et le nord de l'Eurasie permet d'obtenir des informations sur les hétérogénéités latérales existant dans la distribution de la vitesse des ondes S jusqu'à 600 km de profondeur environ (M. Cara, Thèse 1978).

Contrairement à ce qui est trouvé dans les régions stables du centre et du Nord-Est des Etats-Unis, ainsi que dans l'ensemble de l'Ouest de l'Europe, on ne trouve pas de canal à moindre vitesse marqué dans le Manteau Supérieur pour des trajets joignant le Japon au Bouclier Scandinave et traversant le Nord de l'Eurasie.

Par ailleurs, une étude d'onde de Love entre le Nord du Bouclier Scandinave et le Sud du Bloc Ibérique (Nercessian, 1977), suggère l'existence d'une anisotropie des paramètres élastiques du Manteau Supérieur (Cara).

ONDES A LONGUE PERIODE CANALISEES DANS LE MANTEAU

A la suite de grands séismes, les appareils de stations françaises à très longue période enregistrent des phases distinctes des ondes du manteau (N. Jobert et al., 1977) : les trains d'ondes de différents ordres apparaissent (surtout la phase x d'ordre 2, trajet inverse) principalement sur la composante longitudinale, avec une vitesse de groupe variant de 7,5 à 5,5 km/s, et une période apparente de 40 à 200 s. Ces caractéristiques semblent peu dépendre de la profondeur du foyer.

Du point de vue des ondes de volume, ces trains d'ondes sont associés à des ondes S ayant subi des réflexions multiples à la surface de la Terre (vitesses de phase 9-10 km/s) ; l'interprétation proposée est un phénomène d'interférence entre des ondes nS et $nSmP$ à longue période, par couplage à la surface de la Terre entre des ondes P guidées par le gradient du manteau supérieur et des ondes SV guidées dans l'ensemble du manteau.

Une interprétation par modes normaux (N. Jobert, 1978) fait intervenir des extrema de vitesse de groupe associés à l'existence de gradients de vitesse dans le manteau comme pour les phases Sa. Pour des séismes superficiels, la superposition d'une dizaine d'harmoniques radiaux de vibrations sphéroïdales suffit à la construction de sismogrammes synthétiques dans le domaine de périodes et de vitesse considéré. La comparaison avec des enregistrements à longue période (Pérou, 3 oct. 74, Sumba 19 août 77) montre un bon accord avec le modèle global 1066 B de Gilbert et Dziewonski pour les arrivées d'ordre supérieur à 3. Il est nécessaire d'introduire une croûte continentale pour une bonne représentation de l'arrivée d'ordre 2 à Moulis, pour le séisme du Pérou, 1974.

BIBLIOGRAPHIE

- CARA M. (1976). — Observations d'ondes S_a de type SH. *Pure and Applied Geophysics*, 114, (4), p. 141.
- CARA M. et HATZFELD D. (1976). — Vitesse de groupe de l'onde de Rayleigh de part et d'autre de la ligne Açores-Gibraltar. *Ann. Géophys.*, 32, fasc. 1, p. 85.
- CARA M. et HATZFELD D. (1977). — Dispersion des ondes de surface de part et d'autre de la ligne Açores-Gibraltar et en Afrique du Nord (périodes inférieures à 80 s.). *Bull. Soc. Géol. de France*, XIX, n° 4, p. 757.
- CARA M. (1977). — Dispersion des deux premiers modes de l'onde de Rayleigh entre 50 s et 150 s de période. *C.R. Ac. Sci.*, série B, 284, p. 177.
- CARA M. and DESCHAMPS A. (1978). — Lateral heterogeneity in the upper mantle from higher Rayleigh modes. 1978 AGU Spring Meeting Report, EOS, *Transactions A.G.U.*, 59, n° 4, p. 319.
- CARA M. (1978a). — Regional variations of higher Rayleigh-mode phase velocities : a spatial filtering method. *Geoph. J.R. Astr. Soc.*, 54, p. 439.
- CARA M. — Etude du manteau supérieur à partir des harmoniques des ondes de surface. Thèse de Doctorat d'Etat, U. Paris VI, 14 déc. 1978.
- DESCHAMPS A. (1977). — Inversion of attenuation data of free oscillations of the Earth (fundamental and first higher modes). *Geophys. Journ. of the R.A.S.*, 50, p. 699.
- DORBATH L. (1976). — Vitesse de groupe des ondes de Rayleigh dans les bassins du Cap Vert et des Canaries. *Ann. Géoph.*, 32, p. 319.

- EVANS R., SACKS S. and GIRARDIN N. (1976). — A preliminary model of the structure of oceanic lithosphere in the area north of Iceland. Ann. Rep. of the Dir. Dept. of Terr. Magnetism, Carnegie Institution Year Book 76, p. 822.
- EVANS R., SACKS S. and GIRARDIN N. (1977). — Upper mantle structure beneath young oceanic crust from broad band seismic observations. 1977 A.G.U. Spring Meeting Report, EOS, *Transactions A.G.U.*, 58, n° 4, p. 510.
- GIRARDIN N. and JACOBY W. (1979). — Rayleigh wave dispersion along Reykjanes ridge. *Tectonophysics*, 55, Processes at mid-ocean Ridges.
- JOBERT N., CARA M. (1978). — Very long period mantle waves. A.G.U. Spring Meeting Report, EOS, *Transactions A.G.U.*, 59, n° 8, p. 811.
- JOBERT N. et ROULT G. (1976). — Periods and damping of free oscillations observed in France after 16 earthquakes. *Geoph. J.R.A.S.*, 45, p. 155.
- JOBERT N., GAULON R., DIEULIN A. et ROULT G. — Sur des ondes à très longue période, caractéristiques du manteau supérieur. *C.R. Ac. Sc.*, série B, séance du 6 juin 1977, 285, p. 49.
- JOBERT N., LEVEQUE J.J. et ROULT G. (1978). — Evidence of lateral variations from free oscillations and surface waves. *Geoph. Res. Letters*, 5, 7, 1978, p. 569.
- JOBERT N. (1978). — Contribution of some particularities in the dispersion curves to numerical seismograms computed by normal modes. *J. of Computational Physics*, Z. Alterman Memorial Issue, 29, n° 3, p. 404.
- LEVEQUE J.J. (1976). — Régionalisation du manteau supérieur à partir des dispersions des ondes superficielles. Rapport de D.E.A., IPG Paris, 1976.
- LEVEQUE J.J. — Régionalisation du manteau supérieur à partir des dispersions d'ondes superficielles à longue période. Thèse de Doctorat de 3e cycle, U. Paris Sud, 4 déc. 1978.
- MARTEL L. (1977). — Transmission et réflexion d'une onde de Rayleigh sur une marche. Comm. Seism. Européenne, Cracovie. *Publ. Inst. Géophys. Pol. Ac. Sc.*, A-6 (117), p. 145.
- NERCESSIAN A. (1977). — Profil en ondes transversales pour l'étude des vitesses de phase des ondes de Love. Rapport de D.E.A., IPG Paris.
- OKAL E.A. (1976). — A surface-wave investigation of the rupture mechanism of the Gobi-Altai (Dec. 4 1957) earthquake : *Phys. Earth and Planet. Inter.*, 12, p. 319-328.
- OKAL E.A. (1977). — The July 9 and 23 1905 Mongolian earthquakes : A surface wave investigation : *Earth Planet. Sc. Lett.*, 34, p. 326-331.
- OKAL E.A. (1977). — The effect on intrinsic oceanic upper-mantle heterogeneity or regionalisation of long-period Rayleigh-wave phase velocities : *Geophys. J.R. Astr. S.*, 49, p. 357-370.
- OKAL E.A. (1978). — Observed very long period Rayleigh wave phase velocities across the Canadian shield. *R. Astron. Soc. Geophys. J.*, 53, p. 663-68.
- OKAL E.A. — Application de la théorie des modes normaux à des problèmes de source et de structure sismique. Etudes sismiques de l'hétérogénéité latérale du manteau supérieur. Thèses de Doctorat d'Etat, U. Paris VII, mai 1978.
- ROULT G. (1975). — Attenuation of seismic waves of very low frequency. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 10, p. 159.
- SOURIAU-THEVENARD A. (1976a). — Structure profonde sous la France obtenue à partir des ondes de surface. *Bull. Soc. Géol. de France*, séance du 2/02/1976. XVIII, 5, p. 1085.
- SOURIAU-THEVENARD A. (1976b). — Structure of the crust and upper mantle in the South West of France, from surface waves. *Ann. Géoph.*, 32, fasc. 1, p. 63.
- SOURIAU A. — Anomalies des temps de propagation des ondes P pour les explosions nucléaires lointaines et structure profonde sous la France. *C.R. Ac. Sc.*, série D, séance du 16 mai 1977, 284, p. 2471.
- SOURIAU A. (1979). — Upper Mantle beneath the Paris Basin and Benelux, including possible volcanic anomalies in Belgium. *Tectonophysics* (sous presse).
- SOURIAU-THEVENARD A. — Le manteau supérieur sous la France et les régions limitrophes au Nord. Thèse de Doctorat d'Etat, U. Paris VI, 14 déc. 1978.

VII – ZONES DE CONVERGENCE ET LITHOSPHERE CONTINENTALE

Guy PERRIER

Laboratoire de Géophysique Interne
IRIGM – Université de Grenoble I
38041 GRENOBLE CEDEX – France

LES TELESEISMES ET LES HETEROGENEITES DE LA LITHOSPHERE CONTINENTALE

Un nouveau traitement des anomalies de propagation des ondes longitudinales P calculées à partir des données de 583 observatoires publiées par l'International Seismological Center entre 1964 et 1974 a été effectué par POUPINET (1977). Les résidus des ondes P ont été considérés comme un marqueur des propriétés du manteau supérieur. Des variations importantes ont été mises en évidence à l'intérieur des continents, et plus particulièrement dans les boucliers précambriens pour lesquels les résidus ont tendance à croître lorsqu'on s'éloigne de leurs centres. En première approximation, on observe une dépendance entre le temps de parcours des ondes sismiques et l'âge de la lithosphère à l'intérieur des plaques continentales stables. Cette dépendance du résidu avec l'âge peut s'expliquer par une décroissance du géotherme et un épaississement des plaques continentales après leur formation. On peut ainsi relier l'épaisseur de la lithosphère Z (km) à son âge t (en milliards d'années) par la relation $Z = 10 + 140 \sqrt{t}$. Un tel modèle d'évolution explique aussi la dépendance des valeurs du flux thermique avec l'âge comme cela a été proposé par Pollack et Chapman. D'autre part, le fait que le rapport des résidus des ondes S aux résidus des ondes P soit de l'ordre de 1,8, c'est-à-dire une valeur normale, beaucoup moins forte que celles antérieurement admises, incite à ne pas recourir à la fusion partielle généralisée pour expliquer les anomalies de stations mais à considérer que les anomalies de propagation sont essentiellement le reflet de la température de la lithosphère, parfois de l'asthénosphère.

Appliquée aux Alpes occidentales, une telle étude a montré l'existence d'une zone à moindre vitesse très prononcée à l'ouest de la zone d'Ivrea (POUPINET, 1976).

LES ZONES DE COLLISION CONTINENTALES

Dans le cadre des ses Actions Thématiques Programmées "Méditerranée occidentale" et "Géodynamique", l'Institut National d'Astronomie et de Géophysique a développé deux programmes d'études de zones de collision continentale : l'un dans la région ibéro-maghrébine (collision Afrique-Eurasie) en collaboration avec le Maroc et l'Espagne, l'autre dans l'ouest himalayen (collision Inde-Eurasie) en collaboration avec les USA (MIT).

Du point de vue structural, la mer d'Alboran est caractérisée par une croûte amincie (15 km) de caractère continental surmontant un manteau supérieur lent (7,7 km/s), structure qui est très proche de la structure d'un rift continental. Vers l'Espagne, la transition vers la marge continentale est caractérisée par un épaississement très rapide de la croûte alors que vers le Maroc, ce rapide épaississement est observé seulement pour la région rifaine tandis que dans la partie orientale marocaine, le plongement du Moho se fait de façon plus régulière. Enfin, la mise en évidence de fortes anomalies de vitesses entre les massifs de péridotites de Ronda et de Beni Bouchra semble indiquer une jointure de ces massifs en profondeur

(HATZFELD 1976, et Thèse 1978 ; HATZFELD et BEN SARI 1977 ; et plusieurs autres articles).

Dans l'ouest himalayen, en Afghanistan, une étude détaillée de la zone des séismes intermédiaires de l'Hindu Kush a été réalisée à l'aide d'un réseau portable de stations sismologiques. En trois mois de campagne, près de 1500 séismes de magnitude inférieure à 4 ont été enregistrés dans un domaine de profondeur s'étendant de 70 à 280 km. Les résultats développés par CHATELAIN, ROECKER, MOLNAR et PERRIER (1977) et CHATELAIN (1978) ont permis de montrer l'existence, dans la région de l'Hindu Kush - Pamir, d'une zone sismique continue arquée avec changement de la polarité du plongement de l'ouest (50° vers le nord) vers l'est (60° vers le sud-est). Des trous de sismicité sont observés à la fois en profondeur (trou entre 150 et 250 km qui va se rétrécissant d'ouest en est) et le long de l'arc (les séismes situés entre 70 et 100 km de profondeur le sont au centre de l'arc et non à ses extrémités). De plus, il faut remarquer une absence de sismicité entre la croûte supérieure et 70 km de profondeur ainsi qu'une extension, à l'ouest de la zone, de la sismicité à des profondeurs supérieures à 250 km, contrairement à ce qui était admis antérieurement. Par ailleurs, bien que contenus dans la zone plongeante, les axes de tension T sont en général inclinés par rapport à la direction de plongement. Une telle sismicité peut être reliée à la présence d'une subduction lithosphérique fossile. La sismicité superficielle étudiée principalement sur la faille de Chaman et sur son raccordement avec la faille d'Herat et le Nouristan est importante et continue. Elle apparaît étroitement liée avec la tectonique de surface, les mécanismes focaux montrant un coulisage sénestre sur la faille de Chaman, et une composante de compression voisine de l'horizontale et orientée sensiblement nord-sud dans le Nouristan.

LES ARCS INSULAIRES.

L'étude des anomalies des ondes P, S et ScS faite par CHOUDHURY, POUPINET et PERRIER (1975) pour des séismes du sud-ouest Pacifique enregistrés à la station antarctique de Dumont d'Urville (Terre Adélie) a montré une dépendance importante de ces anomalies avec la région focale (fortement positives pour les Nouvelles-Hébrides, moyennement positives pour les Fiji-Tonga, fortement négatives pour la mer de Banda) et la profondeur des séismes (disparition des anomalies au-delà de 200 km). Les auteurs ont proposé des modèles de vitesse des ondes transversales pour ces trois régions et les ont discutés en relation avec la lithosphère plongeante et les trous de sismicité observés en profondeur (PASCAL, ISACKS, BARAZANGI et DUBOIS, 1978). Une étude plus détaillée de la partie convexe de l'arc des Nouvelles-Hébrides a été faite par GOULA (1978). Deux anomalies importantes ont été décelées à l'ouest de la fosse sud de l'arc (reste de bassin marginal ?) et au niveau de la zone de fracture d'Entrecasteaux (accident transformant arc-arc ?)

PASCAL (1978) a relocalisé par la méthode de "Joint Hypocenter Determination" les séismes de la région Nouvelle Guinée - Nouvelle Bretagne - Iles Salomon pour la période 1964-1973. Intégrant les solutions focales, il a montré qu'une zone de subduction existe sous la Nouvelle Bretagne et les Iles Salomon alors que de la Nouvelle Irlande à la Nouvelle Guinée s'étend une zone de coulisage sénestre. Au nord de la Nouvelle Guinée, la sismicité doit être considérée comme le résultat d'une collision entre un continent et un arc insulaire. Dans cette région, la théorie de la Tectonique des Plaques ne peut s'appliquer rigoureusement. Un nouveau modèle géodynamique faisant également appel à la théorie des champs de lignes de glissement habituellement utilisée en domaine continental est donc proposé.

LE FLUX DE CHALEUR.

L'Action Thématique Programmée de l'INAG "Transfert d'Energie Thermique à travers l'écorce terrestre" a permis d'améliorer considérablement la connaissance du flux de chaleur

en France (GROUPE FLUXCHAF, 1978). Ce flux est en général supérieur à la moyenne mondiale continentale. Une zone de flux plus important orientée sud-ouest/nord-est et joignant le Massif Central aux Vosges doit être mise en relation avec les zones de distension marquées par les fossés d'effondrement oligocènes de Limagne, de Bresse et du Fossé Rhénan.

Les travaux concernant les sondages sismiques profonds dans les Alpes (auxquels il convient d'ajouter : THOUVENOT, 1976 ; MILLER, ANSORGE, ARIC et PERRIER, 1977) ainsi que les études de sismotectonique et de risque sismique dans la partie française des Alpes sont signalés, avec d'autres références bibliographiques, dans les chapitres Séismicité et Profils sismiques.

BIBLIOGRAPHIE

- BOUCHON M. (1978). — The importance of the surface or interface P-wave in near earthquake studies. *BSSA*, 68, 5, p. 1293-1311.
- BOUCHON M. (1978). — A dynamic source model for the San Fernando earthquake. *BSSA*, 68, 6, p. 1555-1580.
- BOUCHON M. (1978). — Représentation discrète des champs d'ondes sismiques dans le domaine des nombres d'onde avec application des problèmes variés de diffraction. Thèse de Doctorat d'Etat, Grenoble, 203 p.
- BUCHBINDER G. et POUPINET G. (1977). — P-wave residuals in Canada. *Can. J. Earth Sc.*, 14, 6, p. 1292-1304.
- CHATELAIN J.L., ROECKER S., HATZFELD D., MOLNAR P. et PERRIER G. (1977). — Etude sismologique en Afghanistan, Premiers résultats. *C.R. Som. Soc. Géol. France*, 5, p. 260-262.
- CHATELAIN J.L. (1978). — Etude fine de la sismicité en zone de collision continentale au moyen d'un réseau de stations portables : la région Hindu Kush - Pamir, Thèse de 3^{ème} cycle, Grenoble.
- CHOUDHURY M., POUPINET G. et PERRIER G., (1975). — Shear velocity from differential travel times of short period ScS in New Hebrides, Fiji-Tonga and Banda Sea regions, *BSSA*, 65, 6, p. 1787-1796.
- CHOUDHURY M.A., SUBHASH S.M.G., GIR R. (1977). Structure de la croûte sous l'Observatoire de Sainte-Marie-aux-Mines par l'analyse des ondes converties PS. *C.R.Ac.Sc.*, 285 B, p. 57-60
- GIR R., SUBHASH S.M.G., CHOUDHURY M.A. (1977). — The resolution power of spectral ratio method in crustal structure studies. *Publ. Inst. Geophys. Pol.*, A-4 (115), p. 297-311.
- GOULA X. (1976). — Anomalias en los tiempos de propagacion de ondas P en la region de Gibraltar. Implicaciones geodinamicas, 2d congreso nacional de geodesia y geofisica, Barcelone.
- GOULA X. (1978). — Structure du manteau supérieur dans la partie convexe de l'arc des Nouvelles Hébrides. Thèse de 3^è cycle, Grenoble.
- GROUPE FLUXCHAF (BERTAUX M.G., BIENFAIT G., BOTTINGA Y., FONTAINE J., GUYOT G., JOLIVET J., KAST Y., MEUNIER J., OTTLE J., PERRIER G., POUPINET G. et VASSEUR G.), 1978. — Nouvelles déterminations du flux géothermique en France. *C.R. Ac. Sc.*, 286 D, p. 933-936.
- HATZFELD D. (1976). — Etude sismologique et gravimétrique de la structure profonde de la mer d'Alboran : mise en évidence d'un manteau anormal. *C.R.Ac.Sc.*, 283 D, p. 1021-1024.
- HATZFELD D. et BOLOIX M. (1976). — Resultados preliminares de los perfiles sismicos profundos del mar de Alboran. *Com. Nac. Pro. Geod.*, Granada, p. 19-23.
- HATZFELD D. et BEN SARI D. (1977). — Grands profils sismiques dans la région de l'arc de Gibraltar. *Bull. Soc. Géol. France*, XIX, 4, p. 749-856.
- MILLER H., ANSORGE J., ARIC K. et PERRIER G. (1978). — Preliminary results of the Alpine longitudinal profile 1975 from France to Hungary, in "Alps, Apennines, Hellenides", Inter-Union Commission on Geodynamics. *Sc. Report* N° 38, Stuttgart, p. 33-39.
- PASCAL G., ISACKS B.L., BARAZANGI M. et DUBOIS J., 1978. — Precise relocations of earthquakes and Seismotectonics of the New Hebrides island, *JGR*, 83, 10 p. 4957-4973.
- PASCAL G. (1979). — Seismotectonics of the Papua-New Guinea-Salomon islands regions. *Tectonophysics*, sous presse.
- PERRIER G. (1978). — Tremblements de terre en Dauphiné-Savoie. *Ingénieur* 1, 27, p. 5-7.
- POUPINET G. (1976). — Sur l'existence d'un manteau à très faible vitesse sous les Alpes occidentales et ses implications tectoniques. *Bull. Soc. Géol. France*, XVIII, 5, p. 1073-1083.
- POUPINET G. (1977). — Relation entre le temps de parcours vertical des ondes sismiques et l'âge de la lithosphère continentale. *C.R. Som. Soc. Géol. France*, 5, p. 257-259.
- POUPINET G. (1977). — Hétérogénéités du manteau terrestre déduites de la propagation des ondes de volume. Implication géodynamique. Thèse de Doctorat d'Etat, Grenoble.
- THOUVENOT F., (1976). — Sondages sismiques profonds Alpes 75. Premiers résultats sur la structure de la lithosphère entre les massifs du Revard (France) et du Gothard (Suisse). Dipl. Ing. Géophys., IPG Strasbourg.

VIII – PROFILS SISMIQUES

Alfred HIRN

Institut de Physique du Globe
4, Place Jussieu, 75005 PARIS

La détermination de la structure profonde par la sismologie expérimentale a été employée pour des problèmes divers dans des régions variées, en milieu continental et océanique :

I – Croûte continentale :

- zones de dépressions tertiaires telles que la liaison entre vallée du Rhin et vallée du Rhône (Michel, 1978) et la basse vallée du Tage au Portugal (1978).
- chaînes de montagnes récentes telles que la Cordillère Bétique en Espagne (Working group for deep seismic sounding in Spain, 1977), les Alpes septentrionales (Alpine explosion seismology group, 1976) et les Pyrénées (1978).
- passage continent-mer, au voisinage de la Corse (Hirn et Sapin, 1976 ; Morelli et al., 1977) et dans la région de la mer d'Alboran (Working group for deep seismic sounding in the Alboran Sea, 1977).

II – Manteau supérieur sous le continent :

- dans la lithosphère sous l'Ouest de la France (Hirn et al., 1975) et dans le domaine lithosphère-asthénosphère entre cette région et l'Angleterre (Hirn, 1977).

III – Croûte océanique :

- l'étude a été concentrée dans la région des îles Açores, singulières par leur position au voisinage de la dorsale atlantique (1978).

IV – Manteau supérieur sous la mer :

- dans le bassin occidental de la Méditerranée (Hirn et al., 1977) et au voisinage de la dorsale active de l'Atlantique au Nord des Açores (Steinmetz et al. 1976 et 1977 ; Bottinga et Steinmetz, 1978).

La plupart des opérations d'acquisition de données ainsi que leur interprétation ont été menées à bien avec la collaboration de collègues allemands, britanniques, espagnols, italiens, portugais et suisses.

Sauf exception, l'échantillonnage spatial des structures étudiées ne permet pas une détermination des hétérogénéités locales mais aboutit à une description de paramètres moyens et de leur variation à l'échelle de la dizaine de kilomètres.

I.1 – Dépressions tertiaires

Dans la zone de liaison entre fossés rhénan et rhodanien, on peut individualiser, comme dans le graben rhénan, le sud de la vallée du Rhône et l'Auvergne, une région où la profondeur de l'interface croûte-manteau est réduite par rapport aux régions bordières ; cependant, sa variation relative n'est ici que de 10 % au lieu de 20 %. Cette région anormale semble s'étendre du sud du Fossé Rhénan vers l'Auvergne plutôt que constituer une liaison avec la zone anormale du sud de la vallée du Rhône ; ceci met en relief une direction transversale par rapport à l'axe méridien de ces dépressions tertiaires.

Une analyse préliminaire des données concernant la dépression du Tage au nord de Lisbonne indique aussi la corrélation de cette dépression avec une remontée de l'interface croûte-manteau, probablement asymétrique.

L'amincissement crustal, particulièrement important si l'on ne considère que la croûte non sédimentaire, ainsi établi dans différentes dépressions tertiaires d'Europe de l'ouest indique que des mécanismes plus complexes qu'un simple effondrement de blocs crustaux doivent être envisagés dans les modèles de leur évolution géodynamique.

I.2 - Chaînes de montagnes récentes

Dans la Cordillère Bétique comme dans la zone axiale des Pyrénées, un épaississement important de la croûte, que l'on peut rapprocher de celui connu dans les Alpes, a pu être établi. Les structures internes de ces croûtes épaissies pourront être bien définies et comparées pour aboutir à la discussion de leur mode de genèse.

Dans la zone nord-pyréenne, une variation le long de la chaîne de la position et de la nature de la transition croûte-manteau ainsi que des différences importantes de la nature de la croûte sous les sédiments sont apparentes en première analyse. L'interprétation complète de ces données permettra de préciser les hypothèses de formation de la chaîne et fournira un cadre structural pour les études de sismicité et tectonique en cours.

I.3 - Bordure du continent

Les enregistrements de tirs en mer obtenus en Corse indiquent une épaisseur de croûte normale de 30 km sous ce micro-continent. L'interface croûte-manteau varie très fortement en profondeur à l'ouest de la marge occidentale de la Corse, pour atteindre à cinquante kilomètres à l'Ouest une profondeur voisine de 13 kilomètres, analogue à celle trouvée dans le bassin algéro-provençal.

II - Manteau supérieur continental

L'existence d'une structure fine de la lithosphère subcrustale sous l'ouest de la France, proposée dès 1973, a pu être confirmée par des expériences complémentaires dans cette région. Au lieu de l'unique onde Pn considérée classiquement comme se propageant jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres de distance, on observe entre 140 et 700 kilomètres de distance des fortes explosions la succession de trois ondes de caractéristiques différentes. Ceci ne peut s'expliquer dans un manteau supérieur homogène et atteste la présence de deux réflecteurs dans la lithosphère subcrustale, vers 50 et 85 kilomètres de profondeur. C'est seulement par la considération des amplitudes des ondes en plus de leurs temps de propagation que la loi de vitesse en fonction de la profondeur peut être déterminée.

Cette structure fine de la lithosphère peut être une cause d'imprécision dans les déterminations d'hypocentres quand des stations sismologiques dans l'intervalle 150 à 1500 kilomètres sont utilisées. La continuité spatiale d'une telle structure stratifiée de la lithosphère serait favorable à la propagation à grande distance des ondes Pn et Sn de la sismologie d'observatoire et si la couche à moindre vitesse située au-dessus du réflecteur à 50 km de profondeur a un comportement rhéologique particulier, elle peut être importante à considérer pour la compréhension du comportement géodynamique de domaines continentaux à l'échelle régionale.

L'obtention de données exceptionnellement denses sur des profils de 1500 kilomètres de long a permis de mettre en évidence un interface plus profond, vers 195 kilomètres, qui correspond au domaine de la couche à faible vitesse de l'asthénosphère. Des différences entre les quelques profils disponibles ainsi qu'une propagation particulière des ondes S pourraient s'expliquer par une anisotropie de vitesse sismique au voisinage d'une transition lithosphère-

asthénosphère. L'échantillonnage actuel ne permet pas d'établir définitivement l'existence d'une telle couche anisotrope qu'il serait fondamental de préciser, sa profondeur pouvant correspondre à celle où se produirait le mouvement entre plaque continentale et milieu sous-jacent et sa direction pouvant indiquer celle de ce mouvement.

Les mesures effectuées depuis, ailleurs en Europe sur de longs profils, grâce à l'intérêt de ce type d'étude démontré par les premiers profils en France, permettent d'affirmer maintenant que la lithosphère inférieure possède généralement une structure fine dont les caractéristiques et la variation spatiale devront être considérées pour la compréhension de l'évolution des domaines continentaux.

III – Domaine océanique : plateau des Açores.

Un profil traversant la dorsale Atlantique entre les deux îles septentrionales des Açores montre que les signaux sismiques se propagent normalement dans la croûte à travers la zone axiale alors qu'aucun signal engendré dans une bande de 50 kilomètres centrée sur la dorsale et se propageant dans le manteau supérieur n'a pu être observé ; ceci atteste la profonde perturbation du manteau supérieur dans la région axiale. A la différence, aucune atténuation anormale n'est constatée pour les ondes se propageant dans le manteau à l'aplomb du rift de Terceira (entre les îles de Sao Miguel et Terceira) dont la nature est quelquefois assimilée à celle de la dorsale Atlantique.

Une étude détaillée de la croûte entreprise pour deux des îles de l'archipel met en évidence un épaississement d'au moins 50 % de la croûte par rapport à une croûte océanique normale, cet épaississement étant surtout le fait des couches océaniques 1 et 2, de vitesse sismique inférieure à 6 km/s. Des variations locales dans la structure crustale permettent d'étendre en profondeur l'étude des hétérogénéités de structure visibles en surface.

IV.1 – Manteau supérieur océanique près de la dorsale Atlantique

Des profils de plusieurs centaines de kilomètres de long ont été effectués parallèlement à la dorsale Atlantique au nord des Açores ; ils permettent une étude de la structure de la partie mantélique de la lithosphère pour deux âges différents de celle-ci : 4 et 9 millions d'années. Le profil sur la lithosphère la plus récente met en évidence un réfracteur à vitesse 8,3 km/s à 9 kilomètres de profondeur ; dans la lithosphère plus ancienne un réfracteur de vitesse analogue est trouvé à une profondeur de l'ordre de 30 kilomètres. Un premier modèle de vitesse calculé à partir d'un modèle pétrographique permet une interprétation qualitative de ces observations : les deux réfracteurs correspondraient à deux couches de péridotite résiduelle. Si on admet une pénétration d'eau à un taux de 2 % dans la couche supérieure, des réactions d'hydratation pourraient expliquer la diminution de vitesse qui y est observée au fur et à mesure de son refroidissement, c'est-à-dire de son vieillissement et de son éloignement de la dorsale. Ces données expérimentales conduisent à de nouvelles tentatives de calcul d'un modèle pétrologique afin de rechercher un meilleur accord quantitatif des différentes observations.

IV.2 – Manteau supérieur sous le bassin de la Méditerranée Occidentale.

Les sismogrammes obtenus en Corse à partir d'une ligne de tirs allant jusqu'aux Baléares permettent en plus de l'onde Pn de vitesse apparente inférieure à 7,8 km/s, de définir deux autres branches d'hodochrone entre 150 et 350 kilomètres de distance. Les retards de ces arrivées et la courbure des hodochrones amènent à interpréter ces ondes comme réfléchies par des interfaces dans le manteau supérieur.

Les ondes Pn obtenues confirment une profondeur de 11 à 13 kilomètres pour l'interface entre la croûte et un manteau dans lequel la vitesse, 7,7 km/s, est plus faible que la normale. Différentes lois de vitesse dans un manteau supérieur à stratification horizontale peuvent

rendre compte des données, par exemple une couche entre 11 et 26 kilomètres de profondeur où le gradient de vitesse avec la profondeur est positif, une couche à faible vitesse de 5 à 10 kilomètres d'épaisseur et, à 60 kilomètres de profondeur, une discontinuité où la vitesse diminue fortement. Ce modèle détaillé n'est pas en contradiction avec celui déduit de la dispersion des ondes de surface.

Une estimation du géotherme conduit à supposer une relation entre la diminution de vitesse à 60 kilomètres de profondeur et une fusion partielle dans le manteau. La nature de la couche à gradient positif sous la croûte et celle de la couche à faible vitesse intralithosphérique peuvent être expliquées par l'hydratation d'un manteau pyrolitique ou la différenciation du manteau lors de sa mise en place à l'origine de ce bassin marin profond.

A la suite de ces campagnes de sismologie, il est apparu nécessaire de réaliser un sismographe fond de mer dont le prototype utilise des sphères auto-flottantes cédées par l'Institut de Oceanographic Sciences (G.B.).

Sept instruments ont été mis en œuvre en juillet 78 pour enregistrer en Adriatique des tirs de réfraction dans le cadre d'une campagne de mesures italienne. Au cours de l'automne d'autres tirs de réfraction ont été enregistrés avec succès en Méditerranée orientale en coopération avec les Universités de Tel Aviv et Hambourg.

On peut dès lors envisager l'augmentation de la durée d'enregistrement, l'équipement en trois composantes, le passage à l'enregistrement numérique, ainsi que d'équiper l'engin de capteurs autres que les sismographes.

BIBLIOGRAPHIE

- BOTTINGA Y. ET STEINMETZ L. (1979). – A geophysical, geochemical, petrological model of the submarine lithosphere *Tectonophysics* (sous presse).
- HIRN A., PRODEHL C. et STEINMETZ L. (1975). – An experimental test of models of the lower lithosphere in Bretagne (France). *Ann. Géophys.*, 31, 517-530.
- HIRN A. (1976). – Sondages sismiques profonds en France. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 18, 1065-1071.
- HIRN A. et SAPIN M. (1976). – La croûte terrestre sous la Corse : données sismiques. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 18, 1195-1199.
- HIRN A. (1977). – Anisotropy in the continental upper mantle : possible evidence from explosion seismology. *Geoph. J.R. Astr. Soc.*, 49, 49-58.
- HIRN A., STEINMETZ L. et SAPIN M. (1977). – A long range seismic profile in the Western Mediterranean Basin : structure of the upper mantle. *Ann. Géophys.*, 33, 373-384.
- MECHLER P., MSEDDE R. (1977). – Structure du manteau supérieur sous la mer Méditerranée. *Publ. Inst. geophys. Pol.* A-4 (115) p. 331-43.
- MENDES VICTOR L.A., FORJAZ V.H. et HIRN A. (1978). – Explosion seismology on Sao Miguel and Terceira (Azores). *EOS*, 59, p. 321.
- MICHEL B., 1978. – La croûte entre vallée du Rhin et vallée du Rhône : interprétation de profils sismiques et résultats structuraux. Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VII, 133 p.
- MORELLI C., GIESE P., CARROZZO M., COLOMBI B., GUERRA I., HIRN A., LETZ H., NICOLICH R., PRODEHL C., REICHERT C., ROEWER P., SAPIN M., SCARASCIA S. et WIGGER P. (1977). – Crustal and upper mantle structure of the northern Apennines, the Ligurian Sea and Corsica, derived from seismic and gravimetric data. *Boll. Geof.*, 75-76, 199-260.
- RUEGG J.C. (1975). – Structure profonde de la croûte et du manteau supérieur du Sud Est de l'Afar d'après les données sismiques. *Ann. de Géoph.* 31, n° 3, p. 329-60.
- RUEGG J.C. – Main results about the crustal and upper mantle structure of the Djibouti region (TFAI). Proc. Symp. Afar Reg. Bad Bergzabern, vol. I, p. 120-134, Stuttgart 1975.
- STEINMETZ L., HIRN A., SAPIN M., WHITMARSH R. et MOREIRA V. (1976). Zone of P wave attenuation beneath the crust of the Mid-Atlantic ridge. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 18, 931-936.
- STEINMETZ L., WHITMARSH R. et MOREIRA V. (1977). Upper mantle structure beneath the Mid-Atlantic ridge north of the Azores based on observations of compressional waves. *Geophys. J.R. astr. Soc.*, 50, 359-380.
- WORKING GROUP FOR DEEP SEISMIC SOUNDING IN SPAIN 1974-1975 (1977). – Deep seismic soundings in Southern Spain. *Pageoph*, 115, 721-735.

WORKING GROUP FOR DEEP SEISMIC SOUNDING IN THE ALBORAN SEA, 1977. Crustal seismic profiles in the Alboran Sea, preliminary results. *Pageoph*, 116, p. 167-180.

ALPINE EXPLOSION SEISMOLOGY GROUP (1976). — A lithospheric profile along the axis of the Alps, 1975. *Pageoph*, 114, 1109-1130.

IX — PROSPECTION SISMIQUE

Dominique MICHON

Compagnie Générale de Géophysique
6, rue Galvani F 91301 MASSY

Gérard GRAU

Institut Français du Pétrole
F 92506 RUEIL-MALMAISON

A la suite du quadruplement du prix des produits pétroliers à la fin de 1973, l'activité géophysique aura connu un niveau d'activité élevé au cours de la période examinée 1975-1978.

En particulier, l'activité sismique a fortement progressé dans le continent Nord-Américain où s'effectuent plus de la moitié des opérations géophysiques mondiales. La C.G.G. a pu ainsi consolider ses positions sur ce territoire où elle compte actuellement en activité 12 équipes sismiques terrestres, un bateau géophysique et trois centres de calcul.

L'Institut Français du Pétrole s'est équipé d'un nouveau navire de prospection sismique, le "*Resolution*" bien adapté à l'exploration géophysique des bassins sédimentaires profonds et des marges continentales.

La méthode sismique réflexion pour la recherche pétrolière absorbe plus de 90 % des dépenses géophysiques mondiales. Au cours de ces 4 années, elle a considérablement évolué, débordant le cadre de l'étude des formes des horizons géologiques. Elle permet maintenant de répondre avec de plus en plus de précision aux nouveaux objectifs qui lui sont assignés tels que : recherche directe des hydrocarbures, mise en évidence de changement de faciès ou de porosité, évaluation des réservoirs.

Aussi, une coopération plus étroite s'est-elle établie entre géologues et géophysiciens lors de la définition des objectifs et de l'interprétation des résultats.

EVOLUTION DES METHODES TERRAIN :

Le nombre de traces par tir continue à progresser. Après la généralisation de l'exploitation en 48 traces, les études à 96 ou 120 traces deviennent plus nombreuses, aussi bien en terrestre qu'en marine.

La possibilité de disposer d'appareils à grand nombre de traces favorise la sismique dite haute résolution pour laquelle on réduit l'intertrace (30 m au lieu de 100 m) et le pas d'échantillonnage (2 ms au lieu de 4 ms).

Les techniques en 3 dimensions encore peu employées sont limitées à des études de gisement en mer. Dans ce cas, on adopte le plus souvent une grille régulière de profils serrés (50 m entre profils). La méthode par profil large de C.G.G. continue toutefois à présenter de l'intérêt pour des études à terre à plus grande échelle, du fait de son prix de revient moins élevé.

L'exploration par ondes transverses est maintenant industrielle. Différents moyens d'émissions d'ondes S sont mis en oeuvre : la méthode du camouflet par explosifs ou cordeau détonant, développée par C.G.G. et I.F.P. dans le cadre de la coopération franco-soviétique, le Marthor, mis au point par l'I.F.P., le vibreur horizontal. Dans leur ensemble, les résultats ont confirmé l'intérêt de la méthode, en ouvrant un champ nouveau pour l'interprétation stratigraphique.

Le procédé Mini-Sosie (a), imaginé par la S.N.E.A. (P), donne des résultats très satisfaisants pour la sismique à faible profondeur d'investigation notamment pour la recherche de charbon ou de poches de gaz superficielles et dans les zones où l'environnement interdit tout déploiement de matériel important.

EVOLUTION DES EQUIPEMENTS DE TERRAIN

Sources terrestres

Les explosifs sont utilisés par plus de la moitié des équipes de prospection, la vibrosismique environ par le tiers. La coupure haute fréquence des vibrateurs a été portée de 40-50 Hz à 70-80 Hz afin d'augmenter la définition.

C.G.G. a conçu et développé un procédé de chute de poids par hélicoptère, le DROPTER (b), afin de pouvoir réaliser des études sismiques dans des zones inaccessibles aux véhicules, où les explosifs sont prohibés pour des raisons écologiques comme dans certains lieux des Montagnes Rocheuses.

L'Institut Français du Pétrole a réalisé le MARTHOR, source sismique à percussion montée sur véhicule, qui est utilisé pour émettre des ondes SH qui peuvent être polarisées selon les deux directions perpendiculaires au profil enregistré.

L'Institut Français du Pétrole a également mis au point une source sismique légère (SOURSILE) dans laquelle l'impulsion sismique est provoquée par la chute d'une masse de 400 kg, guidée à l'intérieur d'un tube, sur un dispositif de couplage avec le sol. Montée sur un véhicule léger, cette source sismique trouve son application pour les études de petite réfraction, de sismique réflexion à faible profondeur ainsi que pour les carottages de vitesse dans les sondages.

Sources marines

Des études théoriques et empiriques conduites en particulier à la station d'essai C.G.G. de Marseille, ont permis des améliorations sensibles du Vaporchoc (b) : meilleure fiabilité liée en particulier à l'emploi de nouvelles électrovannes, possibilité d'adapter le spectre du signal aux objectifs géologiques, emploi de vannes plus puissantes (PV 80 au lieu de PV 50), utilisation de multitrompes qui conduisent à une meilleure définition tout en conservant la même puissance.

L'Institut Français du Pétrole a poursuivi le développement du FLEXICHOC dont une version plus légère, de 50 cm de diamètre, s'est révélée parfaitement adaptée aux études de sismique à haute résolution grâce à la qualité du signal émis. Ce modèle, dénommé FHC 50, est installé dans des châssis qui peuvent être remorqués à des profondeurs allant jusqu'à 7 mètres, à des distances dépassant 100 mètres, donnant ainsi la possibilité de constituer des dispositifs allongés de sources multiples.

Enregistrement des mesures

L'appareil numérique portable SN 338, à virgule flottante construit par SERCEL, a eu un succès commercial important, puisque 200 unités ont été mises en service dans le monde entier, y compris aux Etats-Unis.

(a) Marque déposée S.N.E.A. (P).

(b) Marque déposée C.G.G.

SERCEL lance sur le marché à compter de 1977 un appareil télémétrique à très grand nombre de voies : le SN 348, qui représente une nouvelle génération d'équipements de terrain : numérisation de l'information au niveau de la trace, d'où suppression des distorsions et diaphonies et allègement du dispositif (un seul câble à 6 conducteurs quel que soit le nombre de traces). Ce système permet d'enregistrer 500 traces échantillonnées toutes les 4 ms, ou 250 traces - 2 ms ou 125 traces - 1 ms, chaque échantillon comportant 14 bits plus le bit de signe.

Un système d'enregistrement de données sismiques à haute résolution a été développé par I.F.P. (système HR 6300). Cet appareil peut enregistrer en mode numérique et en virgule flottante instantanée les signaux sismiques avec des pas d'échantillonnage allant de 1/8 de milliseconde pour des dispositifs de 6 traves à 1/2 milliseconde pour des dispositifs de 24 traces.

TRAITEMENT ET INTERPRETATION DES DONNEES

Les moyens mis en place sont adaptés au volume des données sismiques à traiter : soit ordinateurs puissants du type Cyber de CDC, installés par C.G.G. dans les capitales pétrolières telles que Londres, Calgary, Houston, Denver, soit mini-ordinateurs lorsque le niveau de production ne dépasse pas généralement 5 équipes terrestres ou une équipe marine. C.G.G. a développé à cet effet le GEOMAX (b), construit autour d'un Raytheon RDS 500 muni d'un "array processor". Ce système qui peut être mis en place rapidement au voisinage immédiat d'une mission sismique comprend la quasi totalité des programmes disponibles dans les centres lourds.

Les installations de traitement sismique de l'I.F.P. ont été renforcées par l'addition de terminaux Hewlett-Packard dont un peut être relié soit au Centre de Calcul CDC de l'I.F.P., soit à celui de C.G.G. à Massy et qui permet le traitement interactif.

La Division Géophysique de l'I.F.P. dispose également du GEOPROCESSEUR pour réaliser le démultiplexage ainsi que les analyses de vitesses des données en provenance des équipes expérimentales et leur traitement automatique en couverture multiple.

Le navire "Résolution" est équipé d'un système de traitement en temps réel, construit autour d'un ordinateur Hewlett-Packard, qui, grâce à un programme original, réalise d'une manière automatique le traitement de la sismique réflexion en couverture multiple d'ordre 24.

D'importants efforts de recherche et de développement sont consacrés tant par les sociétés pétrolières que par les sociétés de service au développement de software d'application.

Parmi les programmes développés par la C.G.G., citons :

- le traitement des profils sinueux, qui entraîne une simplification considérable de la mise en œuvre en zones montagneuses ou habitées ;
- l'analyse des corrections statiques résiduelles, basses et hautes fréquences ;
- l'application des équations des ondes au problème de la migration et à la construction de modèles géologiques suivant la méthode inventée par J. Claerbout ;
- les études du caractère des traces sismiques à partir de la signature enregistrée sur le terrain ou des résultats de diagnostics exécutées dans un forage : nouveau procédé de déconvolution où l'hypothèse à phase minimale de Wiener n'est plus prise en compte que pour l'élimination des multiples ; conversion d'une section sismique en impédances acoustiques avec une résolution d'une dizaine de mètres, ce qui permet une interprétation stratigraphique ;
- l'emploi de la couleur sur les sections sismiques, soit pour rendre plus sensible l'effet d'un paramètre (amplitude, fréquence), soit pour représenter un paramètre supplémentaire (vitesse, pendage latéral). Sercel a mis au point à cet usage un plotter numérique.

A l'I.F.P., les études ont porté sur :

- l'élaboration de programmes de migration et de modèles par la méthode des équations d'ondes de Claerbout en coopération avec la C.F.P. (programme HERMES) et la mise au point d'un programme de migration après stack partiel ;
- l'étude des modèles sismiques par les équations d'ondes complètes ;
- l'étude de méthodes de déconvolution permettant de déterminer l'impulsion sans faire d'hypothèse sur la phase ;
- les méthodes d'interprétation lithologique des profils sismiques basées sur le principe du calcul des impédances acoustiques à partir des traces sismiques ;
- la mise au point de programmes permettant la représentation en couleur des paramètres lithologiques.

C.G.G. et I.F.P. ont étudié en commun les problèmes liés à l'exploitation des enregistrements en ondes transversales. En particulier, étude du rapport entre le temps de propagation des ondes P et des ondes S qui est directement lié au coefficient de Poisson. On peut donc aussi différencier les principaux types de faciès : grès, roches carbonatées, sables, argiles.

Tendances

Les tendances qui semblent se dégager dès à présent sont les suivantes :

- utilisation de plus en plus fréquente d'un grand nombre de traces (cent et au-dessus) pour augmenter la résolution spatiale en X, Y et Z ;
- mise en œuvre et traitement de techniques de sismique réflexion à bande passante de plus en plus large en vue de l'étude détaillée des gisements d'hydrocarbures, préalable aux opérations de récupération assistée ;
- recherche d'une meilleure précision pour la restitution dans l'espace des réflexions sismiques : programmes de migration, modèles sismiques, étude en 3 dimensions ;
- large recours aux techniques de recherche directe d'hydrocarbures : étude en amplitude préservée, études du caractère des traces sismiques, conversion des sections sismiques en impédances acoustiques ;
- combinaison des ondes P et des ondes S pour les études stratigraphiques ;
- mise en œuvre et exploitation de profils sismiques verticaux en ondes P et S ;
- synthèse des différentes méthodes : traitement de l'image satellite, méthodes électriques ;
- incorporation des microprocessors dans l'instrumentation terrain - pré-traitement sur les zones d'opérations.

BIBLIOGRAPHIE

- BAMBERGER A., CHAVENT G., LAILLY P. (1977). - *Une application de la théorie du contrôle à un problème inverse de sismique*. Ann. Géoph., XXXIII, n° 1-2, p. 183-200.
- BEAUDUCEL C., CRETIN J. (1975). - *Géoprocasseur : calculateur numérique adapté au traitement du signal*. In : 5ème colloque sur le traitement du signal et ses applications (GRETSI), Nice, p. 577-584.
- BECQUEY M., LAVERGNE M., WILLM C. (1977). - *Acoustic impedance logs computed from seismic traces aid lithology*. Oil and Gas Journal, LXXV, n° 52, p. 78-82.
- BOIS P. (1975). - *Compatibilité entre la compression de l'information sismique et son traitement*. Geophysical Prospecting, XXIII, n° 4, p. 682-694.
- BOIS P. (1975). - *L'autocorrélation logique*. In : 5ème colloque sur le traitement du signal et ses applications (GRETSI), Nice, p. 585-593.

- BOIS P. (1976). – *Reconnaissance des horizons sismiques par analyse factorielle discriminante*. Geophysical Prospecting, XXIV, n° 4, p. 696-718.
- BOIS P. (1977). – *Analyse spectrale généralisée*. In : 6ème colloque sur le traitement du signal et ses applications, Nice, p. 1-8.
- BOIS P. (1978). – Filtrage homomorphe. *Rev. Inst. Franc. du Pétrole*, Sept.-Oct. 1978.
- DELTEIL J.R., JACQUART G., DAMOTTE B. (1978). – Continental margins of South-Western Indian Ocean. Offsh. Techno. conf., OTC 3264, p. 1835-41, Houston 1978.
- DES-VALLIERES T., KUHN H., LE MOAL R., DUVAL J. (1978). – *Test of various high resolution seismic devices in hard bottom areas*. Proc. 10th annual Offshore Technology Conference, Houston, vol. 3, OTC 3221, p. 1455-1466.
- GRAU G. (1977). – *A short history of ideas concerning the earth's crust. The contribution of A. Mohorovicic*. Geophysical Prospecting, XXV, n° 3, p. 405-414.
- GRAU G. (1978). – *Seabed reconnaissance by seismic methods*. Offshore Brazil, Rio de Janeiro, p. 01.1-01.8.
- GRAU G., HEMON Ch., LAVERGNE M. (1975). – *Possibilités nouvelles pour la sismique stratigraphique*. In : Proc. 9th World Petroleum Congress, vol. 3, PD 9 (2), p. 225-234, Applied Science Publ. Ltd, London 1975.
- HEMON Ch. (1978). – *Equations d'onde et modèles*. Geophysical Prospecting, XXVI, n° 4, p. 790-821.
- HEMON Ch., MACE D. (1978). – *Essai d'une application de la transformation de Karhunen-Loève au traitement sismique*. Geophysical Prospecting, XXVI, n° 3, p. 600-626.
- LAMER A. (1977). – *Atténuation des multiples en sismique marine par antimoyenne*. Geophysical Prospecting, XXV, n° 1, p. 141-164.
- LAVERGNE M. (1975). – *Pseudodiagrammes de vitesses en offshore profond*. Geophysical Prospecting, XXIII, n° 4, p. 695-711.
- LAVERGNE M., WILLM Ch. (1977). – *Inversion of seismograms and pseudo velocity logs*. Geophysical Prospecting, XXV, n° 2, p. 231-250.
- SALLE C., DELAPLANCHE J. (1977). – *Techniques nouvelles en géophysique*. Pétrole et techniques, n° 248, p. 26-34.

COMMUNICATIONS PRESENTÉES A DES CONGRÈS

- MICHON D. et CUVILLIER Ph. – The interactive terminal as an aid to "WLP" interpretation. *45e Congrès S.E.G.*, Denver, 1975.
- PATURET D. – The production and processing of non straight seismic lines by the "SLALOM LINE" method, *45e Congrès S.E.G.*, Denver 1975.
- PATURET D. – Display of WLP results by means of color sections. *46e Congrès S.E.G.*, Houston 1976.
- MICHON D. – Vertical seismic profiling. *46e Congrès S.E.G.*, Houston 1976.
- VAN ZIJL J.S.V. et CECCHINI A. – Measurement and interpretation of transitory phenomena in deep Schlumberger electrical soundings. *46e Congrès S.E.G.*, Houston 1976.
- THOMAS J. – Remote Sensing. *46e Congrès S.E.G.*, Houston 1976.
- MICHON D. – P. Wave and S. Wave Combined interpretation in seismic reflection. *47e Congrès S.E.G.*, Calgary 1977.
- FOURMANN J.M. – Phase Shaping process to compensate for mixed delay sources and filters. *47e Congrès S.E.G.*, Calgary 1977.
- MANIN M. – Vaporchoc II. *47e Congrès S.E.G.*, Calgary 1977.
- RAINON E. – Stratigraphic Interpretation. *47e Congrès S.E.G.*, Calgary 1977.
- PATURET D. – Automatic search of near surface anomalies by analysis of the Stacking velocities. *47e Congrès S.E.G.*, Calgary 1977.
- OMNES G. – Combined EM and DC Prospecting. *47e Congrès S.E.G.*, Calgary 1977.
- RAINON E., GLUCK S. et DONDON J. (SNEA (P)). – Modelling the seismic impedances. *48e Congrès S.E.G.*, San Francisco 1978.
- GAROTTA R. et OMNES G. – Problems in the interpretation of combined SH and P-waves results. *48e Congrès S.E.G.*, San Francisco 1978.
- LAVERGNE M., WILLM C., LACAZE J. – *Lithological determination in sand-shale sequence*. *48e Congrès S.E.G.*, San Francisco 1978.
- PATURET D. – A method for attenuation of multiple reflections and determination of stacking velocities. *48e Congrès S.E.G.*, San Francisco 1978.
- MICHON D. et BAIXAS F. – Wideband preservation techniques for improved definition of seismic data. *48e Congrès S.E.G.*, San Francisco 1978.

- PATURET D. et GAROTTA R. – SLALOM LINE Method : the lay out and processing of non straight seismic line. *37e Congrès E.A.E.G.*, Bergen 1975.
- MICHON D. et TARIEL P. – Amplitude preservation during migration. *37e Congrès E.A.E.G.*, Bergen 1975.
- FOURMANN J.M. et DUVAL J. – Multichannel seismic reflection ghosts processing. *37e Congrès E.A.E.G.*, Bergen 1975.
- JONCHERAY B., THOMAS J. et VANARD P. – Vertical seismic profiling. *37e Congrès E.A.E.G.*, Bergen 1975.
- PATURET D. – A method of identification and attenuation of multiple reflections. *38e Congrès E.A.E.G.*, La Haye 1976.
- ANDRIEUX P. – Electromagnetic soundings applied to the determination of permafrost thickness. *38e Congrès E.A.E.G.*, La Haye 1976.
- MICHON D. – The combined use of P and S waves in seismic reflection. *38e Congrès E.A.E.G.*, La Haye 1976.
- CECCHINI A. et ANDRIEUX P. – L.F. Approximation in EM Soundings. *39e Congrès E.A.E.G.*, Zagreb 1977.
- ROCROI J.P. et CECCHINI A. – Use of combined DC and AC methods in electrical prospecting. *39e Congrès E.A.E.G.*, 1977.
- FOURMANN J.M. et POSTIC A. – Phase and amplitude shaping for signature compensation and stratigraphic deconvolution. *39e Congrès E.A.E.G.*, Zagreb 1977.
- MANIN M. – Vaporchoc II – A steam gun – with adjustable amplitude and frequency spectrum. *39e Congrès E.A.E.G.*, Zagreb 1977.
- PATURET D. – Détermination of high and low frequency static corrections. *39e Congrès E.A.E.G.*, Zagreb 1977.
- NAUDY H. – Upward continuation of a Bouguer anomaly. *39e Congrès E.A.E.G.*, Zagreb 1977.
- BAMBERGER A., CHAVÉNT G., HEMON Ch., LAILLY P. – *Inversion de sismogrammes à incidence normale.* *40e Congrès E.A.E.G.*, Dublin 1978.
- BOIS P. – *Reconnaissance de forme autorégressive pour la délimitation des réservoirs d'huile et de gaz.* *40e Congrès E.A.E.G.*
- HEMON Ch. – *Simulation de la source dans les calculs de modèles sismiques par schémas explicites aux différences finies.* *40e Congrès E.A.E.G.*
- MICHON D. – How to improve the definition of seismic reflection data. *40e Congrès E.A.E.G.*, Dublin 1978.
- PATURET D. – Study of residual normal moveout corrections and colour display of stacking velocities. *40e Congrès E.A.E.G.*, Dublin 1978.
- GAROTTA R. – Combined pressure and shear waves survey. *40e Congrès E.A.E.G.*, Dublin 1978.
- LERAT C. et TARIEL P. – Dereverberation of marine reflection data through wave equation. *40e Congrès E.A.E.G.*, Dublin 1978.
- WLODARCZAK R. et MICHON D. – The risks of an excessive spatial filtering in field recording. *40e Congrès E.A.E.G.*, Dublin 1978.
- CECCHINI A. et ROCROI J.P. – Influence of a dipping ground surface on electrical measurements. *40e Congrès E.A.E.G.*, Dublin 1978.
- CLAUTRIER J.P., LERIDON J. et WAKSMANN G. – Contribution of processed Landsat Images to Aerogeophysical interpretation in mineral exploration. *40e Congrès E.A.E.G.*, Dublin 1978.
- MICHON D. – Exploitation de profils sismiques non rectilignes. *Journée de l'AFTP*, 1975.
- MICHON D. – Comment utiliser les résultats WLP dans une interprétation sismique. *Journée de l'AFTP*, 1976.
- MICHON D. – Les Ondes transverses en sismique reflexion. *Journée de l'AFTP*, 1977.
- DELAPLANCHE J. et MICHON D. – Les carbonates en géophysique. *Journée de l'AFTP*, 1978.

X – MICROSEISMES METEOROLOGIQUES

Pierre BERNARD

Institut de Physique du Globe
4, place Jussieu – 75005 PARIS

M. GRINDA a donné les conclusions de ses recherches sur les microséismes. Il rejette la simplification excessive d'une houle stationnaire en forme de clapotis, inexistant en plein Ocean, et veut expliquer les microséismes observés à partir d'une situation météorologique connue, et non déduire cette dernière des enregistrements microsismiques, encore que le tracé des isobares sur l'Océan et la présence des dépressions secondaires ne soient pas toujours indiqués avec précision sur les cartes. Il souligne également la difficulté d'arriver à une bonne mesure des champs de houle, et ne croit pas non plus à l'assimilation complète des microséismes à des ondes pures de Rayleigh ou de Love. Il termine en remarquant que le problème fondamental de la direction de propagation des microséismes n'est toujours pas résolu même par l'emploi des analyses spectrales.

P. BERNARD a abordé divers problèmes concrets en vue d'améliorer la connaissance des microséismes en tant que phénomène naturel. Le calcul des moyennes mensuelles des mesures de Varsovie a permis d'isoler, outre leur variation annuelle, une composante biennale intermittente et de phase variable, maintenant bien connue en météorologie, ainsi qu'une période de 4 ans qui apparaît également dans les "indices de vorticité atmosphérique" de l'hémisphère Nord. Reprenant les données à trois composantes obtenues dans diverses stations temporaires ou permanentes sur le territoire français, il a comparé la variation suivant la période du rapport H/V des amplitudes microsismiques avec la nature géologique du sous-sol de chaque site et obtenu un accord quantitatif remarquable avec les calculs mathématiques de A.W. Lee pour les ondes de Rayleigh. En particulier, une station où les sédiments sont très épais (St Michel l'Observatoire) donne, comme celles où ils sont très minces, une faible variation de H/V avec la période.

Une détermination de l'amortissement des microséismes a été faite à l'aide d'une liste de cas de correspondance entre tempêtes microsismiques à Strasbourg et houle au Maroc. Par approximations successives, on obtient une variation de l'amplitude des microséismes avec la distance de leur origine dépressionnaire, et le coefficient d'atténuation $K \approx 35 \cdot 10^{-5}$ par km, rapproché de la période des ondes et de leur vitesse de propagation (2,3 km/s, moyenne de 1,9 sur le continent et 2,7 dans l'Océan), donne un facteur de qualité $Q = 1\ 245$. Une telle valeur semble indiquer une propagation dans une couche de l'écorce terrestre profonde d'au moins 2 km.

Enfin les travaux de la Commission des microséismes de l'AISPIIT ont donné l'occasion de rechercher l'origine des microséismes enregistrés en Amérique du Sud.

BIBLIOGRAPHIE

- BERNARD P. (1976). – Variations des microséismes à Varsovie de 1946    1965. *Communic. Ass. CSE    Cracovie*, sep. 1976. *Publ. Inst. Geoph. Polish Acad. Sc. A-6* (117), p. 105-112, 1977.
- BERNARD P. (1977). – Second report of the IASPEI Commission on Microseisms. *Acta Universitatis Oulensis Ser. Physica*, n   12, p. 5    10.

- BERNARD P. (1977). – Caractéristiques de l'agitation microsismique en relation avec la couverture sédimentaire. Colloque J. Goguel, BRGM, Orléans, 4 mai 1977. Mémoires du BRGM n° 91 p. 471-5.
- BERNARD (1977). – Coopération franco-finlandaise pour l'étude des microsismes. Colloque commémoratif de l'expédition de Maupertuis. Oulu 23 juin 1977.
- BERNARD (1977). – L'origine des microsismes. Communic. Ass. Gén. AFAS, Rennes. *Sciences*, 8, n° 2 (2^e trim. 1978), p. 67.
- BERNARD (1978). – IASPEI Commission on microseisms. Third report 1975-1977. *Chronique UGGI*, n° 124, p. 85-88.
- BERNARD (1978). – Amortissement des microsismes de courtes et de moyennes périodes. Comparaison avec les ondes sismiques de surface. Communic. 16^e Ass. G¹e CSE, Strasbourg.
- BERNARD (1975). – Microclimat de la cave sismique de St Maur. *Technical and economical Studies*. D. n° 10, p. 225-9.
- CHOUDHURY M.A. (1977). – Research and characterisation of seismic noise in geothermal areas, Seminar on geothermal energy, Brussels, 6-8 Déc. *EUR 5920*, Vol. II, p. 723-731.
- GRINDA L. (1977). – Examen critique des tendances actuelles de la recherche relative aux microsismes. *Acta Univ. Oul. Ser. Physica*, n° 12, p. 91-96.
- GRINDA L. (1978). – Principales causes de barrières microsismiques (Résumé). *Chronique UGGI*, n° 124 (mars 1978), p. 88.

ERRATUM AU RAPPORT 1971-1974

– p. 76 (II, 28) 11^e ligne, lire focalisation au lieu de localisation.

– p. 52 (II,4) Le code de l'Observatoire microsismique du Parc St Maur est PAR sur les listes internationales (et non OPSM). Celui de Clermont Ferrand est CFF. On rectifiera d'autre part l'orthographe GARCHY et notera l'établissement d'une nouvelle station permanente à BONNEVAL SUR ARC, qui bénéficie de signaux sismiques renforcés par la structure de la croûte de la zone d'Ivréa, et qui fournit des renseignements sur les avalanches dans un rayon de 12 km.

D'autre part, la liste concernant la République de Djibouti, p. 55 (II,7) doit être complétée par les 4 stations :

KSU	KOUSSOUR	11°32'01"N	42°26'47"E	370 m	5
MKL	MASKALI	11°42'44"N	43°08'59"E	5 m	5
SGH	Sud GHoubet	11°26'13"N	42°37'50"E	700 m	5
DAF	DAFFARE	11°36'28"N	42°31'45"E	270 m	5

l'observatoire central ayant été déplacé, ses coordonnées deviennent :

ARO	ARTA	11°31'37"N	42°50'46"E	680 m	5
-----	------	------------	------------	-------	---

SECTION III

VOLCANOLOGIE ET CHIMIE
DE L'INTÉRIEUR DE LA TERRE

TABLE DES MATIERES

	Pages
L'activité de la Section III au cours des quatre dernières années écoulées peut être regroupée sous 8 rubriques principales, à savoir :	
I – Structure et dynamismes volcaniques – mécanismes éruptifs – pétrologie et magmatologie N. VATIN-PERIGNON, P. VINCENT, G. VIVIER	113
II – Corrélations séismes profonds – activité volcanique C. BLOT	125
III – Géochronologie, Géochimie et Evolution du manteau supérieur – Surveillance des volcans M. SEMET et J.M. CANTAGREL	127
IV – Gaz volcaniques J. CARBONNELLE et J.L. CHEMINEE	133
V – Croûte océanique ancienne et récente T. JUTEAU	148
VI – Paléovolcanisme C. BOYER	155
VII – Paléomagnétisme A. ROCHE	162
VIII – Géothermie J. VARET	166

I. — STRUCTURES ET DYNAMISMES VOLCANIQUES MECANISMES ERUPTIFS PETROLOGIE et MAGMATOLOGIE

Nicole VATIN-PERIGNON

Université de Grenoble

en collaboration avec

Pierre VINCENT

Université de Clermont-Ferrand

et Gérard VIVIER

Université de Grenoble

I — VOLCANOLOGIE DANS LE MASSIF CENTRAL

Toutes les régions volcaniques du Massif Central sont concernées. Les approches sont différentes suivant les chercheurs mais tous font de la cartographie détaillée, de la pétrographie et de plus en plus des études structurales et dynamiques. Les problèmes du volcanisme phréatomagmatique ont été particulièrement à l'honneur des dernières années, depuis qu'il apparaît être beaucoup plus fréquent qu'il n'était admis auparavant. L'équipe a étudié ou inventorié plus de 100 structures du type "maar-diatrème" répartis dans toutes les régions volcaniques du Massif Central, et d'âges allant du Paléocène à l'Holocène.

La carte géologique du Quaternaire et des formations superficielles de la France au 1:1 000^{ème} a été établie par A. de Goër pour les régions volcanisées du Massif Central.

Une carte néotectonique du Massif Central au 1:250 000^{ème} corrélée avec l'activité volcanique tertiaire et quaternaire sera achevée en 1977.

Une thèse de spécialité (F. Batard) a été consacrée à l'étude du comportement des feldspaths dans les roches volcaniques différenciées.

a — CHAINE DES PUYs

La thèse de G. Camus a renouvelé les connaissances sur ce domaine que l'on croyait connu. Appuyé sur la géophysique de M. Aubert il a proposé une explication d'ensemble cohérente fondée sur l'existence d'une chambre magmatique. C'est cette interprétation qui a stimulé les recherches géothermiques actuelles.

La carte de la chaîne des Puy's au 1/25 000^{ème}, avec un livret "Volcanologie de la chaîne des Puy's" publiée en 1975 est un travail collectif. Cette carte volcanologique de conception originale est la 1^{ère} de ce type éditée en France.

b — CANTAL

La thèse de A. de Goër avait permis de poser différemment les problèmes cantaliens et avait relancé l'intérêt pour la partie centrale du massif.

A sa suite de nombreux travaux ont été effectués par des volcanologues de Grenoble notamment l'étude des écoulements pyroclastiques de la partie Est du strato-volcan cantalien est abordée par J.P. Milesi sur l'exemple de ceux de la vallée de l'Alagnon, (1976).

L'observation du terrain et des microstructures permet, compte tenu des lois générales de la mécanique des fluides, de déduire la dynamique des écoulements pyroclastiques.

Du point de vue méthodologique, on a cherché à définir ces écoulements avant de les situer dans la stratigraphie. Trois points ont été successivement abordés : 1) les coulées pyroclastiques (s.s.) à caractère ignimbritique ; 2) les écoulements pyroclastiques (s.s.) : brèches et conglomérats ; 3) la position stratigraphique des écoulements pyroclastiques (s.l.).

1) Les coulées pyroclastiques :

Leur étude permet d'opposer à l'hypothèse classique des courants fluidifiés turbulents, un modèle d'écoulement de gravité, dense, visqueux et laminaire, issu d'une coulée de lave.

2) Les écoulements pyroclastiques :

Une solution à la genèse et à la mise en place des brèches et des conglomérats du Cantal, se déduit de la découverte de deux appareils volcaniques surbaissés et originaux : Auzolles et Seycheuse. Leur étude permet de démontrer le passage d'une coulée de lave émulsionnée (juxtaposition de gouttelettes trachyandésitiques et basaltiques) à un écoulement pyroclastique. Ce dernier a le comportement d'un écoulement de gravité dense, visqueux et laminaire mais en diffère par son aspect.

D'autres exemples permettent de préciser le modèle selon la variation de structure du liquide parental, la morphologie et les modifications subies par l'écoulement durant sa mise en place.

3) Position stratigraphique :

Il est souligné la relation existant entre la dynamique des écoulements pyroclastiques et les principales étapes de la construction du Cantal.

Les travaux de P. Watelet (1977) apportent une mise au point sur l'histoire volcanique du Cantal. Ils mettent en évidence différents traits marquants de l'évolution du Massif.

Aux premières *émissions basaltiques* ("basaltes miocènes"), essentiellement représentées dans la région de Dienne par des cônes de scories, succède une *importante activité latitique* par laquelle se mettent en place des coulées de ponces, des projections riches en blocs de socle (*granite* et *gneiss* à deux micas) et des dômes ou coulées visqueuses. Ces formations (formations acides inférieures) devaient constituer un important édifice acide aux pentes faibles, culminant à plus de 1400 m dans une région située approximativement à l'aplomb du cirque de Mandailles. Les témoins les plus périphériques de ce paléo-Cantal existent sous forme de lahars ponceux.

Les *premiers écoulements pyroclastiques trachyandésitiques* s'adaptent à une topographie diversifiée, constituée de mûles rigides (dômes) et de vallées creusées dans les nappes de ponces. Ils comblent les dépressions et ennoient les points hauts, contribuant ainsi à niveler les reliefs.

La limite supérieure de ces premières formations trachyandésitiques ("Brèche inférieure") est marquée par une phase d'érosion, génératrice de dépôts *volcano-détritiques*, et dont l'ampleur est difficile à estimer.

L'activité volcanique reprend par des *chutes de cendres et de ponces* (tufs lités intercalaires inférieurs) en relation avec une coulée ignimbritique dont on retrouve la trace en rive gauche de la Santoire, sous le Peyre Arse.

Les écoulements pyroclastiques qui leur succèdent (brèches intermédiaires) naissent sur des fissures affectant la partie la plus centrale de l'ancien édifice acide. Ils s'épanchent de façon centrifuge, évoluant d'amont en aval grâce à des phénomènes de fluidification et de diffusion gazeuse.

Jusqu'à présent, *l'activité volcanique est restée localisée au centre du massif* et a donné

naissance à des formations essentiellement pyroclastiques issues de magmas alcalins mantelliques, contaminés par la croûte sialique.

A la suite de l'effondrement du coeur du massif, les magmas vont emprunter des voies d'accès plus périphériques, donnant naissance à des volcans autonomes, construits sur un substrat bréchique très plan, et responsables en partie de la morphologie actuelle du centre du Cantal. C'est ainsi qu'apparaissent les coulées de trachyandésite des sommets, les dômes latitiques et phonolitiques, les coulées d'ordanchite, issus par cristallisation fractionnée et différenciation pneumatolytique d'un magma basique très exceptionnellement exprimé en surface (basaltes porphyriques).

Une phase d'érosion, génératrice d'alluvions à galets de phonolite vient interrompre l'activité volcanique pendant un laps de temps indéterminé, activité qui reprend par des émissions de basaltes (basaltes des plateaux), dernière manifestation du volcanisme cantalien.

c - VELAY

J. Mergoil achève ses levés cartographiques et poursuit la pétrologie du Velay oriental.

d - CEZALLIER

A. Thoñat a pratiquement achevé les levés de ce massif où les formations acides sont beaucoup plus développées qu'on ne pensait. Par ailleurs une dizaine de structures de type "maar-diatrème" sont maintenant connues. Il propose une chronologie relative en bon accord avec la géochronologie et confirme avec J.M. Cantagrel la migration de l'activité volcanique du Sud vers Nord en Auvergne.

e - DEVES

P. Boivin, A. Gourgaud et Lénat ont montré la variété et l'abondance du volcanisme phréato-magmatique et ses liens avec le volcanisme basique "normal". J. Kornprobst a terminé le lever de la feuille de Cayres.

f - MONT DORE

Deux thèses de spécialité en cours d'achèvement ont amené des éléments nouveaux sur la région orientale des Monts Dore, en particulier la mise en évidence d'une coulée pyroclastique trachytique post-villafranchienne dont le centre d'émission est recherché.

g - LIMAGNE

Il a été montré que toutes les pépérites sont post-oligocènes et résultent d'un volcanisme aérien de type maar-diatrème (P. Vincent). A l'intérieur de ces structures s'est déposé du Miocène lacustre, attribué souvent à tort à l'oligocène. Cette interprétation est valable aussi en Comté.

L'étude des anomalies magnétiques a permis de mettre en évidence soit des structures volcaniques discrètes, soit des structures du socle.

III-6

h - MENAT

Le célèbre bassin de Menat s'est avéré être lui aussi un maar, le plus vieux d'Auvergne (Paléocène). Les restes du volcanisme de cet âge sont activement recherchés maintenant sur toutes les bordures de la Limagne avec les méthodes conjuguées de la volcanologie, de la géochronologie et de la géophysique.

II - CAULDRONS ET STRUCTURES ANNULAIRES

a - BLOC CORSO-SARDE ET ESTEREL

Au cours de travaux en collaboration avec l'équipe de Marseille, 7 cauldrons d'âge permien ont été mis en évidence en Sardaigne, en Corse et dans l'Estérel.

b - AUTRES REGIONS

Participation à l'étude des massifs acides à structures annulaires des Kerguelen. Mise en évidence de la migration des complexes subvolcaniques à structures annulaires au Niger (en collaboration avec l'Université de Niamey). Découverte d'un massif de syénite néphélinique au Cameroun.

III - VOLCANOLOGIE HORS DU MASSIF CENTRAL

a - ETNA

Les travaux de G. Kieffer ont complètement modifié l'idée que l'on se faisait de l'Etna. Celui-ci apparaît maintenant proche d'un volcan hawaïen avec en particulier un bouclier primitif tholéïitique dans lequel s'est installé une immense caldeira. Des trachytes pouvant donner de véritables coulées pyroclastiques sont associés fréquemment aux laves différenciées postérieures à l'apparition de la caldeira. Ces travaux doivent être regroupés dans une thèse en 1979.

b - MEXIQUE

C. Robin étudie l'interaction du volcanisme calco alcalin de l'axe transmexicain avec le volcanisme alcalin, lié au golfe du Mexique. Après une mission commune J.M. Cantagrel, D.A. Cordoba et C. Robin ont publié une géochronologie en accord avec les données de terrain. A. Demant qui travaille sur la partie occidentale de l'axe transmexicain avait débrouillé antérieurement la partie californienne. C'est une coupe E.W. de l'ensemble considérable des volcans mexicains que pourront présenter prochainement ces deux chercheurs rattachés scientifiquement à Clermont.

c - MASCAREIGNES ET COMORES

Une équipe de chercheurs comprenant P. Vincent, N. Vatin-Pérignon, J. Nougier, G. Kieffer, J. Komprobst, J.M. Cantagrel, J.L. Cheminée et L. Chevallier a réétudié l'ensemble du Piton des Neiges et de la Fournaise.

PITON DES NEIGES

Série alcaline différenciée

. **Pétrologie** : Les laves différenciées occupent au Piton des Neiges une grande surface, avec des types variés : hawaïte, mugéarite, benmoréite, trachyte quartzifère et même comendite. Ces deux derniers types ont été revus des points de vue pétrologique et minéralogique par Nativel (1976), qui les fait provenir d'une cristallisation fractionnée.

. **Volcanologie** – Aux écoulements pyroclastiques de grand volume sont généralement associées des caldeiras d'effondrement, d'un type différent des caldeiras "hawaïennes", comme celles de la Fourmaise. Ceux qui séparent les phases 3 et 4 ont été particulièrement étudiées pour leur intérêt stratigraphique et structural (Tricot, Vatin-Pérignon, Vincent) – Une nouvelle coulée de tufs, comparable à un des faciès de Saint-Louis, a été trouvée sur le versant Nord, à l'Ouest de Sainte Suzanne, posant différemment le problème de la caldeira ; la réalité de celle-ci semble acquise, mais ses contours sont encore mal définis.

La dalle soudée de Maïdo a été suivie en aval et à l'Est, où elle passe à des lapillis mugéaritiques non soudés, résultant probablement eux aussi d'un écoulement pyroclastique (Vincent, Kieffer).

Les roches ultrabasiques

L'examen préliminaire de différents échantillons de roches ultrabasiques collectés principalement par P. Bussière et P. Vincent, a permis de retrouver les principaux types pétrographiques définis par Upton et Wadsworth (1972), et la mise en évidence d'un type nouveau caractérisé par des rythmes sédimentaires olivine/spinelle avec une stratification nettement marquée. Cette observation permet de souligner l'importance de la cristallisation du spinelle au liquidus dans le magma tholéiitique primaire.

Les transformations hydrothermales et les intrusions des cirques

La zéolitisation des parties profondes du bouclier initial affleurant au fond des cirques avait été étudiée minéralogiquement par Nativel, qui y avait mis en évidence une véritable zonéographie. L'étude des transformations hydrothermales (paragenèses de basse température) et des nombreux filons de la région des cirques a été reprise, au point de vue structural et géochimique (Vatin-Pérignon).

L'étude structurale a été faite par L. Chevallier.

Cette étude a pour but l'examen de *la fracturation* (très intense au niveau des cirques) ainsi que *l'évolution de l'île* depuis son émergence jusqu'aux phénomènes les plus récents.

L'histoire du Piton des Neiges s'est faite en deux temps principaux, caractérisés par des termes pétrographiques différents :

– Période des océanites et basaltes à olivines anciens formant le "bouclier primitif" et la majeure partie du massif.

– Période des basaltes à feldspaths et basaltes clairs (Hawaïtes) coiffant les séries précédentes.

Evolution volcano-structurale au sein des séries anciennes

I – Une période des brèches primitives

Les coupes offertes par la ravine du Bras Rouge (Cirque de Cilaos), la rivière des Galets (Cirque de Mafate) et la rivière des Fleurs Jaunes (Cirque de Salazie) nous renseignent sur le stade primitif de l'histoire du massif. Sur un substratum de coulées d'océanite, souvent auto-bréchifiées, se sont mises en place des brèches volcaniques polygéniques (éléments de basalte à olivines ou basalte aphyrique) selon un système de fracturation grossièrement S.E.-N.W.

Cet ensemble est recoupé par des intrusions de lave (basalte à olivines) mises en place selon trois systèmes de fracturation distensive N_{110} le plus ancien ; N_{60} ; N_{20} à N_{30} .

Ces dykes se recourbent en hauteur pour donner trois niveaux de sills visibles dans le paysage (cirque de Cilaos). Dans le cirque de Salazie, cette période correspond à un système de fractures courbes, agencées en "ring structures", (empruntées également par des dykes) et qui résulterait d'un mécanisme d'effondrements successifs d'ampleur restreinte (1 à 2 km de diamètre) et localisés en quelques points du cirque.

2 – Une deuxième période au sein des séries anciennes : accumulation importante de coulées et effondrements de grande amplitude.

Sur les brèches primitives se sont empilées des coulées de basalte à olivine sur une épaisseur de 600 mètres ou plus. Cet épisode monotone est entrecoupé d'effondrements de forme circulaire et de large amplitude. Des distensions intenses au sein du massif, correspondant au gonflement de ce dernier, ont accompagné cette période. Elles correspondent à des intrusions mises en place selon des "rifts". On note quatre directions : N_{160} (à l'ouest de Saint-Denis), N_{130} (cirque de Mafate), N_0 (cirque de Cilaos), N_{40} (cirque de Salazie).

A la fin de cet épisode, une période d'érosion intense, guidée par la fracturation, entaille le massif.

Evolution volcano-structurale au sein des séries récentes

Elle s'est faite en trois temps :

1 – Les basaltes à feldspaths

Cette série est peu importante en épaisseur mais s'étend assez largement sur tout le massif, empruntant les vallées creusées durant la période de calme éruptif. A la fin de cette activité, le massif de la Fournaise commence à fonctionner avec des conséquences structurales (fracturation) sur le massif du Piton des Neiges.

Encore une fois, cette fracturation est N.W.-S.E. (dans l'alignement Piton des Neiges – Fournaise). Pendant la période qui suit, l'érosion réentaille le massif.

2 – Les basaltes clairs : les Hawaïtes

Ces laves remplissent les vallées précédentes. Les coulées sont divergentes par rapport au Rond du Bras Rouge, cratère principal à cette période. C'est durant ce temps que fonctionne l'appareil volcanique du Piton d'Enchain.

A ces deux périodes volcaniques (basaltes à feldspaths et Hawaïtes) sont associés des systèmes radial et concentriques en "cone-sheet" d'intrusions de trachyte, syénite et dolérite altérée. Ceux-ci déterminent des effondrements circulaires qui achèvent les temps 1 et 2.

3 – L'épisode terminal

Il correspond à des émissions peu importantes en volume qui remplissent les effondrements précédents à partir de l'appareil volcanique central situé au Rond du Bras Rouge. Cet appareil est accompagné d'un système radial et concentrique d'intrusions.

Tectonique récente – Des effondrements tardifs

Des effondrements importants résultant d'une phase tectonique en distension, ont donné la forme définitive des cirques. Ces effondrements sont la résultante de trois directions de fracturation : N_{20} , $N_{130-140}$, N_{60-70} .

L'armature du massif N_{120} (formée par les brèches anciennes) a résisté plus ou moins bien à cette fracturation, préservant ainsi l'alignement Crête des Calumets – Gros Morne – Piton des Neiges. Ces effondrements ont provoqué la montée des derniers magmas (dykes dans Mafate, coulées tardives dans Salazie).

L'histoire du Piton des Neiges est fort complexe et les événements qui se succèdent divers. Il apparaît clairement que la forme des cirques est intimement liée à la tectonique qui a découpé le massif (qu'elle soit ancienne ou récente). Des directions de fracturation principales ressortent telles $N_{130-140}$ (alignement Piton des Neiges - Fournaise), N_{60-70} , N_{20-30} .

MASSIF DE LA FOURNAISE

Pétrologie - géochimie

Le bouclier de la Fournaise est formé par l'empilement de centaines de coulées, sans niveaux-repères interstratifiés. Pour retracer son évolution, il fallait d'abord en faire une étude systématique, voir s'il se dégageait des cycles, et si oui, s'ils étaient en relation avec l'effondrement des caldeiras et la migration vers l'Est.

Un échantillonnage systématique a été fait grâce à trois coupes : - rivière du Bras de la Plaine, à la hauteur de Grand Bassin ; rivière des Remparts à la hauteur du Nez de Bœuf, et Rempart de Bellecombe (Cheminée, Nougier, Vatin-Pérignon). L'étude pétrographique de la coupe du Nez de Bœuf a été faite (Nougier, Vatin-Pérignon). Elle fait apparaître une séquence inférieure (1670 à 1860 m), caractérisée par l'abondance de laves doléritiques et microporphyriques à structure poecilitique, riches en augite, notamment à la base de la série ; c'est la partie finale de la phase 3 de Billard, d'âge supérieur à 350 000 ans. Les laves du reste de la coupe, jusque 2060 m - qui comprend l'essentiel de la phase 4, est de type microlitique à microporphyrique à olivine, l'enrichissement en olivine étant notable vers le haut de la série.

Eruption d'avril 1977

Les premières manifestations ont été suivies par deux membres de la RCP qui étaient sur place (Montaggioni, Tricot). Deux autres ont suivi (Kieffer, Vincent). Le rapport préliminaire INAG (Vincent, Kieffer) sera suivi prochainement d'une publication plus détaillée (Kieffer, Tricot et Vincent, à paraître). Cette éruption d'un type inhabituel - à ne considérer que les 2 derniers siècles tout au moins - est riche d'enseignement, tant du point de vue volcanologique (éruption latérale hors de l'Enclos, à lave (océanite) extrêmement fluide) que du point de vue pétrologique (différences entre les laves liées à l'altitude de l'émission). Elle pose le problème de l'effondrement prochain de la Plaine des Osmondes, et de la formation possible ultérieurement d'une nouvelle caldeira à l'Est de l'Enclos actuel.

D'autre part, l'étude géomorphologique de la zone Chisny-Commerson (Kieffer, Vincent) a montré que l'activité le long de cet axe était très jeune, ce qui modifie la carte des risques volcaniques (les coulées pourraient s'écouler vers 3 vallées encaissées vers Langevin, St Joseph ou les installations EDF de la Rivière de l'Est).

Mayotte (Archipel des Comores)

L'étude en a été entreprise par N. Vatin-Pérignon, J. Nougier, J.M. Cantagrel et J.L. Cheminée.

La structure de l'île Mayotte est caractérisée par un bouclier primitif basaltique sur lequel se sont édifiés dans le Nord des massifs différenciés alcalins le long d'un rift hawaïen et, dans le Sud, des alignements phonolitiques convergeant le long de grands accidents (ou linéaments) vers le centre géométrique supposé du bouclier. En périphérie, un volcanisme strombolien et phréatomagmatique basaltique à trachytique sub-actuel achève le cycle éruptif.

La structure et le volcanisme de Mayotte apparaissent complexes, même au niveau des grandes unités. Un des traits les plus curieux est bien celui d'un centre géométrique de l'île qui est celui du bouclier primitif autour duquel s'ordonnent les phases volcaniques ainsi que la présence dans le Nord d'un système de rift hawaïen l'oblitérant.

d – VOLCANISME ATLANTIQUE

En collaboration avec l'Université de Lisbonne des datations ont été effectuées sur le volcanisme du Cap Vert et de Lisbonne.

e – LES PETITES ANTILLES

Dans le cadre d'équipe de recherche sur les mécanismes des phénomènes éruptifs, P. Vincent, N. Vatin-Pérignon, M. Semet et J.L. Cheminée apportent de nouvelles données sur l'âge et le mode de mise en place de *La Soufrière de la Guadeloupe*.

L'éruption se place vraisemblablement entre le voyage de Christophe Colomb – qui ne fait pas allusion à une activité quelconque – et l'installation permanente des colons en 1635.

L'érection du dôme a pu suivre immédiatement la phase explosive, mais elle a pu aussi se produire quelques dizaines d'années plus tard (plus de 70 ans pour l'exemple historique de la Soufrière de Saint Vincent). Elle pourrait, en fait, se placer peu avant 1635, car les colons ont été impressionnés par les importantes manifestations fumerolliennes de l'époque.

Les ponces rubanées de l'éruption de la Soufrière du XVI^e siècle sont issues d'un centre éruptif situé à l'aplomb du dôme actuel. A cet endroit s'est ouvert *un cratère d'explosion* dans un édifice déjà partiellement démantelé. Comme l'indiquent les éjectas polyolithologiques ce cratère s'est élargi par effondrement et éboulement des parois jusqu'à donner un entonnoir de diamètre un peu supérieur à celui de la base du dôme actuel. Ce cratère est entaillé dans les massifs et les coulées andésitiques qui le dominaient.

Simultanément s'est construit un croissant d'éjectas.

Des explosions verticales dans la cheminée ouverte ont donné lieu à des écoulements pyroclastiques (type nuée Saint-Vincent) par les échancrures des vallées principales. Le cumulo-dôme de la Soufrière se serait donc finalement mis en place dans un cratère partiellement rempli de ses matériaux pyroclastiques, en s'étendant suffisamment latéralement pour s'ajuster aux parois de l'entonnoir. Cette mise en place, comme celle du dôme de 1971-72 de la Soufrière de Saint-Vincent, ne s'est pas accompagnée d'une émission importante de produits pyroclastiques.

L'éruption du XVI^e siècle semble avoir été déclanchée par l'injection de magma basique dans une chambre à magma acide, suivant le mécanisme proposé par Sparks et al. Elle a suivi, ensuite, un cours assez semblable à celui de l'éruption de 1902-1972 de la Soufrière de Saint-Vincent. Les premières explosions correspondent au dégazage et à l'éjection de la partie la plus acide du mélange ; puis la montée progressive du magma basique provoque l'augmentation de l'émission de ponces et scories noires et aboutit à la mise en place du dôme, presque totalement dégazé, ayant la même composition chimique que les derniers éjectas. La présence simultanée de quartz et d'olivine et la composition bimodale des plagioclases indiquent peut-être que le dôme lui-même correspond à un magma hybride, avec mélange chimique des liquides – un "mixed magma" au sens restrictif d'Anderson.

Suivant ce schéma, les éruptions phréatiques historiques pourraient devoir leur origine à la détente de l'eau à haute température située dans une roche réservoir poreuse (éjectas ponceux et blocs), et normalement maintenue sous pression par le bouchon que constitue le dôme. La fracturation du bouchon – soit par le rejeu de failles régionales comme cela semble avoir été le cas pour les éruptions de 1796-97, et 1976-77, soit par l'ouverture de fissures localisées dans le dôme comme pour l'éruption moins importante de 1956 – entraîne la mise en communication de la nappe captive avec l'atmosphère et donc la vaporisation de l'eau surchauffée. De telles éruptions phréatiques sont, en général, chargées en particules (poussières et blocs) par érosion des conduits éruptifs. Après une détente suffisante, le bouchon se reforme, tant par auto-serrage que par colmatage des fissures par les produits d'altération.

f - L'IRAN

Sur le volcanisme tertiaire de l'Azerbaïdjan et de la région de Saveh, les résultats les plus complets et les plus récents ont été obtenus par des équipes grenobloises aidées par G. Vivier (Géochimie, Grenoble).

J.L. Lescuyer et R. Riou (1976) ont montré que l'ouverture rythmique d'un rift intracontinental durant l'Eocène permet d'expliquer les 4 grandes lignées alcalines du volcanisme de cette époque : latite-basaltes → latites → latite-andésites → trachyandésites. Ce processus avorte à la fin de l'Eocène sans qu'il y ait apparition d'une croûte océanique de composition tholéiitique. *Le volcanisme qui apparaît au Tertiaire sur la plate-forme iranienne possède des caractères hybrides entre celui des zones cratoniques et celui des zones orogéniques, sans être pour autant lié à une subduction.*

Le domaine fracturé et instable d'Iran Central, situé entre les chaînes plissées du Zagros et de l'Elbourz, appartient effectivement au vaste système alpino-himalayen. Les ceintures volcaniques qui soulignent la bordure de la plaque eurasiennne depuis les Balkans jusqu'à l'Afghanistan représenteraient donc des *rifts intracontinentaux de zone fragile* (de type Basin and Range Province) plutôt que de zone cratonique stable (de type Est-Africain). De tels systèmes pourraient s'apparenter aux "intracontinental rifts of young folded zone" de E. E. Milanowsky (1972). Il nous semble, que le volcanisme à tendance *shoshonitique* est étroitement lié à de telles structures.

A l'Ouest d'Ardebil, le Sabalan (4820 m), étudié par J. Didon et Y.M. Gemain (1976), est un ensemble volcanique subactif complexe.

Le socle tectonisé de ce massif est constitué par des séries volcaniques d'âge Crétacé supérieur au Miocène, qui prolongent la ceinture volcanique d'Iran central.

La fin de l'Oligocène est caractérisé par une phase tectonique cassante, durant laquelle s'individualisent de grands horsts d'orientation grossièrement Est-Ouest.

Au Miocène et au Plio-Quaternaire, des mouvements tectoniques (contemporains de la surrection de la chaîne du Caucase) provoquent une intense fracturation des horsts.

Des appareils volcaniques ponctuels se mettent en place le long de ces fractures miocènes, de direction méridienne.

Sur l'un des horsts se développe le Sabalan, affecté, au cours de son édification par l'effondrement d'une caldeira.

La construction du strato-volcan anté-caldeira s'est faite en cinq épisodes successifs, précédés chacun de phases explosives réduites. Les caractères volcanologiques des séries sont constants : dynamisme de type strombolien accompagné de coulées très étendues, avec un paroxysme effusif pour les séries intermédiaires.

Du point de vue strato-volcan anté-caldeira s'est faite en cinq épisodes successifs, précédés chacun de phases explosives réduites. Les caractères volcanologiques des séries sont constants : dynamisme de type strombolien accompagné de coulées très étendues, avec un paroxysme effusif pour les séries intermédiaires.

Du point de vue pétrographique, la composition des laves varie entre celle d'une latite-andésite, à tendance basaltique, et celle d'une dacite.

L'effondrement d'une vaste caldeira (12 km de diamètre) entraîne un remodelage complet de l'édifice, mais n'est pas accompagné de manifestations volcaniques synchrones particulières.

Le Sabalan, après un stade fumerollien ayant laissé peu de traces en est actuellement au stade hydrothermal.

Dans la région de Saveh, étudiée par C. Caillat, P. Dehlavi et B. Martel-Jantin (1978), les importants phénomènes de contamination réciproque entre une souche basaltique et une souche rhyolitique palingénétique, entrevus à travers l'apparition d'une tendance calco-alcaline

dès l'Eocène inférieur, soulignent la situation privilégiée de cette région vis-à-vis de l'ouverture du rift.

L'équilibre isostatique très important lié au ralentissement du flux thermique vers l'Eocène moyen marque dans la région de Saveh le début des conditions qui induisent l'apparition des roches alcalines et intermédiaires, riches en potassium lors du développement d'une souche basaltique shoshonitique. Toutefois, le déséquilibre des blocs provoqué par l'extension vigoureuse initiale est tel que jamais le réajustement postérieur n'atteint un stade suffisant pour que disparaisse totalement la souche basaltique tholéïitique et pour que la palinogénèse crustale soit fortement ralentie, à fortiori arrêtée.

En ce qui concerne l'Azerbaïdjan, l'ouverture du rift est resté tellement faible que le caractère continental de cette région n'a jamais beaucoup évolué durant l'Eocène. Le vieillissement du rift est précoce et presque toute l'évolution est jalonnée par un volcanisme à tendance shoshonitique de plus en plus marquée.

Le cycle volcanique oligo-miocène se caractérise donc par un très grand contrôle du magmatisme par les mouvements tectoniques. Cette modalité semble être à l'origine de l'uniformité des caractères de ce cycle dans toutes les régions de la Zone de l'Iran Central où il a été reconnu : alcalinité générale des produits, très importante activité rhyolitique palinogénétique, similitude exceptionnelle du cycle volcanique en Azerbaïdjan et dans la région de Saveh et plus grande localisation des manifestations volcaniques.

Après l'ouverture du rift très modulée spatialement durant l'Eocène, les divers épisodes volcaniques vont se dérouler dans tous les secteurs avec de nombreuses similitudes, en relation avec une histoire tectonique assez semblable dans toute la Zone de l'Iran Central.

BIBLIOGRAPHIE

- ARCHAMBAULT C., TANGUY J.C. (1976). — Comparative temperature measurements on Mount Etna lavas : problems and techniques. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1, 113-125.
- BOIVIN P., GOURGAUD A. et LENAT J.F. (1976). — Un nouveau maar à remplissage basaltique : le Plot de Lachamp Sud Devès, Massif Central français). *C.R. som. Soc. Géol. France*, 6, 265-267.
- BOÛT P. et de GOER de HERVE A. (1976). — Le volcanisme préquaternaire pleistocène et holocène dans le Massif Central français in : *La Préhistoire française*, t. I, 304-310, éd. CNRS.
- BROUSSE R. et MAURY R.C. (1976). — Paragenèse manganésifère d'une rhyolite hyperalcaline du Mont-Dore. *Bull. Soc. Minéral. Cristallogr.* 99, 300-303.
- BROUSSE R., MAURY R.C. et SANTOIRE J.P. (1976). — L'âge de la coulée du Tartaret. *C.R. Acad. Sci., Paris, D*, 282, 531-532.
- BROUSSE R., LEFEVRE C., MAURY R.C., MOINE VAZIRI H. et SOBAHNI E.A. (1977). — Le Damavand ; un volcan shoshonitique de la plaque iranienne. *C.R. Acad. Sc., Paris*, 285, 131-134.
- BROUSSE R., et MAURY R.C. (1978). — Minéralogie d'une phonolite à grenat de l'île de Ua Pou (Marquises, Pacifique Central). *Bull. Minéral.*, 101, 3-10.
- BRUNETON P., BRISSET F., COCHEME J.J., ORSINI J., VELLUTINI P., VINCENT P.M. (1976). — Présence d'une structure annulaire en Gellura (Sardaigne septentrionale). *CRAS t. 282, sér. D.*, pp. 2127-2130.
- CAILLAT C., DEHLAVI P. et MARTEL-JANTIN B. (1978). — Géologie de la région de Saveh (Iran). Contribution à l'étude du volcanisme et du plutonisme tertiaires de la Zone de l'Iran Central. Thèses de Doct. de spécialité. Grenoble, 323 p.
- CAMUS G. (1976). — La Chaîne des Puys. Etude structurale et volcanologique. *Ann. Scientif. de l'Université de Clermont-Fd*, n° 56, série géol. minéral. fasc. 28, et Thèse doc. Sc. Clermont-Fd. 320 p.
- COCHEME J.J., BRISSET F., VELLUTINI P., VINCENT P.M. (1976). — La presque île du Monte Senino fait-elle partie du "cauldron" de Scandola ? (Corse du Nord-Ouest). *CRAS, t. 283, sér. D.* 17-20.
- CONDOMINES M., TANGUY J.C. (1976). — Age de l'Etna, déterminé par la méthode du déséquilibre radioactif ^{230}Th / ^{238}U . *C.R. Ac. Sci.*, 282 D, 1661-1664.
- DIDON J. et GEMAIN Y.-M. (1976). — Le Sabalan, volcan plio-quaternaire de l'Azerbaïdjan oriental (Iran) : étude géologique et pétrographique de l'édifice et de son environnement régional. Thèses de Doct. de Spécialité, Grenoble, 304 p.
- GACHON A. et LENAT J.F. (1975). — Etude d'anomalies magnétiques situées en Limagne et sur ses marges. *Thèse doct. spécial.* Clermont-Ferrand 197 p.

- de GOER de HERVE A. et MILESI J.P. (1976.) - Etude préliminaire de la falaise d'Auzolles, modèle dynamique d'une origine directement éruptive des "conglomérats andésitiques" du Cantal (MCF CRAS, 282, 977.
- de GOER de HERVE A. et VEYRET Y. (1976). - Les glaciers quaternaires dans le Massif Central français in : *La Préhistoire française*, t. I, 50-51, éd. CNRS.
- HAVETTE A. BROUSSE F. et MAURY R.C. (1977). - Identification de phases sodiques et potassiques dans la pâte d'un basalte alcalin de la chaîne des Puy. *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr.*, 100, 338-342.
- KARCHE J.P., VACHETTE M. (1976). - Migration des complexes sub-volcaniques à structure annulaire du Niger. Conséquences. *C.R. Ac. Sc. Paris*, t. 282, sér. D., p. 2033-2036.
- KIEFFER G. (1975). - Sur l'existence d'une "rift zone" à l'Etna (Sicile). *C.R.A.S.Sc.*, t. 280, série D., pp. 263-266.
- KIEFFER G., NICOLOSO A. et TANHUY J.C. (1975). - Sur le réveil du Cratère Nord-Est de l'Etna (29.9.74) et le mécanisme de l'activité volcanique persistante. *C.R.A.Sc.*, t. 280, sér. D., pp. 70-704.
- KIEFFER G., NICOLOSO A. et TANGUY J.C. (1975). - Mount Etna volcanic eruption. Smithsonian Institution, *C.F.S. L.P., Event Card 10-75*, n° 2124.
- KIEFFER G. (1975). - Les dernières éruptions acides de l'Etna (Sicile). *C.R.A.Sc.*, t. 280, sér. D., pp. 1349-1352.
- KIEFFER G. (1975). - Pillows and hyaloclastites associated to subaerial lavas at the South-West of the base of Mont Etna (Sicily, Italy). *Géologie Méditerranéenne*, t. II, n° 4, pp. 179-184.
- KIEFFER G. (1976). - Eruptions excentriques ou éruptions latérales d'origine profonde : réflexion sur le mécanisme d'un bon nombre d'éruptions des bas et moyens versants de l'Etna (Sicile). *C.R.A. Sc.*, t. 283, sér. D., pp. 1281 - 1284.
- KIEFFER G. et TANGUY J.C. (1976). - Présence de tholéïtes porphyriques à la base de l'Etna primordial : leur importance magmatologique, volcanologique et morpho-structurale. *C.R.A.Sc.*, t. 283, sér. D., pp. 1703-1706.
- KIEFFER G. et TANGUY J.C. (1976) - The 1974 eruption of Mount Etna. Contribution to the study of eruptive mechanisms. *Comm. au Congrès International sur les Eaux thermales, l'Energie géothermique et le Volcanisme du Domaine méditerranéen*. Athènes, 5-10 octobre (1976).
- KIEFFER G. (1977). - Un vrai cumulo-dôme à l'Etna (Sicile) : le Monte Stornello. *C.R.A.Sc.*, 284, 13.
- KIEFFER G. (1977). - Identification d'une nouvelle coulée ponceuse et considérations sur la genèse des coulées pyroclastiques dans l'Etna. *C.R.A.Sc.*, 284, 523
- KORNPROBST J., CANTAGREL J.M., FABRIES J., LASSERRE M., ROLLET, et SOBA D. (1976). - Existence au Cameroun d'un magmatisme alcalin pan africain ou plus ancien : la syénite néphélinique à mboziite de Nkonglong - Comparaison avec les roches alcalines connues dans la même région. *Bull. Soc. G-eol. France*, (7) t. 18, 5, 1295-1305.
- LAMEYRE J., MAROT A., ZIMINE S., CANTAGREL J.M., DOSSO L., VIDAL Ph. (1976). - Chronological evolution of the Kerguelen Islands syenite ring complex. *Nature*, vol. 263, n° 5575, p. 306-307
- LESCUYER J.L. et RIOU R. (1976) - Géologie de la région de Mianeh (Aberbaïjan) - Etude du volcanisme tertiaire de l'Iran. (Thèses de Doct. de Spécialité, Grenoble, 233 p.
- MAURY R.C. (1976). - Contamination (par l'encaissant et les enclaves) et cristallisation fractionnée de séries volcaniques alcalines, continentales (massif Central français) et océaniques (Pacifique Central) : l'origine des laves acides. Thèse d'Etat, Orsay, 455 p.
- MAURY R.C., MERCOYER B. et WESTERCAMP D. (1976). - Températures de mise en place des hydroclastites fossilifères de la Montagne Pelée (Martinique) et de la Soufrière de Guadeloupe. *Bull. B.R.G.M.*, IV, n° 4, 347-352.
- MAURY R. (1978). - La contamination magmatique. Chap. III, 58-70. in GIROD M., BAILEY D.K., BAKER P.E., FISCHER R., V. MAURY R., ROCCI M., SMINCKE H. et UPTON B.G. - Les roches volcaniques. Pétrologie et cadre structural. DOIN Paris, 239 p.
- MAURY R.C. et BROUSSE R. (1978). - Présence de pigeonite et d'orthopyroxène dans certaines laves du Massif Central français : leur répartition et leur origine. *Bull. Min-éral.*, 101, 10-21.
- MAURY R.C. (1976). - Evolution à haute température des matériaux organiques dans les formations volcaniques ou à leur contact. *Bull. Centre Rech. PAU SNPA*, 10 289-300
- MAURY R.C., DIDIER J. et LAMEYRE J. (1978) - Comparative magma-xenolith relationship in some volcanic and plutonic rocks from the french Massif Central. *Contr. Mineral. Petrol.*, 66, 401-408.
- MAURIZOT-BLANC C. (1974). - Etude des formations volcaniques de la cuvette de Murat et de la vallée de la Chevade - Etude pétrographique et pétrochimique des basaltes miocènes et pliocènes de la Planèze de Saint Flour (Gard) Thèse de spécialité Grenoble 211 p.
- MILESI J.P. (1976). - Dynamique des écoulements pyroclastiques du Cantal Oriental, sur l'exemple de ceux de la vallée de l'Alagnon (MCF) Thèse doc. spécialité, Grenoble. 197 p.
- NOUGIER J., VATIN-PERIGNON N., CANTAGREL J.M. et CHEMINÉE J.L. (1979) - Volcanisme et structure de l'île Mayotte (Archipel des Comores). *C.R. Acad. Sci., Paris*, 288 D, 211-214.
- NATVEL P. - (1978) Volcans de la Réunion - Pétrologie, faciès zéolite (Piton des Neiges) - Sublimés (la Fournaise). Thèse Doc. d'Etat, Paris-Sud (Orsay), 510 p.
- TANGUY J.C. (1976) - Sur l'évolution magmatique de l'Etna. *C.R. Acad. Sci.*, 282 D, 1713-1716.
- TRICOT B. (1976) - Le volcanisme de la Comté d'Auvergne (MCF) - Thèse doc. spécialité, Clermont-Fd. 187 p.

- VATIN-PERIGNON N., SHAW D.M. et MUYSSON J.R. (1977) – Lithium in Spilites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41, 1601-1607.
- VATIN-PERIGNON N., SHAW D.M. et MUYSSON J.R. (1977) – Abundance of Lithium in Spilites and its implications in the spilitization process. 2d symposium on the origin and distribution of the elements, Paris Unesco, 112
- VATIN-PERIGNON N., MAURY R.C. et MICESI J.P. (1979). – Le magmatisme sursaturé infrabrèchique du centre du Cantal. *Bull. Volcanol.*, 41, 2.
- VELLUTINI P., VINCENT P.M., BOUCARUT M., BRISSET F., BRUNETON P., COCHEME J.J. (1976). – Découverte d'une structure en "cauldron" dans le massif volcanique de l'Estérel. *CRAS*, t. 282, sér. D., pp. 33-36.
- VINCENT P., VATIN-PERIGNON N., SEMET M., et CHEMINEE J.L. (1979) – Le dôme de la Soufrière (Guadeloupe) : son âge et son mode de mise en place. *C.R. Acad. Sci., Paris* 288 D, 51-54
- WATELET P. (1977) – Volcanisme tertiaire des hautes vallées de la Santoire, de l'Impradine et de la Petite Rhue. Contribution à l'étude des formations brèchiques. Thèse doc. spécial. Grenoble 220 p.

II. — CORRELATIONS SEISMES PROFONDS : ACTIVITE VOLCANIQUE

Claude BLOT
ORSTOM, Paris

L'observation des migrations de séismes tectoniques dans les structures insulaires suivant le schéma :

séismes profonds \rightleftharpoons séismes intermédiaires \rightleftharpoons séismes superficiels normaux
éruptions volcaniques

a été appliquée à la prévision d'éruptions de volcans aux Nouvelles-Hébrides et en Nouvelle-Zélande.

Les tests de prévision ont été poursuivis avec succès, quand les données étaient valables et les observations possibles, dans l'Archipel des Nouvelles-Hébrides pour les éruptions des volcans Gaua, Ambrym, Lopévi et Yasur (Tanna).

A partir de 1976 les recherches ont été menées principalement en Nouvelle-Zélande avec la collaboration du Department of Geology (Victoria University) et du Department of Scientific and Industrial Research, Seismological Observatory à Wellington.

L'important réseau de stations sismologiques (40) et la surveillance permanente des volcans actifs y permettent une meilleure expérimentation.

La détection et la localisation des séismes subcrustaux a permis de prévoir avec précision (et plusieurs mois auparavant) les reprises d'activité des 3 volcans : White Island (7 éruptions), Ngauruhoë (2) et Ruapehu (8). La position des hypocentres et la magnitude des séismes tectoniques permettent de préjuger du type et de l'intensité des manifestations volcaniques résultantes : crises de séismes volcaniques, éruptions hydrothermales, gazeuses ou de cendres plus ou moins intenses.

Des corrélations remarquables entre les migrations de séismes tectoniques, les séismes à la racine des volcans (profondeur voisine de 125 kms) et les phénomènes physiques et chimiques observés quelques mois après sur les volcans tels que les variations de niveau ou bombements du cratère (White Island), de la température du lac de cratère et des indicateurs chimiques : concentrations en chlorure et magnésium, pH, confirment l'origine profonde des volcans.

$$\text{Une équation de la forme } t = C \cdot \log \frac{h_i}{h_r} + \frac{h_r}{a \cdot M + b}$$

est utilisée pour la prévision des éruptions volcaniques.

t : temps en jours

h_i : profondeur des séismes intermédiaires

h_r : " " à la racine des volcans en kms

M : magnitude des séismes

C, a, b : constantes

BIBLIOGRAPHIE

BLOT C. (1976). – Volcanisme et sismicité dans les arcs insulaires ; Prévion de ces phénomènes. Thèse d'Etat, ed. ORSTOM, collection Géophysique n° 13, 206 p.

III – GEOCHRONOLOGIE, GEOCHIMIE ET EVOLUTION DU MANTEAU SUPERIEUR – SURVEILLANCE DES VOLCANS

Michel SEMET

Institut de Physique du Globe, Paris

en collaboration

avec Jean-Marie CANTAGREL

Laboratoire de Géochronologie, Clermont-Ferrand

L'activité du Laboratoire de Géochimie et Cosmochimie en Volcanologie peut se composer en quatre thèmes :

- Etude de datations (K-Ar, déséquilibre radioactif) ;
- Etude géochimique de différents basaltes (éléments en trace, compositions isotopiques) ;
- Calculs théoriques ; modélisations des processus intervenant dans la genèse des magmas ;
- Surveillance et étude de volcans actuels (Guadeloupe, Martinique, La Réunion).

I – ETUDE DE DATATIONS

– Applications de la méthode du déséquilibre radioactif à des basaltes de diverses régions volcaniques. Les recherches en cours portent sur l'étude de roches volcaniques récentes (âge < 300 000 ans). La méthode ^{230}Th - ^{238}U fournit un moyen de datation des roches volcaniques par isochrones internes et permet d'étudier l'évolution magmatique grâce aux rapports initiaux ($^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$) (3). Sont notamment en cours d'étude des volcans du Costa Rica, l'Etna, le Stromboli ainsi que des roches volcaniques du Massif Central, d'Islande et des basaltes sous-marins de la zone Famous

II – ETUDE GEOCHIMIQUE DE DIFFERENTS TYPES DE BASALTES

Cette étude est un des grands thèmes de recherche développés au laboratoire, dans le but de préciser la géochimie et l'évolution du manteau supérieur. Sur ces basaltes, différents moyens d'investigation sont utilisés (éléments en traces, géochimie des isotopes du Sr, Pb, Nd) parfois couplés, parfois séparément.

A – Basaltes de la Mer Tyrrhénienne

L'étude des compositions isotopiques de Pb et de Sr et des concentrations en K, Rb, Sr, Terres Rares, Th, Hf permet de déterminer la nature des basaltes prélevés lors du leg 42 A site 373 A dans la Mer Tyrrhénienne.

Les basaltes étudiés sont tholéïtiques, et ressemblent par leurs compositions en Pb et en Sr, leurs rapports Th/Hf et leurs distributions en Terres Rares aux basaltes "intermédiaires" que l'on connaît en Islande et dans la zone Famous.

B – Basaltes des Açores

Après les études d'éléments en trace et de majeurs nous avons abordé plus systématiquement les mesures de datation par la méthode K-Ar, de compositions isotopiques de

Sr et de Pb, de concentrations en éléments en traces dans les différentes îles de l'Archipel des Açores. Les datations K-Ar permettent de préciser la séquence d'âge des îles en relation avec leurs positions géographique et tectonique. L'étude comparée des compositions isotopiques du Pb et du Sr permettent de détecter les phénomènes de mélange et de contamination à l'intérieur de chaque île et de tracer les hétérogénéités du manteau à l'échelle de l'archipel et en relation avec la dorsale médio-atlantique, particulièrement avec la zone FAMOUS.

Les éléments en trace permettent d'identifier les phénomènes de différenciation intervenant dans les séries volcaniques de chaque île.

C – Basaltes de la zone Famous

Après l'étude précédemment faite, de nouvelles mesures de concentrations en éléments en traces et de compositions isotopiques du Sr et du Pb sur des basaltes de la zone FAMOUS ont amené à modifier le modèle proposé jusque là par Schilling : mélange d'une source correspondant à un "point chaud" sur les Açores et d'une source tholéiitique normale.

Les nouvelles données sur les éléments en trace amènent à introduire une hétérogénéité de la zone FAMOUS. Les résultats des isotopes du Pb montrent qu'un tel modèle à 2 pôles, de type "Islande" est inapplicable. Différents modèles sont envisagés.

D – Basaltes continentaux du Hoggar

Les compositions isotopiques du Sr et les rapports Rb/Sr ont été mesurées sur des basaltes alcalins et de nephelinites provenant de 3 appareils volcaniques récents (fin tertiaire-quatemaire) de la région de l'Atakor (Hoggar). Les compositions isotopiques sont très groupées (de 0,7030 à 0,7034) ; les rapports Rb/Sr varient de 0,016 à 0,05. Ceci peut être expliqué par l'existence d'une région-source unique pour tous ces différents magmas, région source à caractère très voisin des régions-sources de basaltes océaniques.

E – Le néodyme dans les basaltes océaniques

Le ^{147}Sm donne, par radioactivité α , le ^{143}Nd avec une période voisine de 10^{11} ans. Ceci nous permet d'envisager l'emploi, en géochimie isotopique, du rapport $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ comme traceur naturel. La méthode a été appliquée à l'étude des basaltes océaniques.

Des différences très significatives de composition isotopique ont été observées entre :

- d'une part, les basaltes alcalins d'îles océaniques qui ont un rapport $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ compris entre 0,51208 et 0,51215 ;
- d'autre part, les tholéiites de dorsales qui s'étagent entre 0,51230 et 0,51248.

Ces rapports sont à comparer à la valeur actuelle dans les chondrites qui est $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$: 0,51184. De telles différences de composition isotopique ne peuvent s'expliquer que si les régions sources des deux types de basaltes ont évolué avec des rapports Sm/Nd différents pendant des intervalles de temps de l'ordre du milliard d'années.

Les résultats du néodyme confirment donc l'hétérogénéité du manteau sous-océanique et sont compatibles avec un modèle de région-source des tholéiites présentant un caractère résiduel (à haut rapport Sm/Nd). On observe pour ces basaltes une nette corrélation entre les rapports $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. Ceci suggère que les fractionnements Sm - Nd et Rb - Sr au cours des épisodes de différenciation du manteau sont étroitement corrélés et que la variation du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est un caractère primitif dû à des variations du rapport Rb/Sr et non un caractère de contamination.

F – Etude d'éléments en traces dans différents types de roches volcaniques

En plus des cas particuliers traités ci-dessus nous entreprenons d'autres programmes d'étude :

– basaltes des legs IPOD :

Les basaltes des legs 45-46-49-51-52-53-54 ont leurs éléments majeurs dosés par H. BOUGAULT et les éléments en trace par TREUIL.

– Basaltes des Afars :

Le programme d'étude se poursuit, en collaboration avec J. VARET.

– Séries volcaniques du Massif Central :

Tout un programme est commencé sur les variations des éléments en trace dans différentes séries volcaniques du Massif Central (Chaîne des Puys, Velay, Mt Dore).

– Volcans du Chili :

Une étude portant sur différents volcans du Chili est entamée.

Les études d'éléments en trace, d'une part, sont tournées vers la reconnaissance qualitative des processus mis en jeu lors des émissions volcaniques, d'autre part permettent d'obtenir des données utilisées lors des modélisations quantitatives des processus ignés (voir ci-après). Enfin, les rapports d'éléments hygromagmatophiles permettent de tracer les hétérogénéités des sources mantelliques indépendamment des phénomènes de fusion et de différenciation qui les ont affectés par la suite.

III – MODELISATION QUANTITATIVE DES PROCESSUS IGNES

Nous avons cherché à utiliser simultanément tous les éléments en trace ou majeurs d'un ensemble de laves pour calculer les paramètres gouvernant les processus de fusion partielle et de cristallisation fractionnée qui ont lieu lors de leur genèse et de leur mise en place.

a) Dans le cas des éléments en trace cela mène à un problème sous déterminé et non linéaire qui est résolu par une méthode de moindres carrés itérative. La sous détermination est levée par des contraintes extérieures peu précises mais très contraignantes telles que l'estimation de la concentration initiale en Ni du liquide magmatique et la valeur très faible du coefficient de partage de certains éléments hygromagmatophiles. Une application aux données des Terres Rares des basaltes de l'île de Grenade montre ce que l'on peut déduire d'une telle approche dans le cas d'un processus de fusion partielle.

b) Dans le cas des éléments majeurs le problème peut se ramener à la détermination, dans un certain espace d'une "meilleure" droite joignant les points représentatifs des laves étudiées, puis à la construction de "perpendiculaires communes" à cette droite et à divers polyèdres ayant pour sommets les constituants élémentaires des minéraux silicatés.

Les deux méthodes ont été appliquées indépendamment à des données d'éléments majeurs et en trace dans les basaltes alcalins de l'île de Terceira et ont donné des résultats convergents.

c) Utilisation des couples père-fils. Problème du recouvrement des fractionnements chimiques passés des couples père-fils à l'aide des variations de composition isotopique du fils.

Dans le but d'étudier les variations temporelles et hétérogénéités géographiques de la composition isotopique du manteau supérieur, un programme est en cours.

Une première approche est menée sous forme de simulation à l'aide d'un modèle de boîtes.

Ensuite le sujet sera appréhendé en problème inverse.

IV – ACTIVITES DU LABORATOIRE DE GEOCHIMIE ET COSMOCHIMIE CONCERNANT L'ETUDE ET LA SURVEILLANCE DES VOLCANS DE LA GUADELOUPE, DE LA MARTINIQUE ET DE LA REUNION

Suite à la crise sismo-éruptive de la Soufrière (Guadeloupe) de 1975-1977 une partie des moyens du laboratoire a été investie dans l'étude géochimique et minéralogique des produits volcaniques des Antilles. Ces études rentrent partiellement dans le cadre d'actions plus vastes menées par l'Institut de Physique du Globe de Paris dans ses observatoires volcanologiques.

Cette activité a été concentrée sur trois objectifs :

- analyse géochimique des échantillons solides (éléments majeurs, traces et isotopes) ;
- analyse minéralogique et texturale des produits solides ;
- analyse des produits gazeux et des eaux des massifs volcaniques ;

dans le but de préciser les caractères du volcanisme des Antilles au sens large et plus particulièrement ceux caractéristiques de l'activité phréatique et fumerollienne de la Soufrière.

Moyens mis en œuvre

Géochimie

Les échantillons de "cendres" et un certain nombre de roches des massifs volcaniques ont été étudiés en détail du point de vue des rapports isotopiques du strontium et du plomb par spectrométrie de masse à source solide. On a également déterminé dans ces échantillons la composition chimique en éléments majeurs (X.R.F.) et un certain nombre de traces (R.E.E., éléments de transition, U, Th, Cl, Br, soufre sous forme native, sulfures et sulfates, par activation neutronique et électrochimie).

Minéralogie

L'étude des "cendres" et des roches de massif (Guadeloupe et Martinique) a été poursuivie par microscopie pétrographique, analyse en microscopie à balayage et microsonde électronique et par diffraction X pour les produits fins. Le laboratoire de pétrographie de l'université P.M. Curie et la division "Geosciences" du Los Alamos Scientific Laboratory ont été associés à ce programme.

Gaz et Eaux

Le laboratoire de Physique du Globe de la Guadeloupe a été équipé d'un chromatographe en phase gazeuse pour l'analyse systématique des gaz fumerolliens. Parallèlement, le laboratoire de Géochimie des Isotopes Stables (Paris V) a entrepris un programme d'analyse isotopique des gaz volcaniques pour le carbone et l'oxygène.

Un programme d'étude systématique de la variation de composition des eaux thermales et de sources du massif de la Soufrière (Guadeloupe) et de la Montagne Pelée (Martinique) est en voie de réalisation.

Résultats

Nous n'évoquerons, succinctement, ici, que les résultats concernant l'activité de la Soufrière durant la crise 75-77. Ces résultats sont de deux ordres :

- caractérisation de l'activité de surface du volcan ;
- mise au point de méthodes observationnelles en vue de déterminer des critères prévisionnels.

C'est en synthétisant les diverses données obtenues que l'on a pu formuler les conclusions suivantes sur l'activité de la Soufrière :

— les “cendres” émises durant les éruptions phréatiques proviennent d’une région source de composition relativement homogène. Cette source est relativement limitée dans l’espace.

Les “cendres” sont constituées d’andésites d’arc insulaire typiques plus ou moins profondément modifiées par une altération fumerollienne ou hydrothermale prolongée. L’eau responsable de cette altération, acidifiée par des gaz qui peuvent être d’origine volcanique profonde, est d’origine météorique ;

— les éruptions phréatiques correspondent à la détente brutale de vapeur d’eau essentiellement et ont une origine relativement superficielle (quelques dizaines de mètres à 1 500 m environ). Leur profondeur d’origine est nettement plus superficielle que celles des centres d’activité sismique. Lors de cette détente les fractures du dôme volcanique sont ramonées par les gaz. Une fraction non négligeable des gaz est condensée ou adsorbées sur les “cendres” ce qui conduit à la formation de composés solubles et/ou volatils tels que le gypse, d’acides HCl, HF, HBr, et H₂SO₄ et de chlorures (?). La minéralogie et la texture des “cendres” indiquent une température maximum d’altération de 200°C environ et reflètent les conditions d’expulsion ;

— la composition chimique des eaux (alcalins, sulfates, acides et pH) est, dans certains cas, un indicateur sensible de l’activité profonde conduisant à des manifestations de surface ;

— les gaz fumerolliens et probablement ceux des éruptions phréatiques ont une composition chimique où la vapeur d’eau est dominante. Les gaz (C-O-H-S) en proportions plus faibles ne semblent pas refléter l’équilibre thermodynamique. Leurs proportions indiquent une réaction partielle des espèces, éventuellement d’origine profondes. Cette réaction se produit lors du mélange des gaz “volcaniques” (CO₂, H₂S, SO₃, etc. . .) avec les gaz hydrothermaux, lors de la décompression ou, même, lors du prélèvement.

Essentiellement trois méthodes géochimiques de surveillance des produits volcaniques ou péri-volcaniques semblent pouvoir aisément déboucher sur des critères prévisionnels :

- analyse des gaz fumerolliens (composition chimique et isotopique) ;
- analyse des eaux de sources thermales ou non ;
- analyse des condensats de fumerolles et des composés solubles et volatils des cendres.

Ces méthodes peuvent être mise en place avec des moyens techniques relativement peu importants et se prêtent assez bien à la surveillance en continu.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLEGRE C.J. et CONDOMINES M. (1976). — “Fine chronology of volcanic processes using ²³⁸U-²³⁰Th systematics”. *Earth: Planet. Sci. Lett.* 28, p. 395-406.
- ALLEGRE C.J., TREUIL M., MINSTER J.F., MINSTER J.B., ALBAREDE F. (1977). — Systematic use of trace elements in igneous processes. Part I : Fractional crystallisation processes in volcanic suites. *Contr. Mineral. Petrol.* 60, 57-75.
- BROUSSE R., SEMET M. et MONEYRON N. (1977). — Sur la présence de verres non altérés dans les projections de la Soufrière (Guadeloupe), durant la crise 1976. *C.R. Acad. Sci.*, 285 D, 753-754.
- CANTAGREL J.-M. (1975). — Données radiométriques potassium-Argon sur quelques formations magmatiques des Iles de l’Archipel du Cap Vert. *C.R. Acad. Sci. Paris, D*, t. 280., p. 2429-2432, (en coll. avec J. BERNARD-GRIFFITHS, C.A. MATOS ALVES, F. MENDES).
- CANTAGREL J.-M. (1976). — Age du volcanisme dans le Cézallier (Massif Central Français) et migration de l’activité volcanique en Auvergne. *C.R. Acad. Sci. Paris, D*, t. 282, p. 1837-1840 (en coll. avec A. THONAT).
- CANTAGREL J.-M. (1977). — Néotectonique cassante et volcanisme plio-quadernaire dans l’arc Egéen interne : l’île de Milos (Grèce). *Bull. Soc. Géol. fr. 7ème sér.*, tome XIX, n° 1, p. 119-124, (en coll. avec J. ANGELIER et J.C. VILMINOT).
- CANTAGREL J.-M. (1977). — Découverte d’un volcanisme Paléocène en Auvergne : Les maars de Menat et leurs annexes ; Etude géologique et géophysique (en coll. avec P. VINCENT, M. AUBERT, P. BOIVIN, J.F. LENAT). *Bull. Soc. Géol. Fr. (1977) (7)*, t. XIX, p. 1057-1070.

- CANTAGREL J.-M. (1977). – Une coulée de ponces post-villafranchienne sur le versant oriental du Mont-Dore (Massif Central français) (en coll. avec J.C. BESSON, MG. LY, A. de GOER et P.M. VINCENT). *C.R. Acad. Sci.*, t. 284, ser. D, n° , p. 1875-78.
- CANTAGREL J.-M. (1977). – Existence d'une couverture non plissée d'âge paléozoïque inférieur au sein de la zone mobile de l'Afrique Centrale : âge K-Ar des formations de type Mangbai (Nord-Cameroun) (en coll. avec M. LASSERRE et J.C. BAUDRON). *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 284, sér. D, n° 21, p. 2067-70.
- FERAUD C. – Datation K-Ar des basaltes des Açores. Thèse 3e cycle Paris. Déc. 77.
- JORON J.-L., BOUGAULT H., TREUIL M., ALLEGRE C.J. (1977). – Etude géochimique des roches magmatiques de la zone FAMOUS et de l'Archipel des Açores. *Bull. Soc. Geol. France* (7), t. XVIII, n° 4, p. 811-818.
- MINSTER J.F., MINSTER J.B., TREUIL M., ALLEGRE C.J. (1977). – Systematic use of trace elements in igneous processes. Part II : Inverse problem of the fractional crystallisation process in volcanic suites. *Contrib. Mineral. Petrol.* 61, 49-77.
- MORRAND Ph. (1978). – Déséquilibre radioactif ^{230}Th - ^{238}U dans les Caves d'Islande et les tholéïtes de la zone FAMOUS. Thèse 3e cycle Paris VII.
- OBSERVATOIRES VOLCANOLOGIQUES DES ANTILLES. – SEMET M., SHIMIZU N. (1976). – Scanning electron microscopy and electronprobe micro-analysis of the Soufrière, Guadeloupe ; tephra ejected in the August-September 1976 events. *Bull.* 59-85.
- OBSERVATOIRES VOLCANOLOGIQUES DES ANTILLES. – TREUIL M., MEYER G., QUISEFIT J.-P., JORON J.-L., GRAPPIN C. (1976). – Geochemical investigations of the tephra rejected by the Soufrière volcano during the 1976 eruption ? *Ibid.* ?, 86-115.
- OBSERVATOIRES VOLCANOLOGIQUES DES ANTILLES. – DUPRE B., LAMBRET B., ALLEGRE C.J. (1976). – Lead and Sr isotopic composition of Guadeloupe ash during the 1976 eruption. *Ibid.*, 116-122.
- OBSERVATOIRES VOLCANOLOGIQUES DES ANTILLES. – JAVOY M. (1976). – Carbon isotopic analysis of CO₂ in fumaroles from La Soufrière. *Ibid.*, 123-125.
- OBSERVATOIRES VOLCANOLOGIQUES DES ANTILLES. – SEMET M., BERNARD A., MONEYRON N. (1977). – Pétrographie, VI.
- OBSERVATOIRES VOLCANOLOGIQUES DES ANTILLES. – FOUILLAC C., OUZOUNIAN G. (1977). – Géochimie des eaux. *Ibid.*, VII.
- OBSERVATOIRES VOLCANOLOGIQUES DES ANTILLES. – TREUIL M., MEYER G., JORON J.-L. (1977). – Géochimie des tephra de la Soufrière. *Ibid.*, VIII.
- OBSERVATOIRES VOLCANOLOGIQUES DES ANTILLES. – JAVOY M. (1977). – Analyse des gaz. *Ibid.*, IX.
- RICHARD P., SHIMIZU N., ALLEGRE C.J. (1976). – 143 Nd/146 Nd a natural tracer : an application to oceanic basalts. *Earth Planet. Sci. Lett.* 31, 269-278.

IV – GAZ VOLCANIQUES

Jacques CARBONNELLE
Commissariat à l'Energie Atomique
Section Technique d'Etudes de Pollution
dans l'Atmosphère et dans les Mines – 91190 GIF SUR YVETTE
et pour l'Etude de la phase gazeuse de l'Etna
en collaboration avec
Jean-Louis CHEMINEE
Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure, 75005 PARIS

Le présent rapport ne recouvre que les travaux des équipes qui nous ont fait part de leurs résultats pour la période considérée.

Les laboratoires concernés sont surtout ceux ayant participé aux activités de la RCP 215 du CNRS (Responsable H. TAZIEFF).

Centre des Faibles Radioactivités (CNRS-CEA)

BP n° 1

91190 Gif sur Yvette

Etude des "cendres" de La Soufrière, mesure du débit des volcans en métaux lourds et aérosols radioactifs.

Section Technique d'Etudes de Pollution dans l'Atmosphère et dans les Mines (CEA/IPSND/DP)

BP n° 6

92260 Fontenay aux Roses

Téledétection des émissions gazeuses d'origine volcanique, analyses par chromatographie en phase gazeuse, géochimie des gaz hydrothermaux.

Laboratoire d'Etudes d'Environnement et de Mesures Solaires (CEA)

BP n° 85

38041 Grenoble Cédex

Analyse des espèces soufrées et des halogènes dans les gaz volcaniques.

Institut de Physique du Globe

75230 Paris Cedex 05

Surveillance des volcans antillais, analyse de la composition isotopique des gaz volcaniques.

Ecole Nationale Supérieure d'Electrochimie et d'Electrometallurgie

BP n° 44

38041 St Martin d'Hères

Mise au point de sondes électrochimiques pour mesure de la fugacité de l'oxygène dans les gaz volcaniques.

1 - MISE AU POINT D'UNE TECHNOLOGIE ADAPTEE AUX RECHERCHES VOLCANOLOGIQUES

L'étude des gaz volcaniques est basée sur le postulat que les gaz éruptifs présentent une importance fondamentale dans les processus volcaniques, tant par leur rôle moteur dans l'éruptivité des magmas que par les informations qu'ils sont susceptibles de transmettre rapidement sur l'évolution de ces magmas souterrains. Mais les difficultés opposées à la récolte d'échantillons des exhalaisons de "haute" température ($T > 700^{\circ}\text{C}$) avaient jusque-là limité les analyses existantes à moins de deux douzaines en tout de par le monde et avaient empêché le développement de toute instrumentation valable. Le premier objectif est donc de créer, d'expérimenter et rendre opérationnel un arsenal d'instruments fiables.

Divers types d'instruments de mesure in-situ, de mesures à distance, d'échantillonnage et d'analyse ont été progressivement mis au point. Ceci constitue un pas décisif sans lequel aucune étude sérieuse du phénomène éruptif ne peut être entreprise.

Dans le choix d'un ou plusieurs paramètres à mesurer, il doit être tenu compte à la fois de la représentativité de chaque paramètre (de sa signification volcanologique) et de la faisabilité de la mesure, en fonction de contraintes financières inévitables. Le choix peut alors se porter principalement sur :

- la mesure des débits de matière et d'énergie ;
- l'échantillonnage et l'analyse détaillée des gaz éruptifs ($T > 700^{\circ}\text{C}$).

Mesure du débit de matière d'un volcan

Si le débit de lave peut être grossièrement évalué à l'œil (ou mieux par photogrammétrie), il n'en est pas de même du débit de gaz dont l'évaluation subjective dépend essentiellement de l'hygrométrie ambiante. Pourtant la connaissance du débit de la phase gazeuse a une importance fondamentale car ce débit intervient pour une part non négligeable (et bien souvent prépondérante) dans le "bilan matière" du volcanisme.

Pour mémoire, ont été développés dans les premières années d'existence de la R.C.P. N° 215 un débitmètre à hélium (1) et des anémomètres fonctionnant dans l'ambiance agressive des gaz volcaniques à haute température. Plus prometteuse par ses applications potentielles en volcanologie, une méthode téléanémométrique (mesure à distance de la vitesse d'un jet de gaz ou d'un panache de fumée) a pu être mise au point sur l'Etna (2). Enfin, on dispose actuellement d'une méthode très générale permettant, pour une espèce chimique quelconque, l'évaluation du débit d'un volcan actif (Fig. 1). Cette méthode suppose la mise en œuvre simultanée des mesures suivantes :

- concentration de l'espèce chimique considérée dans le panache volcanique ;
- concentration de SO_2 au même point ;
- concentration de SO_2 intégrée sur une section droite du panache volcanique en aval du cratère actif (spectrométrie de corrélation) et
- vitesse du vent à l'altitude du panache (vidéotéléanémométrie).

Mesure du débit d'énergie d'un volcan

L'énergie totale émise par un volcan actif constitue le meilleur indicateur de son activité globale.

(1) G. CHEVALIER, J. LE BRONEC, C. VAVASSEUR. - Mesure des débits gazeux à l'aide d'un tracteur. Note CEA-N-1767, 1974.

(2) G.J. LLEWELLYN. - A remote velocity monitor using cross-correlation of infra red radiation. Ph-D. Thesis, University of Bradford, 1976.

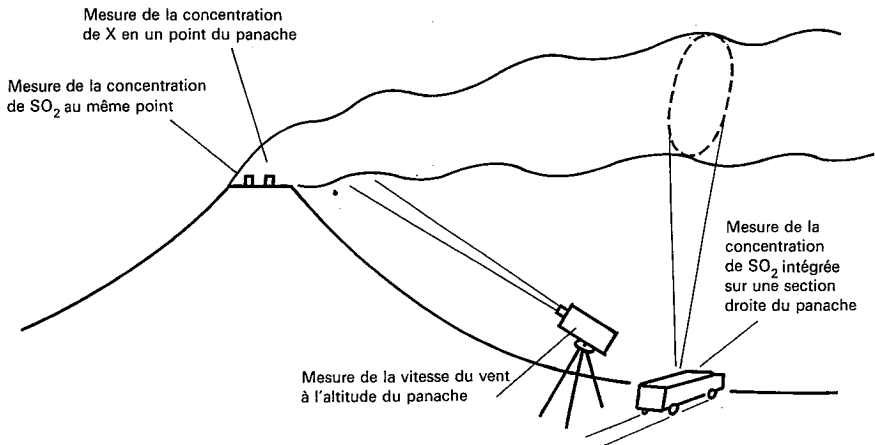


Figure 1. — MESURE DU DÉBIT DE L'ESPÈCE CHIMIQUE « X »

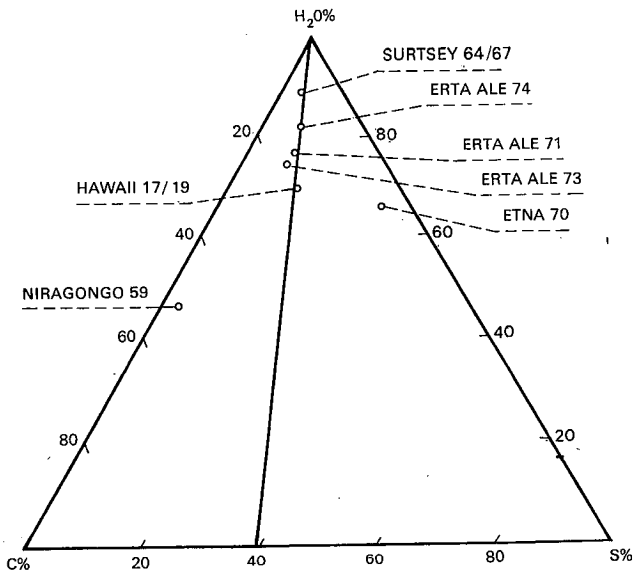


Figure 2. — GAZ MAGMATIQUES

Outre divers radiateurs adaptés à la mesure du flux thermique des zones solfatarieuses, un radiomètre infra-rouge (doté de quatre filtres interférentiels placés en série) a été mis au point par la S.T.E.P.A.M. à l'issue d'un ensemble de missions sur les volcans italiens ; il permet l'évaluation des énergies transmises d'un volcan à l'atmosphère par rayonnement (et, de surcroît, de mesurer les concentrations relatives en CO_2 et SO_2 dans un jet de gaz chauds).

Echantillonnage et analyse de gaz éruptifs

Pour faire face aux difficultés que pose, dans certains cas, l'altération dans le temps de la composition initiale d'un échantillon de gaz volcaniques, il est apparu indispensable de multiplier les procédés d'échantillonnage et d'analyse, chacun présentant des qualités et des défauts spécifiques. Dans les cas les plus défavorables, ce n'est qu'à l'issue de l'ensemble des analyses que peut être reconstituée une composition chimique représentative du gaz volcanique prélevé.

D'autre part des études thermodynamiques ont montré clairement la nécessité d'accroître la sensibilité des chromatographes en phase gazeuse, en particulier pour l'hydrogène, le méthane et le monoxyde de carbone ; depuis 1976, des progrès importants ont été réalisés dans ce sens.

2 - RESULTATS DE RECHERCHE

Il n'est sans doute pas inutile de rappeler ici pourquoi l'étude des paramètres décrivant l'émanation volcanique est indispensable à la compréhension du phénomène.

a) Les émissions gazeuses sont *toujours* liées aux éruptions volcaniques alors que ce n'est pas nécessairement le cas des événements de nature géophysique (agitation sismique, inflation de l'appareil volcanique, variations du champ magnétique, par exemple).

b) Les gaz sont le moteur des éruptions volcaniques : cette affirmation, parfois mise en doute pour des éruptions strictement effusives, est indiscutable dans le cas de toutes les éruptions explosives, qui sont les plus dangereuses. Un volcan en éruption apparaît alors comme une machine thermique dans laquelle les gaz, initialement en solution dans le magma, transforment par leur expansion l'énergie thermique profonde en énergie mécanique (avec un rendement énergétique d'ailleurs très bas). L'étude des gaz renseignerait donc directement sur la nature de ces échanges énergétiques.

c) A cause de leur très faible viscosité, les gaz, sous le même gradient de pression, se déplacent beaucoup plus rapidement que le magma d'où ils sont issus. Les informations qu'ils véhiculent précèdent ainsi, parfois de beaucoup, l'apparition du magma à la surface.

Si le nombre des analyses de roches volcaniques s'élève à plusieurs centaines de milliers, les analyses de *gaz éruptifs* ne se comptaient que par quelques dizaines il y a peu d'années.

Le tableau I ci-joint précise la liste des échantillons de gaz volcaniques de haute température prélevés à ce jour.

1) Le nombre actuel de résultats a permis de mettre en évidence un certain nombre d'invariants dans la composition de la phase gazeuse volcanique. En particulier, parmi les premières conclusions que l'on peut tirer de la composition de ces gaz, l'une des plus intéressantes à première vue est l'apparente constante du rapport carbone/soufre (fig. 2). Il se pourrait que ce rapport soit significatif, soit de la nature du volcanisme, soit de son activité. Les résultats les plus récents ne sont pas reportés sur les diagramme triangulaire H-C-S car des problèmes sont apparus pour le dosage du soufre total dans les gaz prélevés à moyenne température (en particulier ceux du volcan MERAPI), problèmes qui ne se posaient pas dans le cas des gaz prélevés à haute température pour lesquels le soufre est entièrement sous forme d'anhydride sulfureux. Les difficultés analytiques, différentes selon le conditionnement

TABLEAU I
Liste des échantillons de gaz volcaniques de haute température prélevés à ce jour

Année	Auteur	Volcan	Site	Température (°C)	Nombre
1917/19	SHEPHERD JAGGAR	KILAUIA	Lac de lave	1200	26
1954	IWASAKI	SHOWASHINZAN	Dôme endogène	760	1
1957	et al.	"		655	1
1959		"		700	3
1960	CHAIGNEAU et al.	NIRAGONGO	Lac de lave	980	13
1964	ELSKENS et al.	STROMBOLI	Coulée	980	10
1964/67	SIGVALDASON ELISON	SURTSEY	Cratère	1100	13
1968	FINLAYSON et al.	KILAUEA	Cratère	1000	?
1970	LE GUERN	ETNA	Coulée	1000	17
1971	CLARK	WHITE ISLAND	Cratère	650	2
1971	LE GUERN et al.	ERTA ALE	lac de lave	1075	20
1972	CIGGENSACH	WHITE ISLAND	Cratère	620	1
1972	LE GUEIN	NIRAGONGO	Lac de lave	1000	6
1973	TAZIEFF et al.	ERTA ALE	Lac de lave	1210	57
1974	CIGGENBACH	ERTA ALE	Lac de lave	1130	71
1975	LE GUERN LE GUERN	ETNA	Coulée	1000	15
1975	ALLARD MATSUBAYA et al.	SATSUMAIWOJIMA	Dôme	835	1
1976	LE GUERN ALLARD	ETNA	Coulée	950	10
1976	MENYAILOV	TOLEACHIK	Coulée	?	?
1977	LE GUERN et al.	MERAPI	Dôme endogène	800	25
1978	LE GUERN ALLARD	MOMOTOMBO	Cratère	750	47

de l'échantillon (ampoules "vides" ou ampoules "à soude") sont encore incomplètement surmontées.

2) Les résultats obtenus par l'étude isotopique des gaz volcaniques permettent de dégager les points suivants :

— Une convergence objective entre la composition isotopique des gaz et les conditions tectoniques du site volcanique. Les gaz analysés ont une origine d'autant plus primaire lorsqu'on

passé d'un volcan d'arc (VULCANO) à un volcan basaltique en milieu continental (ETNA), puis à un volcan de rift (ERTA ALE). On peut donc caractériser de "bons" volcans. Le cas optimum est fourni par le volcan ERTA ALE.

- H_2O est essentiellement à totalement d'origine superficielle. La vapeur d'eau, y compris dans des gaz éruptifs en équilibre avec leur magma, provient donc pour l'essentiel d'eau recyclée.

- Les bilans de dégazage et les valeurs obtenues pour le carbone à l'ERTA ALE permettent d'éclaircir les différences constatées jusqu'alors entre les $\delta^{13}C$ des basaltes et ceux des réservoirs profonds riches en carbone (carbonatites, diamants, kimberlites).

- En définissant un état stationnaire de référence pour la source des gaz, la composition isotopique devrait fournir un excellent traceur d'une éventuelle évolution de cette source à l'approche d'une éruption (exemple : VULCANO).

3) La méthode mise au point pour la mesure du débit des espèces gazeuses d'un volcan en activité a fourni des résultats tout à fait nouveaux, en ce qui concerne en particulier le volcan ETNA (Tableau 2 et tableau 3).

TABLEAU II
Débit d'anhydride sulfureux du volcan Etna ($t.j^{-1}$)

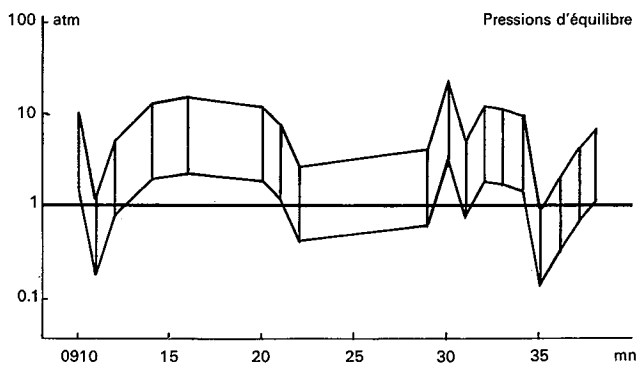
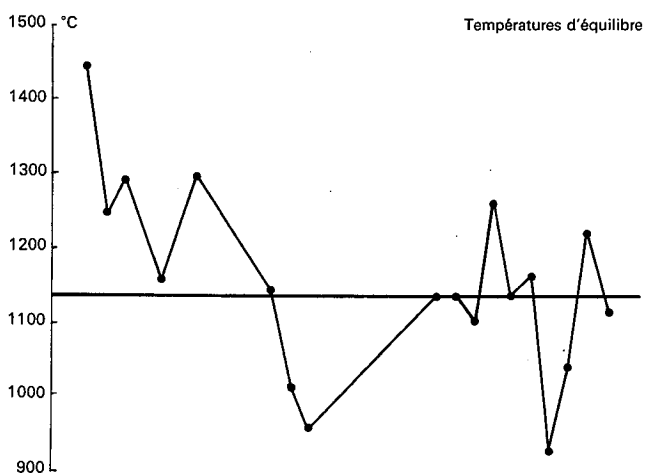
Année Date	1975			1976			1977		
	14 Juin	15 Juin	18 Juin	31 Janvier	14 Juin	15 Juin	16 Juin	22 Mai	23 Mai
Débit	4800	3300	4100	5400	1600	2900	6100	1200	1100
	3800	4200	2700	12400	1300	3700	6500	1100	
	3200	3800	3600	7400	2300				
	2700	3600			2200				
	3900		3400						
	3600								
	4200								
	3700								

TABLEAU III
Débit de l'Etna ($t.j^{-1}$)

(entre parenthèses les valeurs les moins sûres
car déduites d'un nombre très restreint de mesures)

Date	SO ₂	H ₂ O	CO ₂	SO ₄	Cl ⁻	F ⁻
Juin 1976	3000		(86000)	2PO	(11500)	(450)
Mai 1977	1100	37000	29000	(40)	220	15

Outre l'intérêt que présentent de telles mesures pour une volcanologie "de prévision" (la méthodologie peut être transférée à tout observatoire volcanologique qui en ferait la demande), les résultats, dans l'hypothèse où l'ETNA serait représentatif du volcanisme mondial, ont mis en évidence une sous-évaluation systématique de la contribution en carbone et en soufre des volcans à l'atmosphère telle qu'elle est couramment admise dans la littérature (Tableau IV).



ERTA ALE 74

Figure 3. — Température et pression d'équilibre calculée pour dix-huit échantillons (repérés par leur instant de prélèvement).

TABLEAU IV
Flux de carbone et de soufre
(10⁵ t/an)

Élément	Etna	Volcanisme mondial
C	3	50 (Woodwell) (1) . 7 (Kellog al.) (2)
S	.2	5 (Stoiber al.) (3)

(1) G.M. WOODWELL. — The Carbon Dioxide Question. *Sci. Am.*, 34-43, 1978

(2) W.W. KELLOG, R.D. CADLE, E.R. ALLEN, A.L. LAZRUS, E.A. MARTELL. The Sulfur Cycle. *Science*, 175, 587-596, 1972.

(3) R.E. STOIBER, A. JEPSEN. — Sulfur Dioxide Contributions to the Atmosphere by Volcanoes. *Science*, 182, 577-578, 1973

4) Dans la description d'un échantillon de gaz volcanique, il importe de distinguer la composition atomique et la composition moléculaire de l'échantillon, en ce qu'elles véhiculent des informations de nature très différentes.

La composition atomique de l'exhalaison gazeuse volcanique renseigne sur les abondances relatives des divers éléments "volatils" dans un magma — H, S, Cl et F principalement — et permet de préciser les balances géochimiques de ces éléments, c'est à dire la contribution du volcanisme à l'atmosphère et à l'hydrosphère. Les résultats obtenus dans ce domaine ont été présentés ci-dessus.

La composition moléculaire des gaz volcaniques renseigne sur les conditions thermodynamiques de leur genèse et de leur évolution depuis une source profonde jusqu'à la surface. L'hypothèse selon laquelle les gaz volcaniques sont en équilibre thermodynamique aux températures magmatiques (T 700°C) a été solidement étavée par un certain nombre de prélèvements et de mesures effectués, en particulier sur des lacs de lave en activité (Fig. 3). L'état d'oxydation d'un gaz volcanique (rapports H₂/H₂O, CO/CO₂, CH₄/CO₂ et H₂S/SO₂) peut être prévu par la seule connaissance de la température et des pressions partielles d'oxygène et de vapeur d'eau du système. Par ailleurs, la pression partielle de vapeur d'eau est le plus souvent voisine de la pression totale, elle-même très proche de la pression atmosphérique dans le cas d'un prélèvement à la surface d'un lac ou d'une coulée de lave. Température et pression partielle d'oxygène restent donc les paramètres clef pour la description de l'équilibre chimique dans un échantillon de gaz magmatiques. C'est pourquoi J.C. SABROUX, et P. ZETWOOG (1976) ont proposé l'utilisation du diagramme d'Ellingham pour la représentation graphique de l'équilibre d'une phase gazeuse volcanique. Ce diagramme, classique en métallurgie, et auquel nous ont été adjointes deux échelles H₂S/SO₂ et CH₄/CO₂, permet de représenter (à température et pression partielle d'oxygène données) l'état d'équilibre d'un échantillon de gaz volcanique quelle que soit la composition atomique de l'échantillon, avantage que n'offre pas les représentations graphiques traditionnelles P_i = f(P) ou P_i = f(T). Sur le diagramme de la figure 4 sont reportés, en particulier, les résultats obtenus en juillet 1976 sur le volcan MERAPI, à la fois prélèvements de gaz (astérisques et tableau V) et mesures directes de la fugacité d'oxygène (parallélogramme).

Un tel diagramme permet de comparer directement l'état d'oxydation des gaz prélevés à l'état d'oxydation — mesuré (sur les laves) ou supposé — du magma où ils ont pris naissance : L'état remarquablement réduit des gaz éruptifs du MERAPI a conduit les auteurs à émettre l'hypothèse d'une diffusion préférentielle d'hydrogène depuis les racines du dôme actif du volcan vers le champ fumerollien de Woro-Gendol et à proposer la mesure régulière de la fugacité d'oxygène comme une des méthodes de surveillance géochimique de ce volcan.

DIAGRAMME d'ELLINCHAM
d'après M. OLETTE M. FRANCEY-MORET
(I.R.S.I.D.)

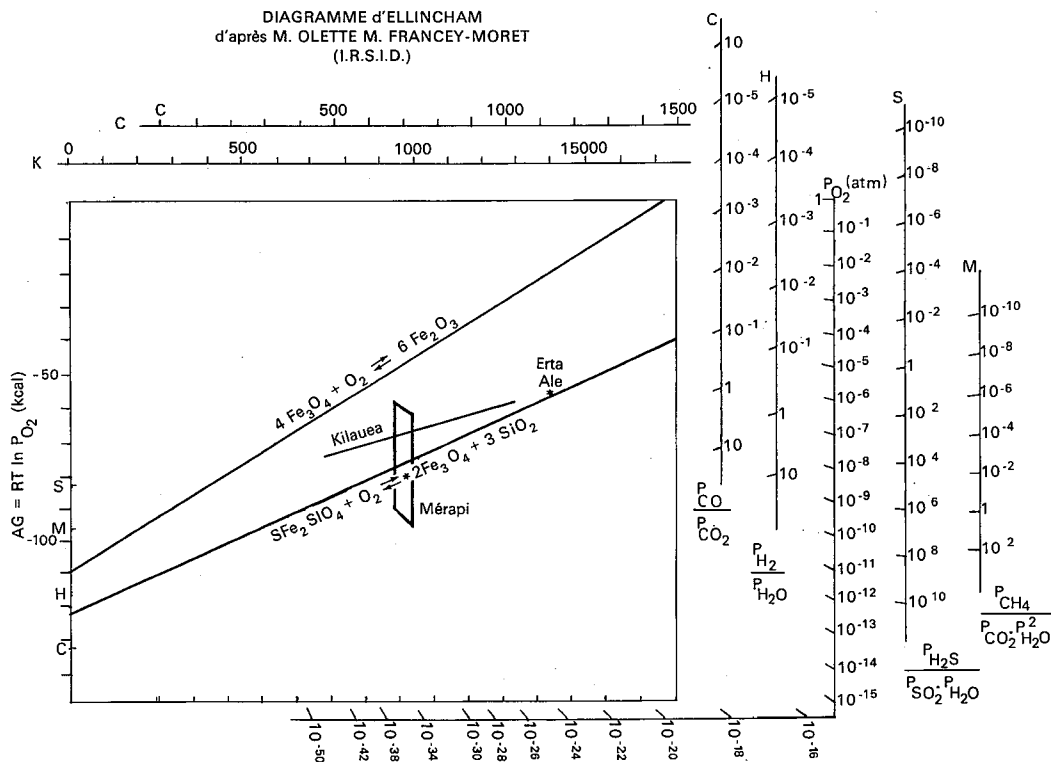


Figure 4

TABEAU V

Volcan	Date	Ampoule "vide"	Température °C	H ₂ O%	CO ₂ %	H ₂ %	SO ₂ %	H ₂ %	CO%	CH ₄ %	N ₂ %	Air%
MERAPI	15.07.77	14	680-710	94.4	83.3		1.1	5.8	6.7E-2	1.3E-3	9.7	13
MERAPI	15.07.77	113	680-710	95.5	87.3		2.9	8.8	7.8E-2	5.2E-4	0.8	15
MERAPI	16.07.77	11	710	91.5	77.7		2.1	8.4	8.2E-2	8.0E-4	11.6	6
MERAPI	16.07.77	N1	710	95.3	75.4		2.4	7.9	4.0	1.5E-3	10.1	4
MERAPI	24.07.77	18	878	89.4	62.1		2.1	14.5	1.3		19.8	31
MERAPI	24.07.77	19	870	94.0	66.8		7.9	19.2	5.68-1		5.6	4
KAWAH-IDJEN	19.07.77	A42	245	80.0	71.8	24.0	0.4	8.0E-3			3.3	53
GEDEH	31.07.77	12	146	94.2	68.7	18.7		.3		1.1E-4	12.8	26

3. CONSULTATIONS ET EXPERTISES

Une théorie de l'activité éruptive, si elle existait actuellement, pourrait suffire à assurer le succès de toutes les prévisions volcanologiques. Malheureusement, il apparaît avec évidence que l'on est encore bien loin de l'élaboration d'une telle théorie valable pour l'ensemble des volcans du monde, ou même pour un volcan particulier seulement (le KILAUEA à Hawaii par exemple). Il serait cependant faux de conclure à la vanité de toute prévision dans ce domaine.

Il convient en effet tout d'abord de noter que très peu d'éruptions volcaniques ayant débuté par un paroxysme, une prévision volcanologique se résume en général à un pronostic sur l'évolution d'une éruption *en cours* et non sur le réveil éruptif d'un volcan assoupi. Confronté à un problème de ce type et en l'absence de théorie de validité générale, le volcanologue sera toujours conduit à faire un choix intuitif entre un ensemble d'hypothèses successivement envisagées. Cette intuition demeure essentiellement le produit de l'expérience, mais elle doit aussi s'appuyer sur l'interprétation volcanologique du plus grand nombre possible de mesures significatives.

Le cas de LA SOUFRIERE

L'analyse de la situation au 23 juillet 1976 (H. TAZIEFF : Rapport de la mission volcanologique au volcan de la soufrière) a conduit l'auteur à prôner le retour à l'activité normale de la zone située au pied sud de LA SOUFRIERE (mais non la zone sommitale) ceci afin d'abréger le plus possible l'évacuation volontaire de la population de Basse-Terre.

Cette analyse n'a pas été mise en défaut par le déroulement ultérieur des phénomènes éruptifs, et ce jusqu'à la cessation de l'activité phréatique en mars 1977.

En particulier, l'étude des quelques 200 analyses de gaz effectuées par la S.T.E.P.A.M. tout au long de la crise éruptive n'est pas venue contredire ce diagnostic initial.

Le tableau VI présente cinq échantillons *choisis* parmi les meilleurs récoltés tout au long de la crise et les compare à quelques analyses effectuées avant 1976 et au gaz des forages géothermiques de Bouillante ; il est clair qu'aucune des conclusions brièvement énumérées ci-dessous ne provient de ce seul tableau mais bien de l'ensemble des analyses.

TABLEAU VI

Lieu de prélèvement	Date	N°	CO ₂ %	H ₂ S %	SO ₂ %	H ₂ %	CO %	CH ₄ %	N ₂ %	Ar %	He %
Bouillante 80-2 (1)	10.11.70		94.9	1.0		0.5		0.5	3.0	0.1	
Col de l'Echelle (2)	07.74	ε	92.3	7.1		0.6		9.2E-4			
Col de l'Echelle (3)	75	G/1	96.1	2.7		0.2			1.0		
Fracture de Juillet (4)	14.07.76	A64	58.4	34.9	6.5	0.2	0.03				1.3E-3
Fracture de Juillet (5)	28.07.76	86719	65.2	18.8	5.4	10.7					
Fracture de Juillet (6)	29.07.76	EP3	71.6	18.2	1.1	9.2					
Cratère de Sud (7)	4.12.76	A-114	73.5	1.2	7.5	17.2	0.11				
Fente du Nord (6)	22.02.77	AVI	94.7	4.1		1.5		1.2E-4			

(1) D'après M. CHAIGNEAU (analyse par spectrométrie de masse).

(2) Ampoule "KOH".

(3) Ampoule "vide".

(4) Ampoule "NaOH".

(5) Ampoule "vide".

(6) Sac "TEFLON" (analyse par chromatographie).

(7) Ampoule "vide" (température de prélèvement : 164°C).

(8) Ampoule "vide".

Ce tableau ne sert qu'à illustrer les modifications essentielles et très générales enregistrées par la phase gazeuse lors de la crise volcano-sismique de 1976-1977, à savoir :

- apparition d'anhydride sulfureux ;
- diminution du rapport C/S ;
- augmentation de la teneur relative en hydrogène ;
- apparition de monoxyde de carbone.

Il n'est peut-être pas inutile d'insister sur le fait que ces modifications ne proviennent pas uniquement d'une mauvaise conservation des échantillons dans le temps : elles traduisent bien une modification de l'émanation volcanique elle-même.

Cette modification, a été interprétée comme une conséquence de l'ébullition, due à l'ouverture brutale de fractures dans le dôme de La Soufrière, de nappes d'eaux souterraines percolées par des gaz de même origine que ceux de Bouillante. Par contre, l'apparition de monoxyde de carbone, en quantité décelable dans un petit nombre d'échantillons, ne peut s'expliquer comme plus haut par une diminution du rapport gaz/vapeur : elle traduit une origine à plus haute température – métamorphique ($T > 400^{\circ}\text{C}$), voire magmatique – d'une petite partie des gaz émis ; cependant, la présence quasi-constante d'hydrogène sulfuré dans les échantillons prélevés indiquait une origine hydrothermale très probable de la majeure partie des émissions gazeuses.

En résumé, l'étude détaillée de la phase gazeuse de La Soufrière a conduit aux conclusions suivantes concernant la circulation des fluides dans le volcan :

- une circulation hydrothermale dominante ($T \approx 230^{\circ}\text{C}$) ;
- une participation intermittente de fluides engendrés à plus haute température.

Une surveillance géochimique continue du volcan pouvait donc permettre de déceler, dans ce cas, toute modification quantitative de la participation relative de ces deux sources.

ETUDE DE LA PHASE GAZEUSE – ETNA

Jean-Louis CHEMINEE
ENS ULM.

Hughes DELORME
Laboratoire de Géochimie des Isotopes Stables, Paris VII

I – CHOIX DES SITES DE PRELEVEMENTS

Afin de pouvoir suivre la composition de la phase volatile nous avons soigneusement choisi des sites susceptibles de satisfaire aux critères suivants :

- 1) Localisation précise sur le terrain.
- 2) Débit maximum et températures élevées.
- 3) Minimum de contamination atmosphérique (risques d'oxydation).
- 4) Accès facile et minimum de risques d'éboulement.

Et cela, à deux endroits différents :

- 1) Le cratère Nord-Est, siège permanent d'éruption.
- 2) Le nouveau cratère près de Vulcarolo issu des éruptions de l'été 78.

II – NATURE DES ETUDES ENVISAGEES

Plusieurs mesures ont été effectuées :

- 1) Mesures de températures chaque fois aux deux sites de prélèvements ainsi qu'aux deux autres sites sur le cratère de l'été 78.
- 2) Mesure de Radon à l'aide d'ampoules spéciales et comptage au refuge.
- 3) Prélèvements de sublimés afin d'en déterminer la composition chimique et la structure, et cela pour étudier le problème des transferts de métaux par la phase gazeuse, et le dépôt sélectif de chlorure ou de sulfates en fonction de la température et du degré d'oxydation des gaz.
- 4) Prélèvements de gaz avec des ampoules à vide et à déshydratants.

III - METHODES ANALYTIQUES UTILISEES

Les ampoules à Radon, une fois comptées, sont passées au chromatographe en phase vapeur afin de déterminer la quantité d'air parasite donc à ramener la quantité de radon au gaz actif sec.

La chaîne de comptage est étalonnée à l'aide de Radium (opération en cours).

Les sublimés ont été analysés par diffraction des rayons X.

Un échantillon a été soumis à l'activation neutronique afin de voir si cette méthode apporte des résultats intéressants.

Des condensats ont aussi été prélevés et seront analysés en chimie aqueuse classique, ainsi que des condensats issus de l'attaque chimique de la canne en inox.

Pour ce qui est des gaz : analyse en CPV sur colonne de Porapak Q (CO_2 , H_2S , H_2O , SO_2) et tamis moléculaire SA (H_2 , $\text{O}_2 + \text{A}_2$, N_2 , CO , CH_4).

HCl est piégé sur Ag_3PO_4 avant passage au CPV et mesuré selon la méthode de Chaigneau.

Puis, le CO_2 , H_2O et CO seront extraits à la fin de la période d'analyse au CPV pour l'analyse isotopique.

Les compositions en ^{18}O de CO_2 et H_2O conduisent à la détermination de la température d'équilibre au sein du réservoir.

Enfin, l'ampoule est lessivée afin d'entraîner le SO_3 et d'en déterminer la quantité contenue dans l'ampoule. Cette mesure jointe au rapport N_2/O_2 du gaz permettra de déterminer l'état d'oxydation du gaz. (Ces analyses ne seront faites que sur les ampoules à vide à cause du P_2O_5).

IV - RESULTATS : TEMPERATURES

Les fluctuations de température dans les sites observés au nouveau cratère appellent les remarques suivantes :

- au cours du temps, nous avons observé au niveau du site 3 l'ouverture progressive d'une faille reliant les sites 3 et 1. Il en est résulté une augmentation de débit du site 3 et une diminution du site 1, d'où baisse la température (de 911°C à 843°C) ;

- les fluctuations faibles de température du site du Nord-Est ne sont pas suffisamment significatives (écart maximal de 20° autour de la température moyenne de 811°C ;

- le site 4, non affecté par cette ouverture de faille ne voit pas son débit varier, la température fluctue autour d'une température moyenne de 874°C avec deux écarts maximum de 10°C , attribuables aux variations de la quantité d'air qui balayait cette fumerolle, ainsi que l'analyse des gaz l'indique.

V - RESULTATS : RADON

Les mesures absolues n'ont pu être effectuées à l'heure actuelle, l'étalonnage du photomultiplicateur n'étant pas terminé.

Cependant, des mesures d'activité relatives indiquent que pour le Nord-Est, la concentration diminue de moitié en 11 jours.

Par contre, aucune variation d'un ordre supérieur aux écarts statistiques ne peut être observée pour le cratère MAI 1978.

VI – RESULTATS : SUBLIMES

Deux méthodes d'analyses ont été utilisées :

- activation neutronique pour la recherche de traces ;
- diffraction X pour la structure cristalline et les espèces majeures.

En analyse aqueuse, il est possible de déterminer la quantité de chlorure Cl 5,15 % (sur échantillon de 1,029 g).

Pour ce qui est du Rb, il y a un enrichissement notable par rapport aux laves (de l'ordre de 30 à 40 ppm). Huntington (rapport sur l'Etna 1977) indique un enrichissement de l'ordre de 35. Cet échantillon est donc nettement plus enrichi que prévu.

Remarquons aussi que Huntington décrit un échantillon bleu-vert pâle (température 1046°C) mais constitué uniquement de halite et de sylvite (S 5,6 % ; Cl 45,9 % ; Na₂O 26,4 % ; K₂O 14,9 % ; CuO 1,1 % ; Zn 381 ppm ; aucune valeur de Rb). Richter et Moore citent un échantillon (SiO₂, Aphthitalite, Thénardite, Soufre) relativement semblable. A la Réunion, un échantillon d'Aphthitalite et de Thénardite à 0,94 % de CuSO₄ a également été trouvé.

Pour ce qui est des gaz en équilibre, notons tout de suite des concentrations élevées en HCl : jusqu'à 700 ppm dans l'ampoule, soit à peu près du % des gaz actifs. Notons également, l'absence de SO₂, oxydé en SO₃, alors qu'au niveau du cratère Nord-Est, l'HCl est absent mais par contre, il subsiste du SO₂ (pourcentage faible mais semblable aux analyses de Huntington).

VII – RESULTATS : GAZ

Ampoules à vide (18 analyses sur 21 prélèvements).

– Pression dans les ampoules (après condensation de l'eau vapeur).

- Nord-Est : 540 mm Hg.
- MAI : 566 mm Hg.

– Composition chimique moyenne au Nord-Est.

- CO₂ : 29 %
- SO₂ : 7 échantillons sur 11 ont une valeur moyenne de 0,3 %. 4 échantillons ne présentent aucune trace de SO₂.
- H₂S : aucune trace.
- H₂ : valeur moyenne : 0,6 %.
- H₂O : de 50 à 60 % selon les ampoules.

Le reste est constitué d'air, de CO et de CH₄ en cours d'analyse et de dépouillement.

– Composition chimique moyenne au cratère de l'été 1978.

Il y a malheureusement beaucoup d'air. Cependant, il ne subsiste aucune trace de SO₂ (oxydé en SO₃), d'où appauvrissement en O₂ de l'air balayant la fissure et excès de N₂ (rapport N₂/O₂ nettement supérieur à celui de l'air atmosphérique).

Malgré cet air, l'hydrogène reste de l'ordre de 0,5 %, et résulte sans doute de l'attaque de la canne par HCl (voir ampoule à P₂O₅).

Ampoule à P₂O₅ (6 analyses sur 20 prélèvements)

- Pression dans les ampoules : 630 mm Hg. en moyenne (les ampoules ont été ouvertes plusieurs fois de façon à avoir le maximum de gaz, une fois l'eau piégée) (pH₂O = 10⁻⁴ mm Hg en équilibre avec P₂O₅).

- Composition chimique :

- sur les deux ampoules du Nord-Est

pas de SO ₂	H ₂	0,3 et 0,2 %
pas d'HCl	CO ₂	33 et 32,7 %
pas d'H ₂ S		

- sur les quatre ampoules analysées :

Beaucoup d'air

2 ampoules contiennent du HCl : 700 ppm
300 ppmTaux de H₂ semblable aux ampoules à vide.Une ampoule contient du SO₂ (rapport C/S : 2,12).

A noter, la concordance de ces résultats avec les analyses de Huntington en 1974 (rapport à la Royal Society, 1975 et 1977).

H ₂ O	50.01	Eruption de 1974.
N ₂	23.20	Température du gaz 1 046°C.
Ar	0.46	
CO ₂	24.38	
SO ₂	0.01	

En conclusion de ces premiers résultats, on peut déjà noter que la détermination des compositions chimiques de gaz et des sublimés confirmer des études précédentes, posent de nouvelles questions quand aux mécanismes des éruptions, et suggèrent de nouveaux perfectionnements tant au niveau de l'échantillonnage que de l'analyse.

PUBLICATIONS DANS LA PERIODE CONSIDEREE

- LE GUERN F., GIGGENBACH W., TAZIEFF H. (1975). - Equilibres chimiques des gaz éruptifs du volcan Erta'Ale (Ethiopie). *C.R. Ser. D*, 280, 2093-2095.
- LE GUERN F., GIGGENBACH W., TAZIEFF H., ZETWOO P. (1975). - Etudes des fluctuations de la phase gazeuse à l'étang de lave de l'Erta'Ale (Ethiopie). *C.R. Ser. D*, 280, 1959-1962.
- GIGGENBACH W., LE GUERN F. (1976). - The chemistry of magmatic gases from Erta'Ale, Ethiopia. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 40, 25-30.
- ALLARD P., LE GUERN F., SABROUX J.C. (1976). - Thermodynamic and isotopic studies in eruptive gases. *Geothermics*, 5, 37-40.
- TAZIEFF H. (1976). - Prévisions volcanologiques. *La Recherche*, 73, 349-357.
- LE GUERN F. (1976). - Measurements of the thermal energy radiated from volcanoes to the atmosphere (abstract). *EOS, Trans., Am. Geophys. Union*, 57, 659.
- LE GUERN F. (1976). - Volcanic gaz contribution to the atmosphere (abstract). *EOS, Trans., Am. Geophys. Union*, 57, 677.
- LAMBERT G., BRISTEAU P., POLIAN G. (1976). - Emission and enrichments of radon daughters from Etna Volcano magma. *Geophys. Res. Lett.*, 3, 724-726.
- CLOCCHIATTI R., DESNOYERS C., SABROUX J.C., TAZIEFF H., WILHELM S. (1976). - Relations entre les anorthoses de l'Erebus et leurs inclusions vitreuses. *Bull. Soc. fr. Minéral. Cristallogr.*, 99, 98-110.
- HAULET R., ZETWOO P., SABROUX J.C. (1977). - Sulfur dioxide discharge from Mount Etna. *Nature*, 268, 715-717.
- TAZIEFF H. (1977). - La Soufrière : volcanology and forecasting. *Nature*, 269, 96-97.
- LE GUERN F., TAZIEFF H., VAVASSEUR C., CARBONNELLE J. (1977). - Heat and gas transfer from the Niragongo lava lake (abstract). *EOS, Trans., Am. Geophys. Union*, 58, 920.
- FAIVRE-PIERRET R., GANTES M., GARREC J.P. (1977). - Fluorine and chlorine in the Etna plume and the resultant on surrounding vegetation (abstract). *EOS, Trans., Am. Geophys. Union*, 58, 920.

- LE GUERN F., CARBONNELLE J. (1977). – Carbon and sulfur contribution of two lava lakes to the atmosphere (abstract). EOS, Trans., *Am. Geophys. Union*, 58, 921.
- D'AMORE F., SABROUX J.C. (1976-1977). – Signification de la présence de radon-222 dans les fluides géothermiques. *Bull. Volcanol.*, 40, 106-115.
- GARREC J.P., LOUNOWSKI A., PLEBIN R. (1977). – The influence of volcanic fluoride emissions on the surrounding vegetation. *Fluoride*, 10, 152-156.

PARTICIPATION A DES CONGRES

- D'AMORE F., FERRARA G.C., NUTI S., SABROUX J.C. – Variations in radon-222 content and its implications in a geothermal field. *International Congress on Thermal Waters, Geothermal Energy and Vulcanism of the Mediterranean Area*, Athens, October 1976.
- LE GUERN F. – Geochemistry of volcanic gases applied to the volcano surveillance. *Informal Meeting on Volcanic Gases*, Naples, June 1977.
- LE GUERN F. – Hazard to human's and animal's health from toxic products of volcanic activity (Soufrière of Guadeloupe : 1976-1977 eruption). *UNESCO Workshop on Volcanic Hazards*, Durham, August 1977.
- BUAT-MENARD P., ARNOLD P. – Heavy metal chemistry and atmospheric emissions of aerosols from Etna volcano. *International Conference on Atmospheric Aerosols, Condensation and Ice Nuclei*, Galway, September 1977.
- ZETTWOOG P., HAULET R. – Experimental results on the SO₂ transfer in the mediterranean obtained with remote sensing devices. *International Symposium on Sulfur in the Atmosphere*, Dubrovnik, September 1977.
- LE GUERN F. – Volcanic gases and volcanic hazard : disturbance on the environnement. *Informal Meeting on Volcanic Gases*, Naples, June 1977.
- D'AMORE F., SABROUX J.C. – Determination of the volume of steam reservoirs by radon-222 measurements in geothermal fluids. *IASPEI/IAVCEI Joint General Assemblies*, Durham, August 1977.
- SABROUX J.C. – Thermodynamix Equilibria in Volcanic Gases. *IASPEI/IAVCEI Joint General Assemblies*, Durham, August 1977.

V – CROUTE OCEANIQUE ANCIENNE ET RECENTE

Thierry JUTEAU
Université de Strasbourg

Plusieurs équipes en France travaillent sur le *volcanisme sous-marin* et roches associées. Les unes étudient les associations magmatiques anté-orogéniques "hercynotypes" à spilites-kératophyres ; les autres étudient les complexes ophiolitiques, écailles de paléocroûtes océaniques et de manteau supérieur incorporées aux orogènes ; d'autres enfin étudient la croûte des océans actuels.

OPHIOLITES

Les travaux sur la pétrologie des ophiolites sont menés essentiellement par deux équipes, l'une à Nancy avec une dizaine de chercheurs (dirigée par le Prof. G. ROCCI) ; l'autre à Strasbourg avec 6 chercheurs (dirigée par moi-même), plus un certain nombre de chercheurs isolés, dont certains ont appartenu à la "R.C.P. Roches Vertes Mésogéennes" (1969-1975) dirigée par le Prof. ROCCI.

1 – Travaux de l'équipe de Nancy

Les études de l'équipe de Nancy se sont focalisées d'une part sur un certain nombre de massifs ophiolitiques non métamorphiques du Moyen-Orient (Chypre, Grèce, Iran), d'autre part sur les ophiolites métamorphiques des Alpes occidentales et de la Corse :

– à *Chypre*, l'équipe de Nancy travaille depuis de nombreuses années sur les ophiolites du Troodos, les formations de Mamonía et la chaîne de Kyrenia. Les formations volcaniques et sédimentaires du Trias supérieur ont été longuement étudiées par Melle LAPIERRE dans sa thèse d'Etat (1972) ; la chaîne de Kyrenia fait l'objet de la thèse de M. BAROZ, qui sera soutenue dans quelques mois. Au cours des trois dernières années, les efforts de l'équipe se sont focalisés sur les laves sous-marines et le complexe filonien du Troodos. M. DESMET a soutenu récemment une brillante thèse de 3ème cycle consacrée à la pétrologie des pillow-lavas du Troodos, dans laquelle il démontre l'unicité de la série, et réfute la coupure génétique habituellement faite entre les "lower pillows" et les "upper-pillows". Quant au complexe filonien, il est actuellement décortiqué par toute une équipe (DESMET, GAGNY, LAPIERRE, PARROT, ROCCI), en collaboration avec l'Institut de Minéralogie de Genève (M. DELALOYE) pour les datations absolues par la méthode K/Ar. Quatre générations de dykes ont déjà été mis en évidence, dont l'évolution chimico-minéralogique reflète celle des pillow-lavas subjacents.

Les publications concernant Chypre sont les suivantes (1975-1978) :

BAROZ F., DESMET A. et LAPIERRE H. (1976a). – Les traits dominants de la géologie de Chypre. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7, T XVIII, n° 2, 419-427.

DESMET A. (1976b). – Evidence of co-genesis of the Troodos Lavas, Cyprus. *Geological Magazine*, 113 (2), 165-168.

BAROZ F., DESMET A. et LAPIERRE H. (1976d). – Eastern Mediterranean ophiolites present along the north of the arabian plate could have been formed in a marginal basin. *25th International Geological Congress Sydney, Australia*, 16-25 August.

- DESMET A. (1977). – Contribution à l'étude de la croûte océanique mésozoïque de Méditerranée orientale : les pillow-lavas du Troodos (Chypre). Thèse de Spécialité Université de Nancy I, 221 p.
- DESMET A. et LAPIERRE H. (1977). – Les manifestations magmatiques du Troodos et des Nappes de Mamonia (Chypre) : Comparaison et discussion géotectonique. *Sciences de la Terre*, Nancy, T XXI, n° 1, 3-16.
- DESMET A., LAPIERRE H., ROCCI G., GAGNY C., PARROT J.F. et DELALOYE M. (1978). – Constitution and significance of the Troodos sheeted Complex. *Nature*, vol. 273. n° 5663, 527-530.

– En Grèce, les travaux de l'équipe concernent d'une part le complexe filonien et les laves du massif du Vourinos (thèse de 3ème cycle de M. PAUPY), d'autre part les ophiolites du VARDAR, étudiées par M. BEBIEN. Dans ce dernier cas, l'association étroite des ophiolites avec un socle granitique et migmatitique (massif du Guevgueli) constitue une situation hautement originale, qui pourrait s'interpréter dans un cadre géotectonique du bassin inter-arcs ou de mer marginale. Les dernières publications sont les suivantes :

- BEBIEN J., OHNENSTETTER D., OHNENSTETTER M., PAUPY A. et ROCCI G. (1975). – The role of hypabyssal magmatic rocks in our understanding of ophiolite models. *Petrology*, t. I, n° 2, 157-168.
- MERCIER J.L., VERGELY P. et BEBIEN J. (1975). – Les ophiolites helléniques "obductées" au Jurassique supérieur ; sont-elles les vestiges d'un océan téthysien ou d'une mer marginale péri-européenne ? *C.R. somm. S.G.F.* (4), 108-112.
- BEBIEN J. et MERCIER J.L. (1977). – Le cadre structural de l'association ophiolites-migmatites-granites de Guevgueli (Macédoine, Grèce) : une croûte de bassin inter-arc ? *Bull. Soc. géol. Fr.* (7), XIX, 4, p. 927-934.
- BEBIEN J. (1977). – Mafic and ultramafic rocks associated with granites in the Vardar zone. *Nature*, 270, 5634, 232-234.
- BEBIEN J. et GAGNY C. (1978). – Influence de phénomènes de décrochement sur l'organisation du magmatisme dans l'association ophiolites-granites de Guevgueli (zone du Vardar, Macédoine grecque). *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 286, 815-818.

– en Corse, les études sur les ophiolites alpines métamorphiques sont brillamment menées par le tandem OHNENSTETTER (M. et Mme), dont la thèse de 3ème cycle sur le "puzzle ophiolitique corse" en 1975 a fait date. En dépit de trois métamorphismes successifs (le premier étant un "métamorphisme océanique"), l'assemblage ophiolitique primaire a été reconstitué ; il montre en particulier une belle série de cumulats tholéitiques, avec développement spectaculaire des ferro-gabbros. Liste des publications :

- BEBIEN J., OHNENSTETTER D., OHNENSTETTER M., PAUPY A. et ROCCI G. (1975). – The role of hypabyssal magmatic rocks in our understanding of ophiolite models. *Petrology I*, 157-168.
- OHNENSTETTER D. et OHNENSTETTER-CROCHEMORE M. (1975). – Le puzzle ophiolitique corse. Un bel exemple de paléodorsale océanique. Thèse de spécialité. Nancy I, 386 p.
- OHNENSTETTER M., OHNENSTETTER D. et ROCCI G. (1975). – Essai de reconstitution du puzzle ophiolitique corse. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 280, 395-398.
- OHNENSTETTER D., OHNENSTETTER M. et ROCCI G. (1975). – Tholeiitic cumulates in a high pressure metamorphic belt. *Petrology I*, 291-317.
- ROCCI G., OHNENSTETTER D. et OHNENSTETTER M. (1975). – La dualité des ophiolites téthysiennes. *Petrology I*, 172-174.
- OHNENSTETTER D. et OHNENSTETTER M. (1976). – Modèle de fonctionnement d'une ride médio-océanique à partir de l'étude pétrologique de l'ophiolite corse. *Bull. Soc. géol. Fr.*, XVIII, 889-894.
- OHNENSTETTER D., OHNENSTETTER M. et ROCCI G. (1976). – Etude des métamorphismes successifs des cumulats de l'ophiolite corse. *Bull. Soc. géol. Fr.*, XVIII, 115-134.
- ROCCI G., OHNENSTETTER D. et OHNENSTETTER M. (1976). – Le log ophiolitique corse. *Bull. Soc. géol. Fr.*, XVIII, 1229-1230.
- BECCALUVA L., OHNENSTETTER D., OHNENSTETTER M. et VENTURELLI G. (1977). – The trace element geochemistry of Corsican ophiolites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 64, 11-31.

– en Iran, une équipe comprenant MM. BAROZ, MACAUDIERE, Mme OHNENSTETTER et M. ROCCI s'est associée à l'équipe allemande de Sarrebruck (Prof. LENSCH) pour étudier les ophiolites de Sabzhevar, au N.E. du pays. Ces travaux sont en cours.

– en Turquie, un doctorant turc, M. Ahmet CATAKLI, étudie, en commun avec deux doctorants turcs de Strasbourg, le vaste massif ophiolitique de Pozanti-Karsanti dans le Taurus.

2 - Travaux de l'équipe de Strasbourg

Mon équipe strasbourgeoise travaille essentiellement sur les ophiolites turques ; d'une part à Antalya, pour poursuivre mes travaux de thèse, d'autre part sur les principaux massifs ophiolitiques de la chaîne du Taurus. Enfin des études ont été entreprises sur les ophiolites et le magmatisme anté-orogénique des Andes, en Equateur.

- A *Antalya*, une étude microstructurale approfondie, menée sur les massifs grenus côtiers en collaboration avec l'équipe de Nantes (prof. NICOLAS) a permis de restituer l'axe de la paléo-dorsale originelle et de proposer un modèle dynamique d'accrétion pour la genèse primaire des assemblages ophiolitiques. L'essentiel de ce travail, et la description minutieuse de nombreuses figures de sédimentation magmatique dans les cumulats ont fait l'objet de la thèse de 3ème cycle de M. DUBESSY. Par ailleurs, une partie de la thèse de 3ème cycle de M. BLANCO a été consacrée à l'étude des spilites en pillow-lavas de ce massif : le passage du faciès zéolites au faciès spilitique y a été démontré, ainsi que l'existence d'andratite hydrothermale dans le faciès zéolites. Actuellement, une thèse de 3ème cycle est consacrée à l'étude générale du faciès zéolites dans les Nappes d'Antalya (M. MALLEY) et une autre est consacrée à l'étude du réseau de filons nourriciers des chambres à cumulats (Melle REUBER).

- Dans la *chaîne du Taurus*, deux doctorants turcs, MM. BINGÖL et ÇAKIR, viennent de soutenir leurs thèses de 3ème cycle sur la partie orientale du vaste massif ophiolitique de Pozanti-Karsanti. Outre la reconstitution minutieuse de l'assemblage primaire, ces chercheurs ont démontré l'existence d'écaillages intra-océaniques précoces dans l'assemblage, bien avant l'obduction finale sur la marge continentale. Les datations absolues effectuées par MM. THUIZAT et MONTIGNY (I.P.G. de Strasbourg) ont confirmé ces résultats. Enfin, l'orientation de la paléo-dorsale originelle a pu être restituée avec les mêmes méthodes qu'à Antalya : dans les deux massifs, distants de 600 km, l'orientation de la paléo-dorsale téthysienne est identique, à N 70 E.

Nos travaux ont aussi porté sur les ophiolites des Nappes Lyciennes (région de Marmaris) pour étudier les tectonites profondes et les écaillages métamorphiques infra-péridotitiques qui, là encore, témoignent de l'existence d'écaillages intra-océaniques précoces. Mon assistant M. WHITECHURCH, qui a consacré son 3ème cycle à l'étude de ces roches dans le Baër-Bassit en Syrie, reprend l'étude systématique de ces écaillages dans tous les massifs ophiolitiques de la chaîne du Taurus.

Les publications de l'équipe strasbourgeoise pour la période 1975-1978 sont les suivantes :

- JUTEAU T. (1975). - Les ophiolites des Nappes d'Antalya (Taurides occidentales, Turquie). Pétrologie d'un fragment de l'ancienne croûte océanique téthysienne. *Sciences de la Terre*, Nancy, Mém. N° 32, 692 p.
- JUTEAU T., NICOLAS A., DUBESSY J., FRUCHARD J.C. et BOUCHEZ J.L. (1976). - Le complexe ophiolitique d'Antalya (Taurides occidentales, Turquie) : un modèle structural pour une dorsale océanique. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), XVIII, n° 4, 895-896.
- JUTEAU T., NICOLAS A., DUBESSY J., FRUCHARD J.C. et BOUCHEZ J.L. (1977). - The Antalya ophiolite complex (western Taurides, Turkey) : a structural model for an oceanic ridge. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 88, 1740-1748.
- ÇAKIR U., JUTEAU T. et WHITECHURCH H. (1977b). - Nouvelles preuves de l'écaillage intra-océanique précoce des ophiolites téthysiennes : les roches métamorphiques infra-péridotitiques du massif de Pozanti-Karsanti (Turquie). *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), t. XX, n° 1, 61-70.
- JUTEAU T., MEGARD F. et RAHARISON L. (1977). - Les assemblages ophiolitiques de l'occident équatorien : nature pétrographique et position structurale. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), t. XIX, n° 5, 1127-1132.
- DUBESSY J. (1977). - Inventaire, description et analyse géométrique des structures primaires des massifs ophiolitiques côtiers des Nappes d'Antalya (Taurus occidental, Turquie). Application à un modèle dynamique de dorsale. Thèse 3e cycle, Strasbourg.
- WHITECHURCH H. (1977). - Les roches métamorphiques infra-péridotitiques du Nord-Ouest syrien (ophiolites du Baër-Bassit), témoins de l'écaillage précoce de la croûte océanique téthysienne. Etude pétrologique et structurale. Thèse 3e cycle, Nancy I.
- THUIZAT R., MONTIGNY R., ÇAKIR U. et JUTEAU T. (1978). - K-Ar investigations on two turkish ophiolites. *Short papers 4th Intern. Conf. Geochronology, Geol. Survey open file reports*. 78-701.

- BLANCO J.A. (1978). – Minéralogie de quelques spilites hercyniennes et alpines. Classification et modèle de formation de la paragenèse spilitique. Thèse 3e cycle, Strasbourg.
- BINGOL A.F. (1978). – Les ophiolites du massif de Posanti-Karsanti (chaîne du Taurus, Turquie) : étude pétrographique, géochimique et structurale de la partie orientale du massif. Thèse 3e cycle, Strasbourg.
- CAKIR U. (1978). – Les ophiolites du massif de Pozanti-Karsanti (chaîne du Taurus, Turquie) : étude pétrographique, géochimique et structurale de la partie centrale du massif. Thèse de Doctorat de Spécialité, Strasbourg.

3 – Chercheurs isolés

a) M. J.F. PARROT est chercheur à l'ORSTOM. Il a soutenu récemment une thèse d'Etat remarquée sur les ophiolites du Baër-Bassit. Depuis de nombreuses années, il travaille en collaboration étroite avec Nancy et Strasbourg. Depuis plus d'un an, il a développé avec WHITECHURCH l'idée des écaillages intra-océaniques précoces dans les assemblages ophiolitiques mésogéens. Sa spécialité, la géochimie, en fait un des meilleurs connaisseurs de la géochimie fine des ophiolites du Moyen-Orient. Il a beaucoup contribué à démontrer les profondes analogies entre Troodos-Hatay d'une part, Mamomia-Baër-Bassit de l'autre. Liste des publications (1975-1978) :

- DELAUNE-MAYERE M. et PARROT J.F. (1976). – Evolution du Mésozoïque de la marge continentale méridionale du bassin téthysien oriental d'après l'étude des séries sédimentaires de la région ophiolitique du NW syrien. *Cah. ORSTOM*, sér. Géol., t. VIII, n° 2, 173-184.
- PARROT J.F. et RICOU L.E. (1976). – Evolution des assemblages ophiolitiques au cours de l'expansion océanique. *Cah. ORSTOM*, sér. Géol., 6, 69-94.
- PARROT J.F. et VERDONI P.A. (1976). – Conditions de formations de deux assemblages ophiolitiques méditerranéens (Pinde et Hatay) d'après l'étude des minéraux constitutifs. *Cah. ORSTOM*, sér. Géol., 8, 69-94.
- DELAUNE-MAYERE M., MARCOUX J., PARROT J.F. et POISSON A. (1977). – Modèle d'évolution de la paléo-marge téthysienne au niveau des nappes radiolaritiques et ophiolitiques du Taurus lycien, d'Antalya et du Baër-Bassit. *Intern. Symp. struct. Hist. Méditer. Basins*, Split (Yugoslavia), Technip Edit., Paris, 79-94.
- PARROT J.F. (1977a). – Ophiolites du NW syrien et évolution de la croûte océanique téthysienne au cours du Mésozoïque. *Tectonophysics*, vol. 41, 251-269.
- PARROT J.F. (1977b). – Assemblages ophiolitiques du Baër-Bassit et termes effusifs du Volcano-sédimentaire. Pétrologie d'un fragment de la croûte océanique téthysienne charriée sur la plate-forme syrienne. *Travaux et Doc. ORSTOM*, t. 72, 333 p.
- PARROT J.F. et WHITECHURCH H. (1978). – Subductions antérieures au charriage Nord-Sud de la croûte téthysienne : facteur de métamorphisme de séries sédimentaires et volcaniques liées aux assemblages ophiolitiques syro-turcs, et schistes verts et amphibolites. *Rev. Géogr. phys. Géol. dyn.*, (2) vol. XX, Fasc. 2, 153-170.
- WHITECHURCH H. et PARROT J.F. (1978). – Ecailles métamorphiques infra-péridotitiques dans le Pinde septentrional (Grèce) : croûte océanique, métamorphisme et subduction. *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 286, sér. D, 1491-1494.
- DUGAS F. et PARROT J.F. (1978). – Reconstitution de la ceinture éocène du Sud-Ouest Pacifique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 287, sér. D, 671-674.

b) Mme C. MEVEL (Laboratoire de Pétrographie de Paris VI) a renouvelé les connaissances pétrologiques sur le classique massif ophiolitique du Chenaillet (Alpes franco-italiennes) dans sa thèse de 3ème cycle (1975). Dans un article récent, avec CABY et KIENAST, elle vient de démontrer l'existence d'amphibolites "océaniques" dans le Chenaillet, ce qui rejoint nos observations sur les "écaillages intra-océaniques" dans les complexes du Moyen-Orient. Elle travaille actuellement au sein d'une équipe pluridisciplinaire franco-italienne sur les ophiolites du Mont Viso. Liste des publications :

- MEVEL C. (1975). – Les pillow-lavas spilitiques des massifs ophiolitiques du Chenaillet et des Gets (Alpes françaises). Thèse de 3e cycle, Paris VI.
- MEVEL C. (1975). – Les zonations chimiques dans les pillow-lavas spilitiques du Chenaillet et des Gets (Alpes françaises). *Pétrologie*, 1, 319-333.
- MEVEL C. et VELDE D. (1976). – Clinopyroxenes in mesozoic pillow-lavas from the French Alps : influence of cooling rate on compositional trends. *Earth Planet. Sci. Letters*, 32, 158-164.
- MEVEL C. (1976). – Les zonations chimiques dans les pillow-lavas métamorphisés du vallon de Péas (Hautes-Alpes). *B.S.G.F.*, (7), T. XVIII, n° 4, 985-990.
- MEVEL C., CABY R. et KIENAST J.R. (1978). – Amphibolite facies conditions in the oceanic crust : example of amphibolitized fiaser-gabbros and amphibolites from the Chenaillet ophiolite massif (Hautes-Alpes, France). *Earth Planet. Sci. Letters*, 39, 98-108.

c) M. TERRY (laboratoire de Géologie structurale de Lille) travaille sur les ophiolites du Pinde septentrional.

d) A Grenoble, des études pétrologiques et géochimiques sur les roches volcaniques basiques de la zone du Roignais-Versoyen (Alpes franco-italiennes) ont été entreprises par J.L. Lasserre et Ch. Laverne sous la direction de Mme VATIN-PERIGNON. Elles ont permis de mettre en évidence que :

Le volcanisme du Versoyen, d'extension limitée, s'est mis en place sous forme de sills dans une série pélitique meuble.

Au sein des sills les plus épais (10 à 80 m) a été mise en évidence l'existence d'une différenciation sous faible pression partielle d'oxygène, à partir d'un magma tholéiitique hybride (caractère océanique avec quelques tendances continentales).

Une spilitisation affecte, au cours de leur refroidissement, les dolérites cristallisées ; il s'agit d'un processus hydrothermal se traduisant par la destabilisation de l'olivine, du plagioclase et, dans une moindre mesure, du pyroxène avec un gain en Na, Li, H₂O et une perte en Ca, Sr, K, Ba, Rb. L'existence de sources hydrothermales liées à la spilitisation est établie.

L'ensemble de ces formations a subi des recristallisations métamorphiques poussées lors de la phase éoalpine (plissements isoclinaux d'axe N50°). Une paragenèse Schistes Verts à glaucophane précède une paragenèse Schistes Verts de moindre pression.

Le contrôle chimique de l'apparition de la première paragenèse est très marqué.

Le massif basique de la Pointe du Clapey, au Sud de la région étudiée, est distingué du volcanisme créacé du Versoyen, sur des critères pétrographiques géochimiques et structuraux. Afin d'expliquer la genèse de ce massif, l'hypothèse d'un volcanisme liasique dans le bassin des calcschistes du Petit St-Bernard est proposée.

Les volcanismes liasique et créacé qui ne constituent en aucune manière des complexes ophiolitiques, sont dus à la distension d'une bordure continentale fragile.

LASSERRE J.-L. et LAVERNE Ch. (1976). – Le volcanisme tholéiitique de la zone du Versoyen (Alpes franco-italiennes). Minéralogie, Pétrographie et Géochimie. Thèses de Doct. de Spécialité, Grenoble, 252 p.

e) L'équipe du Laboratoire de Tectonophysique de Nantes continue à travailler sur la rhéologie du manteau supérieur et l'écoulement plastique des péridotites. Ces travaux ne concernent pas directement le thème du volcanisme sous-marin, mais apportent cependant des données essentielles pour l'élaboration des modèles de dorsales océaniques. Par ailleurs Melle BOUDIER a travaillé sur les ophiolites d'Oman, en collaboration avec l'équipe américaine du Dr. COLEMAN. Je citerai les articles et ouvrages suivants :

NICOLAS A. (1976). – Flow in upper mantle rocks : some geophysical and geodynamic consequences. *Tectonophysics*, 32, 93-106.

NICOLAS A. et POIRIER J.P. (1976). – Crystalline plasticity and flow in metamorphic rocks. *J. Wiley and Sons Ltd. Inter-science*. London, ed. Textbook, 444 p.

PESELNICK L. and NICOLAS A. (1978). – Seismic anisotropy in an ophiolite peridotite : application to oceanic upper mantle. *Journal of Geophysical Research*, vol. 83, n° 3, 1227-1235.

CROUTE OCEANIQUE ACTUELLE

a) Le programme IPOD

Plusieurs équipes françaises ont profité des possibilités offertes par le programme international I.P.O.D. pour participer activement à l'étude de la croûte océanique actuelle. Il est d'ailleurs remarquable de constater que, à plus de 90 %, il s'agit de chercheurs cités précédemment à propos des ophiolites. Les forages IPOD n'ont pu pénétrer au-delà de 600 m environ dans la couche basaltique. Les études pétrologiques se sont donc focalisées soit sur la minéralogie primaire des basaltes, soit au contact de l'eau de mer, en particulier sur la palagoniti-

sation des verres basaltiques. A l'occasion, des roches gabbroïques et même ultrabasiques ont été rencontrées, et ont fait l'objet d'études spécialisées. Tous ces travaux sont actuellement sous presse aux "Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project" et concernent les échantillons des Legs 45, 47 et 49 (océan atlantique, croûte jeune de moins de 15 M.A.) et 51/52/53 (océan atlantique, croûte ancienne à 110 M.A.) du "Glomar Challenger". A ma connaissance, les articles présentés par les pétrographes français sont les suivants :

- MEVEL C., OHNENSTETTER M. et OHNENSTETTER D. – Mineralogy and petrography of Leg 46 basalts. Initial Reports.
 BOUDIER F. (1977). – Microstructural study of three peridotite samples drilled at the western margin of the Mid-Atlantic ridge. IPOD, Leg 45, Initial report.
 JUTEAU T., BINGOL A.F., NOACK Y., WHITECHURCH H., HOFFERT M., WIRRMANN D. et COURTOIS C. (1977). – Preliminary results about mineralogy and geochemistry of alteration products in Leg 45 basement samples. Initial Reports D.S.D.P.

b) Programmes de plongées avec submersibles

Deux récentes missions de plongée avec submersible organisées par le CNEXO avaient pour but l'étude de la croûte océanique :

1) la mission "CYAGOR" (chef de mission : M. AUZENDE) sur le banc de Goringe au S.O. du Portugal a mis en évidence une coupe complète de la croûte océanique et du manteau supérieur sous-jacent, grâce à un soulèvement et basculement du plancher océanique au niveau de la faille des Açores. La coupe publiée présente de très grandes analogies avec les coupes classiques des complexes ophiolitiques.

2) la mission "CYAMEX" (printemps 1978) était une mission franco-américano-mexicaine, ayant pour objet de reconnaître la dorsale Est-Pacifique par 21°N (à l'entrée du Golfe de Californie), une partie de la fracture transverse Tamayo, et la première zone d'immersion du champ magnétique à - 700.000 ans (le passage Brunhes-Matuyama) à l'ouest de la dorsale. Les 12 plongées à l'axe ont permis d'explorer un segment de 10 km de long environ et de définir trois zones tectoniques : une zone d'extrusion axiale très étroite (600 m), formée de laves fraîches, non faillée et non sédimentée ; une zone extrêmement active à horst et grabens (2 km), et une zone à larges blocs basculés, ensédimentés et à morphologie atténuée. L'abondance des laves fluides (pahoehoes) par rapport aux pillow-lavas et la présence de lacs de lave fossile à la limite de la zone d'extrusion sont des caractéristiques importantes du segment de dorsale exploré. Enfin la découverte de sulfures massifs polymétalliques (pyrite, chalcopyrite, blende) formant des édifices construits et alignés parallèlement à l'axe de la dorsale est sans doute le fait le plus important de cette campagne. Les plongées sur la fracture Tamayo ont montré que celle-ci comprend une partie inactive comprise entre deux segments actifs disposés en échelons. La zone de transition Brunhes-Matuyama (à 20 km de l'axe) s'est révélée tectoniquement inactive.

Cette année, la mission était organisée par le CNEXO, (chef de mission : Jean FRANCHE-TEAU) avec le submersible "Cyana").

c) Autres travaux

– Une mission de cartographie par "seabeam" et de dragage intensif a été organisée par le CNEXO sur la fracture "VEMA" (Atlantique équatorial) en automne 1977 (chef de mission : David NEEDHAM). De nombreuses roches volcaniques et métamorphiques (amphibolites, etc. . .) ont été draguées. Là encore, plusieurs spécialistes des ophiolites ont participé à la mission et étudient actuellement les échantillons (H. WHITECHURCH, F. BOUDIER, M. OHNENSTETTER, C. MEVEL).

– Une équipe de l'"IGCP Working Group" a dragué des échantillons dans la mer des Philippines, en particulier des péridotites, qui sont étudiées à Nantes.

CONCLUSION

On ne peut que souligner, en conclusion de ce rapport, l'intérêt grandissant des spécialistes des ophiolites pour les échantillons de croûte océanique actuelle et leur participation de plus en plus active aux campagnes océanographiques. Il est clair pour tous que les informations provenant de ces deux grands domaines d'exploration sont fondamentalement *complémentaires* et doivent s'éclairer les uns les autres.

VI – PALEOVOLCANISME

Claude BOYER

Université de Paris-Sud, 91400 ORSAY

L'étude du paléovolcanisme en France a pris un essor considérable dans les 5 dernières années. En 1974 il n'y avait que très peu de thèse d'Etat sur ce sujet (BOURCARUT sur le Permien de l'Estérel ; BOYER sur les volcanismes acides paléozoïques du massif Armoricaïn et JUTEAU sur celui des Vosges...) peu de publications autres que celles d'intérêt régional. Depuis, de nombreuses thèses, en grande partie paléovolcaniques, s'achèvent ou sont terminées (SAGON-AUVRAY-GUILLOT, LE GALL...) et surtout les géologues miniers (BRGM, PENAROYA, SNPA...) investissent une grande partie de leurs efforts dans cette direction, en France comme à l'étranger.

Il ressort clairement que les grands chefs d'orchestre de ce qui se fait actuellement dans le domaine du paléovolcanisme sont : le BRGM à la fois à cause des nombreux levés de la carte au 50.000è et de l'intérêt métallogénique sous-jacent, l'équipe de Rennes sur l'ensemble du Massif Armoricaïn (pétrographie-géochimie-datation) l'équipe d'Orléans-Limoges sur le Limousin (pétrographie-chronologie), BOUCARUT Maures (métamorphisme), BOYER, Maroc (géochimie-métallogénie), GAGNY, Est Massif Central (géologie régionale), LE GALL, Normandie (géologie régionale) SAGON, Bretagne centrale (géologie régionale) VATIN-PERIGNON, Alpes (spilitisation)....

A – TRAVAUX EN COURS SUR LE MASSIF ARMORICAÏN

1 – Proterozoïque

1.1 – Baies de Saint-Brieuc et de Douarnenez

Etude *pétrographique* des tufs de Tréguier, des coulées spilitiques de Paimpol et des laves basiques de Douarnenez, tous sous-marins.

Etude géochimique tendant à prouver qu'il s'agit d'une série *calco alcaline* correspondant à une zone subduction au Proterozoïque terminal. Datations à 650 MA (AUVRAY et MAILLET, 1977 ; VIDAL 1976).

1.2 – Baie d'Audierne

Au Proterozoïque supérieur deux épisodes volcaniques ont été mis en évidence (PEUCAT, 1974) : ultrabasites et laves basiques dont on peut prouver l'appartenance à une série *ophiolitique tholeitique*. Au-dessus métagreswackes et amphibolites qui sont rattachées à une série *calco-alcaline* (CARPENTER et PEUCAT 1978).

1.3 – Baie de Lannion

Mise en évidence d'un ensemble de volcanodétritique acide et de quartz keratophyres surmontés par des laves et des tuffites basiques. Le chimisme de ces formations est en cours d'étude (comm. orale CHANTRAINE. B.R.G.M., Nantes et 1976).

1.4 – Bretagne centrale

L'ensemble du Brioverien est actuellement entièrement repris conjointement par la SNPA et le BRGM dans le but de trouver d'éventuelles *minéralisations* liées à un *volcano sédimentaire* discret mais souvent présent. Résultats confidentiels.

1.5 – Vallée de la Loire

Sous la direction de P. CAVET, plusieurs cartes géologiques au 1/50 000^e sont éditées : ANGERS (1975) ANCENIS (1978). Plusieurs épisodes volcano sédimentaires y sont décrits :

- le *volcano détritique* de la série des Mauges pourrait être anté Paléozoïque (discordant avec de l'Ordovicien inférieur et même du Cambrien moyen) ; il est affecté par le *métamorphisme* de la zone à biotite ;
- le volcano-détritique fin du flanc sud du synclinal d'Ancenis qui serait du même âge.

2 – Cambrien

2.1 – *Le magmatisme du Trégor* (550 M.A.) s'est manifesté par des intrusions plutoniques (granites) des filons (microgranites) et des rhyolites ignimbritiques. Toutes ces roches sont leucocrates, alcalines et siliceuses.

Le spectre des *Terres-Rares* est le même dans toutes les roches magmatiques mais les isotopes du *Strontium* sont différents dans les rhyolites (0,706) et les granites (0,709). B. AUVRAY propose une origine magmatique commune pour l'ensemble avec contamination pour le granite lors d'un arrêt plus ou moins prolongé dans la croûte.

Ce magmatisme *post-orogénique* est à paralléliser avec son homologue de Jersey et de Normandie orientale.

2.2 – Le volcanisme normand

Etude pétrographique : mise en évidence de 3 types principaux : *épiciastites*, *kératophyres* et nappes d'*ignimbrites rhyolitiques*. Interprétation volcanologique, paléogéographique et structurale : *volcanisme aérien* sur les marges d'un vieux môle émergé, la Mancellia, selon une direction NNE-SSW – origine : *fusion crustale* (BOYER 1974). Les travaux de GIORDANO (1974), F. DORE, J. LE GALL (1976 et 1977), F. CHALOT PRAT (1976) ont précisé la position stratigraphique du volcanisme et la succession chronologique de plusieurs épisodes successifs. Voir les levés de cartes géologiques au 1/50.000^e de La Ferté Macé ; Alençon, Coutances. . . .

2.3 – Région de Cholet

L'étude du volcanisme rhyolitique est repris dans le cadre des levés de cartes géologiques au 1/50.000^e par LE METOUR (BRGM) qui individualise deux ensembles volcaniques, celui à la base étant étroitement interstratifié avec des sédiments. Les *déformations* sont pour la 1^{ère} fois étudiées. Des arguments nouveaux sont apportés à l'origine *comagmatique* des rhyolites, des microgranites et des gabbros.

3 – Ordovicien – Silurien

3.1 – Vendée littorale

Sous la direction de M. TERS les levés de cartes géologique au 1/50.000^e et 80.000^e permettent de préciser la géométrie des formations volcaniques et dans certains cas, leur appartenance à l'Ordovicien-Silurien au lieu du Briovérien.

3.2 – Volcanisme basique de Chantonay

Mise en évidence d'un volcanisme *sous-marin* : basaltes spilitisés à pillow lavas, hyaloclastites et tufs basiques à La Meilleraie (BOYER 1976). Antérieurement un âge Briovérien lui était attribué. Age Ordovicien-Silurien (comm. orales BRILLANCEAU, WYNNS, BRGM). Ces laves sont des *tholeites* soumises à un épimétamorphisme léger.

3.3 – Saint-Georges sur Loire

Le complexe de spilite, laves acides, tufs et microgranites d'âge ordovicien supérieur à Silurien est réétudié sous la direction de J.J. CHAUVEL. Les termes acides sont beaucoup plus développés qu'on ne le pensait et seraient des rhyolites et des kératophyres indépendantes des spilites à affinité *tholéitiques* anormalement riches en Sr.

3.4 – Erquy

L'étude des spilites à pillow lavas et kératophyres d'Erquy d'âge ordovicien inférieur, est reprise par le biais de l'analyse des *éléments en trace*. Elles montrent le cogénéisme de toutes ces laves, et une affinité avec des *tholéites de type hot spot* (volcanisme intraplaques) (MARTINEAU et al., 1975).

4 – Devono-carbonifère

4.1 – Une thèse de doctorat d'Etat (SAGON, 1976) porte sur la partie *orientale du Bassin de Chateaulin*. Le volcanisme y est étudié *cartographiquement pétrographiquement* (diabases, rhyolites, spilites, kératophyres) et chimiquement (deux magmas différents l'un basique l'autre acide) ; un âge *dinantien* est proposé pour l'ensemble volcanique.

Des études en cours faites par le BRGM, à la suite de la découverte d'indices *minéralisés* en Cu à Porte aux Moines (AYE, 1978) ont, semble-t-il, entièrement remis en question l'âge du volcanisme : il serait interstratifié dans les schistes et quartzites de Landevellec à la limite inférieure du *Dévonien* ; de plus ce volcanisme serait beaucoup plus développé que prévu.

– A l'Ouest du bassin de Chateaulin (forêt de Beffou, région de Bolazec, baie de Lannion. . .) le volcanisme est essentiellement *basique* (gabbros, dolerites, métabasaltés) et *sous-marin*. Des *minéralisations* étudiées par le BRGM y sont aussi interstratifiées [Bodennec (BRILL 1975, comm. orales CHANTRAINE)]. Dans le Bassin de Morlaix le volcanisme se réduit à des tuffs et brèches spilito-keratophyriques qui seraient au moins pro parte d'âge *Strunien* (et non plus dinantien comme on le pensait précédemment).

4.2 – Bassin de Laval

Mise en évidence d'un volcanisme rhyolitique ignimbrétique sodique d'âge Viséen [340 M.A. (BOYER 1974)]. Une étude régionale reprise par PLAINE (1976) précise la succession de 2 épisodes rhyolitiques principaux séparés par des projections en *milieu lagunaire* auxquels succèdent les venues kératophyriques. La *tectogenèse* est d'âge westphalien.

B – MASSIF CENTRAL – PYRENEES – CORSE

1 – Montagne Noire – Albigeois – Rouergue

1.1 – Travaux entrepris par l'équipe de F. ELLENBERGER sur la *zone axiale de la montagne Noire*, identification de niveaux *volcano-sédimentaire* (tufs, cendres) probablement dacitiques ou andésitiques, en milieu confiné *euxinique*. Les travaux en cours tentent de préciser l'âge de la série et le métamorphisme (diopside-staurotide pro parte).

1.2 – Versant Nord de la Montagne Noire

Ce volcanisme est connu dans différentes unités tectoniques (Mendic Cenomes, Brusque, Fayet-Merdellou) où il présente des *variations de nature et d'âge* du SE vers le N.O : son âge irait de la base du Cambrien au Cambrien moyen. Il s'agit de rhyolites, tufs keratophyriques, spilites et volcano détritique très légèrement métamorphique (C. BOYER, 1974, F. BOYER, PRIAN, ALSAC comm. orales).

1.3 – Albigeois

Le volcanisme d'âge cambro-ordovicien probable, soumis à un métamorphisme epizonal se présente, à l'Est sous forme de laves acides *rhodacitiques* dominantes qui pourraient passer

“porphyroïdes” du Rouergue, et à l’Ouest sous forme de *laves et tufs basiques* très développés. (comm. orales, CHIRON DONNEAU). Les volcanites basiques seraient des tholeïtes *medio-océaniques* émises lors d’une distension intra continentale. Les effets de la spilitisation sont en cours d’étude par F. MARINI (1978).

2. Limousin

Mise en évidence de *volcanites inconnues* jusqu’alors comme telles dans les formations métamorphiques du Bas Limousin : les microgranites de Genis sont des ignimbrites rhyolitiques, les grès de Thivier et ardoises d’Allasac des tufs feldspathiques (BOYER et GUILLOT 1973 et 1977)

— Un nouveau log est proposé à partir des travaux de cartographie entrepris par l’équipe d’Orléans (GUILLOT-AUTRAN). Le volcanisme y est étudié et situé dans la succession régionale (de bas en haut) :

groupe du Bas Limousin : leptynites en bancs dcm, à chimisme sodique interstratifiées dans des gneiss plagioclastiques. Au-dessus tufs rhyodacitiques plus ou moins remaniés. Puis tufs basaltiques et quelques laves acides et basiques. Ce volcanisme est *calco-alcalin ou tholéitique* soumis à un métamorphisme épi à mésozonal, d’âge Cambrien moyen à supérieur. Il est séparé par une discordance cartographique du *groupe de Genis* où on connaît, à la base, des métarhyolites ignimbritiques aériennes, potassiques et un ensemble basique au sommet (gabbros, dolérite, basaltes) appartenant au faciès schistes vert, et qui sont des *tholeïtes*

L’âge fin *Silurien* est donné par des conodontes et encrines (GUILLOT, thèse en rédaction — TREUIL et GUILLOT : Géochimie en cours).

— Les amphibolites du Bas Limousin sont des metabasaltes et des tufs dans la mésozone, *tholeïtiques*, dont l’étude est en cours par des chercheurs de Limoges (SANTALIER-FLOCH, 1978).

3. Pyrénées — Corse

3.1. Corse

— Volcanisme *silurien probable* dans la région de l’Argentella — Tour Margine. Il s’agit de volcanoclastites, albitophyres et grès à quartz rhyolitiques.

— Laves albitophyriques, faciès hypovolcaniques et volcanosédimentaires sodiques, anciennement *andésitiques*, d’âge Famenien — Toumaisien (comm. orale S. KRYLATOV, DURAND DELGA).

3.2. Pyrénées centrales.

— Région de Pierrefitte : rhyolites interstratifiées dans des quartzophyllades surmontées par des calcaires renfermant des basaltes spilitiques à pillows soumis au métamorphisme dans le faciès schistes verts et *minéralisés en Zn (Pb)* (BAIS et POUIT 1976, POUIT 1976) — âge *ordovicien*.

— Région de Bentaillou — Bulard. Tufs et tuffites feldspathiques dans le faciès schiste vert à amphibolites ; *minéralisation en Zn* — âge *caradoc* probable.

3.3. Pyrénées — volcanisme dévono-dinantien

Région de Caunteret-Mouthoumet-Las Cabesses, vallée d’Arrens, etc. . . Matériaux essentiellement *volcanoclastiques*, intimement mêlés à des sédiments. Tufs, rhyolites et cinerites associés à des jaspes Frasnien, kératophyres et tufs *kératophyriques*.

Au Dinantien, tufs et coulées *kératophyriques*, en partie sous-marin, associés à des jaspes à radiolaires. *Minéralisations en Zn Pb* (POUIT, ALSAC 1978, comm. orale KRYLATOV).

4. Morvan – Roannais

Travaux en cours par l'équipe de C. GAGNY sur la formation des tufs anthracifères – pas d'informations autres que très ponctuelles.

5. Alpes

5.1. *Etude cartographiques et pétrographique des spilites du Trias* par l'équipe de VATIN PERIGNON, BUFFET, LASSERRE, LAVERGNE – Levés de la carte géologique au 1/50 000° de Saint-Bonnet. Etudes géochimiques : magma *tholéitique* océanique à olivine. Cristallisation sous faible fO_2 , puis séparation par gravité de cumulats enrichis en Mg, Ni, Cr, enfin augmentation de PH_2O qui entraîne la cristallisation de hornblende. La spilittisation est interprétée comme un phénomène précoce prenant le relais des processus magmatiques, et non comme une conséquence du métamorphisme alpin (BUFFET, 1977).

5.2. *L'analyse chimique* discriminante appliquée au cortège spilite-dolérite montre que certains éléments ne sont pas affectés par la spilittisation (Si, Ti), d'autres peu (Mg, Fe, Mn, Al), d'autre beaucoup (Ca, Na, K. . .). – Les éléments en traces sont aussi étudiés : ainsi l'enrichissement en Li serait un bon indicateur d'une spilittisation intense (VATIN-PERIGNON et SHAW, 1977).

5.3. *Des études sont menées* parallèlement, sur les phénomènes de *propylittisation* en domaine non métamorphique – dans un continent en distension comme le Massif Central : hydrothermalisme lié aux circulations dans la caldeira du Cantal (VATIN-PERIGNON et MILESI, 1976 – PREVOST, 1978) – dans un domaine océanique : hydrothermalisme lié aux bombements intracaldeira du Massif du Piton des Neiges à la Réunion (VATIN-PERIGNON et CHEVALLIER, 1978) – dans l'Arc insulaire de la Mer Egée sur l'île de Milos (VATIN-PERIGNON et BUFFET, 1978).

En ce qui concerne la propylittisation dans la caldeira du Massif du Cantal, on peut dire que :

- l'altération hydrothermale affecte à des degrés variables toutes les formations volcaniques de la zone centrale du Cantal ;

- sur le plan minéralogique, on constate :

- une grande diversité des minéraux d'altération (sidérite, calcite, dolomite, pyrite, smectite dioctaédrique, kaolinite, chlorite, épidote, quartz secondaire et "séricite"),

- de nombreuses associations entre ces minéraux d'altération,

- des évolutions spatiales pour les phyllites et les carbonates et sulfures de fer.

- sur le plan chimique, que :

- les latites se caractérisent par un lessivage important de K et en moins grande proportion de Fe, Ca et Na ; par un enrichissement en Al, Mg et Si,

- les trachandésites se caractérisent par un lessivage de Ca, Fe et Mg ; par un enrichissement en Al, Si et K,

- le schéma de l'altération peut être :

- 1 – libération et léger lessivage de certains éléments tels : Ca et Fe
migration de Mg et K

- 2 – phase fluide riche en CO_2 favorisant la mise en solution de Si et Al et piégeant sur place une partie de Ca et Fe

- 3 – phase fluide enrichie en S^{2-} détruisant localement le complexe avec CO_2 .

- sur le comportement des éléments en trace, on constate que :

- les latites sont enrichies en tous les éléments (Mo, Zn, Ba, Co, F) alors que le cuivre ne semble enrichi que localement

. les trachyandésites sont légèrement appauvris en tous les éléments en trace à l'exception du baryum

. pour certains éléments en trace, les enrichissements les plus nets dans toutes les laves se produisent à proximité du massif gabbroïque ou dans les zones *très* altérées.

L'hydrothermalisation qui est caractérisée, appartient à celle du domaine propylitique bien que de nombreux minéraux suggèrent un début d'altération argilique. L'altération semble donc être intermédiaire entre ces deux domaines.

6. Maures – Corse

6.1. Maures

Equipe BOUCARUT, SEYLER, CREVOLA. Il s'agit d'un socle métamorphisme dans lequel les recherches en cours permettent d'identifier du volcanisme – Métamorphisme *moyenne Pression* augmentant d'Ouest en Est – Paléogéographie *continentale* avec hauts fonds et bassins. Age ordovicien ou silurien possible – La succession est de bas en haut : filons de dolérites – ortholeptynites – amphibolites et leptynites. Un premier épisode correspond à des métarhyolites alcalines potassiques – un deuxième à un volcanisme *basaltique alcalin* associé à un *volcanisme tholeitique transitionnel* – Une troisième phase à des intrusions de dolérites et de rhyolites potassiques (SEVLER M. BOUCARUT (1978).

6.2. Corse

Etudes récentes sur le volcanisme permien d'Asco Cinto par ORSINI VELLUTINI. Sans informations précises.

7. Hors-France

7.1. Sud de l'Espagne.

Province pyriteuse sud Ibérique. Etude pétrographique et métallogénique entreprise par P. ROUTHIER et son équipe, avec C. BOYER pour la pétrographie, Résultats : Bull. BRGM 1978 et thèse M. LECOLLE (1977). Du point de vue volcanologique mise en évidence de basalte-andésite-dacite-rhyolite-grande extension des *ignimbrites*. Arguments pour une *paléogéographie aérienne*, en bordure d'un continent limité par une mer peu profonde – Géochimie montre l'appartenance à un *magmatisme calco-alcalin*.

D'autres travaux sont menés par BERNARD et SOLER sur les mêmes problèmes. Les résultats sont contradictoires mais ne sont pas en notre possession.

7.2. Volcanisme précambrien supérieur de l'Anti-Atlas marocain.

L'équipe de C. BOYER (M. LEBLANC, F. BOYER, CHABANE, BOUKARI, GYSSELS, PAILLE) étudie ce volcanisme et ses relations avec les *minéralisations en cuivre* associées.

Mise en évidence d'*appareils volcaniques* variés : protusions, appareils hypovolcaniques circulaires, dômes, systèmes filoniens (BOYER, 1977). Etudes pétrographiques en cours (analyses à la microsonde des cpx et amphiboles. Etudes du métamorphisme . . .). La géochimie des termes basiques montre qu'il s'agit d'une *série calco-alcaline* (BOYER et al. 1978).

CONCLUSIONS

Les travaux abondants en cours sur l'ensemble du Paléovolcanisme peuvent se regrouper en 3 thèmes principaux :

1 – Des études régionales, précisant la cartographie des ensembles volcaniques, leur position stratigraphique, leur âge, leur pétrographie (ex : Normandie-Vendée-)

2 – Des études géochimiques fines essayant de retrouver la nature du magma originel

et ses caractères dans l'optique tectonique globale (ex : Erquy-Audierne-vallée de la Loire-Albigeois, Alpes . . .) ou essayant de faire la part du rôle de la "spilitisation".

3 - Des études à but métallogéniques, cherchant des métallotectes et une typologie des concentrations minérales dans le volcanisme (Bassin de Chateaulin, Pyrénées, Espagne, Maroc. . .)

BIBLIOGRAPHIE

- AUVRAY B. (1975). - *Pétrologie* I, 2, p. 125-138.
- AUVRAY B., MAILLET P. (1977). - *BSGF*, 7, XIX, n° 5, p. 953-957.
- BOIS J.P., POUIT G. (1976). - *Bull. BRGM*, 2, 6, p. 543-568.
- BOYER C. (1974). - Thèse doctorat, Paris, 480 p.
- BOYER C. (1976). - *CRAS*, 282, p. 973-975.
- BOYER C., LEBLANC M. (1977). - *CRAS*, 287, p. 427-430.
- BOYER C., GUILLOT P.L. (1973). - *Bull. BRGM*, 1, 4, p. 215-255.
- BRILL H. (1975). - Thèse 3^e cycle, Paris VI.
- CARPENTER M.S., PIVETTE B., PEUCAT J.J. (1976). - *CRAS*, 282, N° 3, p. 259-261.
- CHALOT PRAT F. (1976). - Thèse 3^e cycle, Caen, 104 p.
- GIORDANO R. (1974). - Thèse 3^e cycle Caen, 74 p.
- GUILLOT P.L., BOYER C., TEGUYERM. (1977). - *Bull. BRGM*, 1, 3, p. 184-207.
- LECOLLE M. (1977). - Thèse doctorat d'Etat
- LE GALL J. et al (1975). - *BSGF* (7), XVII, p. 1101-1109.
- MAILLET P. (1977). - Thèse 3^e cycle Rennes, 134 p.
- PEUCAT J.J. (1974). - *CRAS*, 278, p. 1809-1812.
- PLAINE J. (1977). - Thèse 3^e cycle Rennes
- POUIT G (1976). *Mem. hors Serv. Soc. geol. Fr.*, 7, p. 115-126.
- PREVOST M.-Ch. (1978). - Thèse 3^e cycle, Paris, 252 p.
- ROUTHIER P. et al. (1978). - *Mém. BRGM* n° 94
- SAGON J.P. (1976). - Thèse doct. Etat, Paris VI, 671 p.ñ
- SANTALIER D., FLOCH J.P. (1978). - *Bull. BRGM*, 1, 2, p. 125-144
- VATIN PERIGNON N. (1977). - *Géoch. cosmochim. acta*, 41, p. 1601-1607.
- VIDAL Ph. (1976). - Thèse Etat, Rennes, 142 p.

VII — PALEOMAGNETISME

Alexandre ROCHE

Institut de Physique du Globe, 67000 STRASBOURG

Malgré l'existence de travaux de qualité sur les roches sédimentaires et les roches métamorphiques, les roches volcaniques sont l'objet de la grande majorité des recherches paléomagnétiques. Quelle que soit leur origine, elles ont en commun un caractère d'une importance capitale : l'existence d'une aimantation thermorémanente, témoin fidèle du champ magnétique régnant à l'instant du refroidissement au-dessous du point de Curie des minéraux aux roches volcaniques continentales ; il faut d'ailleurs adjoindre les roches à caractère basalitique de l'écorce océanique.

Au cours des quatre années 1975 à 1978, les travaux des chercheurs français ont été nombreux dans des domaines variés :

1 — MECANISME D'AIMANTATION DES ROCHES

Au Laboratoire de Géomagnétisme du Parc Saint-Maur B. SMITH a étudié les modalités d'acquisition de l'ATR ; L. DALY a poursuivi ses recherches sur l'anisotropie magnétique ; M. PREVOT sur les laves du Velay, C. PLESSARD et M. PREVOT sur les basaltes océaniques prélevés lors des campagnes de sondages profonds, ont apporté de nouveaux et importants résultats sur la viscosité magnétique des roches volcaniques (viscosité étudiée d'ailleurs par D. BIQUAND sur les roches sédimentaires).

A l'I.P.G. de Paris, J.P. POZZI a poursuivi ses recherches en Piézo-magnétisme et les a appliquées à l'étude des mécanismes éruptifs intervenus lors de la récente période d'activité du volcan de la Soufrière.

Au Laboratoire de Paléomagnétisme de Strasbourg, J.P. LAUER a effectué des études sur l'aimantation de vibration acquise par les roches volcaniques lors des opérations de sciage et de forage des échantillons. J.P. LAUER, J.B. EDEL, S. GANÇARSKI ont effectué une étude étendue des propriétés magnétiques des roches du socle dans les Vosges du Nord ; certaines de ces roches correspondent à des intrusions basiques : diorites, dolérites.

2 — APPLICATION DU PALEOMAGNETISME A LA CONNAISSANCE DE LA CHRONOLOGIE DES APPAREILS VOLCANIQUES ET DE LEUR ARCHITECTURE

Nous pouvons citer tout d'abord le très important travail effectué par M. PREVOT sur les édifices volcaniques du Velay (Devès, Mézenc). Une stratigraphie paléomagnétique des formations a été proposée, tenant compte des cycles d'activité et des observations de l'aimantation de très nombreux échantillons.

Les laves et tufs du Cantal et du Mont Dore ont fait l'objet d'études à Strasbourg respectivement par L.A. TAMAYO et M. DELUZARCHE.

B. HENRY (Paris) a étudié l'aimantation de roches appartenant au Dôme de Barrot, de laves splittiques dans la zone à l'Ouest du Pelvoux, de roches volcaniques de la vallée du Guil.

J.P. LAUER (Strasbourg) a effectué d'abord des études sur les ophiolites de Chypre, puis a entrepris une vaste campagne de recherches sur les nappes ophiolitiques de Turquie, cherchant à préciser les déplacements des nappes et le lieu d'origine des ophiolites.

B. SICHLER (Brest, Laboratoire du C.O.B.) et N. BONHOMMET (Laboratoire de Géophysique interne de Rennes) ont effectué des campagnes en Territoire Afar. Les études en cours sur les séries d'échantillons récoltés visent à mieux connaître les phénomènes intervenus dans ces régions quant à la mise en place et à l'évolution des laves.

On doit signaler également une étude importante de N. BONHOMMET, en collaboration avec M.J. AITKEN et J. HUXTABLE sur la datation par thermoluminescence de sédiments cuits par des coulées de lave de la chaîne des Puys, coulées étudiées par ailleurs en Paléomagnétisme.

3 - APPLICATION DU PALEOMAGNETISME AUX DETERMINATIONS DE DERIVES CONTINENTALES

A Strasbourg, les recherches commencées antérieurement ont été amplifiées au cours des 4 dernières années. Elles concernent essentiellement le Domaine méditerranéen (au sens large du terme). Elles ont été appuyées par des datations fournies par la Section de Radiochronologie du Laboratoire (R. MONTIGNY, R. THUIZAT).

Au Maroc les travaux effectués par M. WESTPHAL et collaborateurs sur de très nombreuses formations dont les âges s'échelonnent du Trias au Quaternaire ont permis de formuler diverses conclusions sur les mouvements de l'Afrique relativement au continent nord-américain et sur une éventuelle rotation du Maroc par rapport à l'Afrique.

Dans la péninsule ibérique des travaux ont été effectués sur le grand filon doléritique de l'Alentejo et aussi sur des formations du Permo-Trias des Pyrénées dans le but de préciser le mouvement de rotation relative de la péninsule par rapport à l'Europe stable.

L'étude des formations volcaniques de Corse et de Sardaigne a été poursuivie (J.B. EDEL, H. BELLON, J. ORSINI, P. VELLUTINI, M. WESTPHAL). Une forte rotation relative de la Sardaigne au Miocène a été mise en évidence.

De même, différentes recherches ont concerné les Alpes Occidentales aussi bien au Laboratoire de Strasbourg qu'à celui du Parc Saint-Maur. Les résultats ont permis de lancer diverses hypothèses sur les déplacements des blocs en Méditerranée Occidentale (M. WESTPHAL, J.J. SCHOTT).

En Turquie les recherches de J.P. LAUER se sont étendues aux formations volcaniques liées au socle de manière à préciser les dérives de l'Ecorce.

En Iran on doit noter les recherches effectuées sur des formations volcanique de la zone nord et de la zone centrale par M. PREVOT, M. BINA, A. MOTAMID, J. BUCUR (Laboratoire de Saint-Maur). Elles montrent l'existence d'une importante évolution post-éocène de l'Iran central.

De même, les recherches de M. WESTPHAL (Laboratoire de Strasbourg) et J. CONRAD (Université de Rouen), dans le ZAGROS et le LOUAT, mettent en évidence de larges rotations au Tertiaire.

A la suite des campagnes qu'il avait exécutées antérieurement en Mauritanie et dans l'Anti Atlas marocain, B. SICHLER (C.O.B., Brest) a utilisé les résultats obtenus sur les filons de dolérites pour des déterminations de paléolatitudes et paléorientations du bloc africain.

N. BONHOMMET (Université de Rennes) a entrepris en collaboration avec R. Van der Voo des études sur des formations paléozoïques du Massif Armoricaïn (Bretagne du Nord, Péninsule de Crozon) dans le but d'établir des comparaisons avec le bloc ibérique et l'Afrique.

N. BONHOMMET a par ailleurs effectué, en collaboration avec R. BROUSSE et A. PANTALONI, une étude sur les basaltes pliocènes des Gambier.

4 - ETUDES CONCERNANT LES FONDS OCEANIQUES

Des recherches très importantes relatives aux basaltes de l'Ecorce Océanique ont été effectuées au Laboratoire du Parc Saint-Maur où l'on a étudié en particulier des échantillons en provenance de la dorsale médio-atlantique : opérations F.A.M.O.U.S., I.P.O.D., D.S.D.P. (M. PREVOT, A. LECAILLE, B. SMITH, D.J. DUNLOP).

L'inclinaison magnétique moyenne correspond bien à celle du champ dipôle dans la zone F.A.M.O.U.S. Les caractéristiques magnétiques moyennes des basaltes jeunes diffèrent nettement de celles de la croûte plus ancienne.

BIBLIOGRAPHIE

- BELLON H., COULON C., EDEL J.B. (1977). - Le déplacement de la Sardaigne - synthèse des données géochronologiques, magmatiques et paléomagnétiques. *Bull. Soc. Géol. Fr.* 19 (4), p. 825-831.
- BERTRAND H. et WESTPHAL M. (1977). - Comparaisons géologiques et paléomagnétiques des tholéïtes du Maroc et de la côte orientale de l'Amérique du Nord ; Implications pour l'ouverture de l'Atlantique. *Bull. Soc. Géol. Fr.* 19 (3), p. 513-520.
- BOSSERT A. (1976). - Paléomagnétisme au Maroc : Les résultats du Mézoïque et leurs implications - hypothèses nouvelles. *Thèse de Docteur-Ingénieur*, I.P.G. Strasbourg, 212 p.
- BOSSERT A., BARDON C., HAMZEH R. et WESTPHAL M. (1977). - Paléomagnétisme des formations volcaniques du crétacé inférieur dans l'Atlas de Beni Meïlal. *Notes et Mém. Serv. Carte Géol. Maroc.*, 39, n° 272 : 7-26.
- CONRAD J. et WESTPHAL M. (1975). - Paleomagnetic results from the Carboniferous and Jurassic of the Saharan platform. in Campbell K.s.W. (Editeur), *Third Gondwana Symposium*, Canberra, pp. 9-13.
- DALY L. et POZZI J.P. (1976). - Résultats paléomagnétiques du Permien inférieur et du Trias marocain ; comparaison avec les données africaines et sud-américaines. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 29, 71-80.
- DALY L. et POZZI J.P. (1977). - Détermination d'un nouveau pôle paléomagnétique africain sur des formations cambriennes du Maroc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 34, 264-272.
- DALY L., LEBLANC M. et POZZI J.P. (1977). - Mise en évidence de plusieurs phases d'aimantation et d'un nouveau pôle paléomagnétique cambrien dans les formations de Bou Azzer El Graara (Anti-Atlas, Maroc). *C.R. Acad. Sci.* 284 D, 271-274.
- EDEL J.B. et LÖRTSCHER A. (1977). - Paléomagnétisme du volcanisme tertiaire de Sardaigne. Nouveaux résultats et synthèse. *Bull. Soc. Géol. Fr.* 19 (4), p. 815-824.
- HENRY B. (1975). - Sur l'aimantation des roches permienes de la vallée du Guil (Hautes-Alpes). *C.R. Somm. Soc. Géol. de France*.
- HENRY B. (1977). - Sur les propriétés magnétiques des laves spilitiques peu déformées de la bordure ouest du Pelvoux. *C.R. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève*.
- HUXTABLE J., AITKEN M.J., BONHOMMET N. (1978). - Thermoluminescence dating of sediments baked by lava flows of the Chaîne des Puys. *Nature*, Vol. 275, p. 207-209.
- JONQUET H., GIROD M. et WESTPHAL M. (1975). - Le mode de mise en place des brèches basanitiques de la région du Puy-en-Velay ; éléments de réponse par le paléomagnétisme. *C.R. Acad. Sc.*, 280, Série D, pp. 2309-2312.
- KIEFFER G. et TANGUY J.C. (1976). - Présence de tholéïtes prophyriques à la base de l'Etna Primordial : leur importance magmatologique, volcanologique et morphostructurale. *C.R. Ac. Sci.*, 283 D, 1703-1706.
- LAUER J.P. (1975). - Contribution à l'étude de l'influence du métamorphisme thermique sur les propriétés magnétiques des roches. Exemples pris dans les Vosges cristallines du Nord. *Thèse de Docteur-Ingénieur*, I.P.G. Strasbourg, 220 p.
- LAUER J.P. (1978). - Création d'aimantations rémanentes de sciage et de forage au cours de la préparation d'échantillons de roches destinés à une étude paléomagnétique. *C.R. Acad. Sc.*, 287 : 1-4.

- MICHARD A., WESTPHAL M., BOSSERT A. et HAMZEH R. (1975). — Tectonique de blocs dans le socle atlaso-mésétien du Maroc ; une nouvelle interprétation des données géologiques et paléomagnétiques. *Earth and Planet. Sc. Lett.*, 24, pp. 363-368.
- MOREL P. (1978). — Etude paléomagnétique d'une intrusion dioritique panafricaine dans l'Adrar des Iforas (Mali). Présentation de reconstitutions paléo-continentales pour le Paléozoïque inférieur et le Protérozoïque. *Thèse de 3ème cycle*, option tectonophysique, Montpellier.
- POZZI J.P. (1975). — Magnetic properties of oceanic basalts. Effects of pression and consequences for the interpretation of anomalies. *E.P.S.L.* 26, 337-344.
- POZZI J.P. (1975). — Effects of stresses on magnetic properties of volcanic rocks. *Phys. Earth Planet. Int.*, 14, 77-85.
- POZZI J.P. (1978). — Magnetic observations made on Soufrière volcano during 1976-1977 crisis. *J. of volcan. and Geothermal Res.* 78.
- PREVOT M. (1975). — Magnétisme et minéralogie magnétique de roches néogènes et quaternaires. Contribution au paléomagnétisme et à la géologie du Velay. *Thèse Doc. d'Etat, Univ. P. et M. Curie*, Paris.
- PREVOT M. et GROMME S. (1975). — Intensity of magnetization of subaerial and submarine basalts and its possible change with time. *Geophysical Journal Roy. Astr. Soc.*, 40, 207-224.
- PREVOT M. (1976). — Large intensities changes of the non-dipole field during a polarity transition. *Phys. Earth Planet. Int.*, 13, 342-345.
- PREVOT M., LECAILLE A., FRANCHETEAU J., HEKINIAN R. (1976). — Magnetic inclination of basaltic lavas from the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 259, 649-653.
- PREVOT M., BINA M. et MOTAMED A. (1977). — Paleomagnetic evidence for a large post eocene rotation of Central Elbrouz (Iran). *Geology*.
- SMITH B. et PREVOT M. (1977). — Variations of the magnetic properties in a basaltic dyke with concentric cooling zones. *Phys. Earth. Planet. Int.*, 14, 120-136.
- TANGUY J.C. (1975). — Intensity of the geomagnetic fields from recent italian lavas using a new paleointensity method. *E.P.S.L.*, 27, 314-320.
- TANGUY J.C. et KIEFFER G. (1977). — The 1974 eruption of Mount Etna. *Bull. Volcanol.* 40, 4, 239-252.
- TAMAYO BALLON L. (1975). — Etude paléomagnétique de formations volcaniques miocènes et pliocènes du Cantal (France). *Thèse de Doctorat d'Université*, Strasbourg.
- WESTPHAL M. (1976). — Contribution du Paléomagnétisme à l'étude des déplacements continentaux autour de la Méditerranée Occidentale. *Thèse de Doctorat d'Etat*, I.P.G. Strasbourg, 304 p.
- WESTPHAL M., ORSINI J., VELLUTINI P. (1976). — Le microcontinent corso-sarde, sa position initiale : données paléomagnétiques et raccords géologiques. *Tectonophysics*, 30, pp. 141-257.
- WESTPHAL M. (1977). — Paleomagnétisme des formations permianes de Corse. Comparaisons avec la Sardaigne et l'Estérel. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 18 : 1209-1215.
- WESTPHAL M., EDEL J.B. et SCHOTT J.J. (1978). — Essai de synthèse des données paléomagnétiques et de la tectonique des plaques en Méditerranée Occidentale. *C.R. Somm. Soc. Géol. France*, 20 (1), p. 12-15.

VIII – GEOTHERMIE

Jacques VARET

Département Géothermie, B.R.G.M., 45100 ORLEANS

Plusieurs programmes de recherche, nationaux ou européens, ont supporté les recherches dans le domaine de la Géothermie. Par ailleurs, un certain nombre d'organismes – universités, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, mènent des recherches dans ce domaine sur fonds propres.

Le programme d'Action Thématique Programmée de l'Institut National d'Astronomie et de Géophysique (C.N.R.S.) a porté au cours de la période essentiellement sur la collecte de données nouvelles sur le flux de chaleur en France. Plusieurs dizaines de mesures nouvelles ont été réalisées, dans plusieurs cas au moyen de forages spécialement réalisés à cet effet.

Le programme de la D.G.R.S.T. (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique) visait à supporter des recherches dans le domaine de la gestion et de l'exploitation de doublets hydrothermiques. Des modèles de calcul ont ainsi été développés permettant d'optimiser la gestion d'aquifères géothermiques, et l'utilisation combinée de ces aquifères en production et en stockage de chaleur.

Les programmes géothermiques de la Communauté Européenne visent, d'une part, le développement de programmes de recherche et de synthèse de données et d'autre part, d'opérations de démonstration.

Les données de température mesurées dans les forages existants, de nouvelles données hydrogéochimiques, la mise au point de nouvelles méthodes de prospection géophysique, ont ainsi été financées par la C.E.E. Les travaux de synthèse sur les aquifères profonds des grands bassins sédimentaires français (Bassin Parisien, Bassin Aquitain, Alsace) ont été poursuivis. Une opération de démonstration a été financée à Strasbourg.

La Délégation aux Energies Nouvelles a supporté un programme de mise au point de microcentrale à fluide binaire fonctionnant sur source géothermale, en cours d'installation à Chaudes Aigues (Cantal).

Le Ministère de l'Industrie intervient pour sa part dans les opérations géothermiques de chauffage par une méthode incitative de couverture du risque géologique (financement du coût du forage en cas d'échec).

Dans le domaine de la sismologie, M. HIRN de l'Institut de Physique du Globe, a développé des méthodes de détection de chambre magmatique par réflexion d'ondes sismiques sur le manteau. De telles méthodes ont été utilisées aux Açores et dans le Massif Central Français.

En géophysique, diverses méthodes de prospection ont été mise au point :

- au C.N.R.S. Garchy (M. MONIER, M. DUPIS) ;
- au B.R.G.M. (M. HORN, M. MUNCK, M. GERARD) ;
- et à l'Université de Montpellier (M. VASSEUR).

dans le domaine de la magnétotellurique, du bruit sismique, de la gravimétrie, de l'électrique et de l'aéromagnétisme. Elles ont été testées sur divers sites géothermiques, en Alsace (Electrique, magnétotellurique) dans le Massif Central et aux Antilles.

Les principales sources thermales françaises ont été analysées, et diverses méthodes géochimiques ont été mises au point et utilisées par plusieurs laboratoires :

- M. MICHARD à l'Université de PARIS VII,
- M. TARDY à l'Université de Strasbourg,
- MM. LELEU et LOPOUKHINE au B.R.G.M.,

en particulier dans le Massif Central Français, les Antilles et les Pyrénées.

En géologie, outre les travaux de synthèse sur les aquifères géothermiques sédimentaires menés au B.R.G.M., des travaux ont été menés sur les principaux ensembles volcaniques du Massif Central Français, des Antilles et de la Réunion. L'effort a porté sur la géochronologie (M. BAUBRON, B.R.G.M. Orléans), (M. CANTAGREL, Université de Clermont Ferrand), et (M. BELLON, Université de Paris Sud), l'étude structurale, pétrologie et géochimique.

Les efforts ont particulièrement portés sur les ensembles suivants :

- Le Massif du Mont Dore par le B.R.G.M. (M. VARET) en association avec plusieurs partenaires, où une vaste coldera a été mise en évidence, tandis que l'âge très jeune (N 200.000 ans) des manifestations terminales était confirmé.
- Le Sud-Est du Massif Central, où un vaste programme d'analyse géochimique et de géologie structurale a été entrepris par le B.R.G.M.
- Le Volcan du Lac Pavin, cratère d'explosion d'âge très récent étudié par M. VINCENT.
- Les Antilles (Guadeloupe et Martinique) où les programmes du B.R.G.M. et de l'EU-RAFREP se poursuivent.
- La Réunion, où un vaste programme de prospection géothermique a été entrepris par le B.R.G.M.

BIBLIOGRAPHIE

Rapports B.R.G.M. 1976 - 1977 - 1978

1976

- BAUDOIN C., MAGET Ph. ET CLOT A. - Etude de faisabilité des forages géothermiques à Fontainebleau.
- BAUDOIN C., MAGET Ph. ET HERAULT J.P. - Utilisation de la géothermie dans les villes nouvelles de Marne-la-Vallée, Evry, Melun-Sénart.
- CLOT A. et MAGET Ph. - Chauffage géothermique de la ZAC des Courtilleraies à Mée-sur-Seine (Seine-et-Marne).
- FABRIS H. et LOPOUKHINE M. - Essais et mesures destinés à l'évaluation du potentiel des puits géothermiques.
- FABRIS H. - Asal 1 : campagne T.F.A.I. - rapport provisoire de fin de sondage ; rapport provisoire de test.
- GABLE R., HOUSSE M., MAGET Ph., ROJAS J.R. - Potentiel géothermique du Bassin Parisien.
- GABLE R., BAUDOIN C. et RICOUR J. - Etude des possibilités géothermiques des Grès du Trias inférieur dans le département de la Meuse.
- GRINGARTEN A.C. et AUZET J.P. - Interprétation de pompages d'essai dans un massif calcaire fissuré. Etude de la nappe karstique du Lez (Hérault) - Note n° 1 : Pompages d'essai réalisés au cours de la période juin-décembre 1974.
- GRINGARTEN A.C., FABRIS H., ROCHE J. et VANDENBEUSCH M. - Interprétation des pompages d'essai effectués sur le forage géothermique GBL-A (Blagnac 31).
- LOPOUKHINE M. - Etude géochimique du projet géothermique de CERRO PANDO (province de Chiriqui - Panama).
- MAGET Ph. - Ressources géothermiques en France 1975-1976.
- ROJAS J.R., GABLE R., FABRIS H. - Potentiel géothermique du Bassin Parisien.
- STIELTJES L. - Reconnaissance géothermique préliminaire en République Démocratique et Populaire du Yémen. Expansion de la géothermie en Amérique du Nord (Canada - U.S.A.). Bilan des secteurs publics et privés, développement des méthodes de prospection.

1977

- BAUDOIN C. - Calcul de la température en tête de puits - influence de l'isolation des casings.

- BAUDOIN C. — Etude des dossiers techniques des forages profonds de la région Melun, Fontainebleau, Provins.
- BAUDOIN C., LANDEL H. et DEREK F. — Mise au point du récapitulatif technique de fin de sondage avec sortie automatique sur ordinateur.
- BAUDOIN Ch. — Transmission de chaleur dans un forage
- BAUDOIN Ch. — Calcul de la température en tete d'un forage géothermique. Influence de l'isolation des tubages au puits de production.
- BAUDOIN C., CLOT A., LOPOUKHINE M. — Mesures de température et de corrosion dans les puits géothermiques de Melun.
- GABLE R. — Ebauche d'une carte du flux géothermique de la France.
- GABLER. — Etude de la vitesse de propagation du son et de la conductibilité thermique sur des échantillons de roches — corrélations.
- MAGET Ph. — Evaluation du potentiel géothermique du Bassin Aquitain (en cours).
- MAGET Ph., BAUDOIN Ch., CLOT A. — Possibilités d'utilisation de la géothermie dans l'habitat existant de l'Est Parisien.
- GRINGARTEN A., SAUTY J.P., LANDEL P.A. — Rapport Utilisation du programme plotdata.
- STIELTJES L. — Evaluation du potentiel géothermique du massif central.
- STIELTJES L., et BAUBRON J.C. — Age du volcanisme lié à l'ouverture du rift océanique d'Asal (T.F.A.I.). Méthode K/Ar.
- VARET J. — Etude du potentiel et développement des ressources géothermiques de l'île de la Réunion.
- 1978
- CLOT A., GRINGARTEN A.C. — Calcul de la distance entre les puits de production et de réinjection d'un doublet géothermique, des pressions et des puissances de pompage nécessaires aux puits de production et d'injection à l'aide de la calculatrice programmable TEXAS INSTRUMENTS TI 59.
- CLOT A., LEJEUNE J.M. et MAGET Ph. — Possibilités d'utilisation de la Géothermie pour la ZAC de Cergy-Puiseux à Cergy-Pontoise.
- CLOT A., BAUDOIN Ch., ROJAS J. — Etude de faisabilité de forages géothermiques à Coulommiers
- FABRIS H. — Forage LE MEE 1 ; Forage LE MEE 2.
- FABRIS H. — Etude des possibilités de stockage d'eau chaude en aquifère
Description des expériences de stockage thermique réalisées en 1977 sur le site de Bonnaud (Jura).
- FABRIS H. — Etude expérimentale sur le site de Bonnaud (1 et 2).
- FABRIS H. — Résultats des essais de production réalisés sur un doublet Géothermique expérimental implanté sur la concession pétrolière de Coulommiers — Vaucourtois.
- GABLE R. — Utilisation et traitement des mesures de température d'origine pétrolière pour la détermination du gradient de ses variations.
- GABLE R., L. BERTRAND. — Mise au point d'une sonde de précision pour la mesure des températures dans les forages.
- GABLE R. — Acquisition et rassemblement de données géothermiques nouvelles en France.
- GRINCARTEN A.C. — Well testing analysis in flashing geothermal wells.
- GRINGARTEN A.C., LANDEL P.A., MENJOZ A. et SAUTY J.P. — Simulation des transferts thermiques dans le sous-sol.
Description et mode d'emploi du programme STENDHAL.
- GRINGARTEN A.C. — Durée de vie et chaleur récupérables dans les aquifères géothermiques utilisés pour le chauffage urbain. Well testing in two-phase geothermal wells.
- GRINGARTEN A.C., LANDEL P.A., MENJOZ A. et SAUTY J.P. — Simulation par différences finies des échanges thermiques dans le sous-sol (couche aquifère et éponte). Description et mode d'emploi du programme ESTHER (Etude d'un stockage thermique en Ecoulement Radial).
- LANDEL P.A. — Simulation des transferts thermiques dans le sous-sol.
Description et mode d'emploi du programme CONVOL.
- LEPRETRE, ROJAS J. — Mémorisation et études statistiques de rapports techniques de fin de sondage du Bassin de Paris.
Exemple d'application.
- LOPOUKHINE M. — Etude des problèmes de production et de corrosion posés par l'exploitation géothermique de Melun.
- LOPOUKHINE M. — Etude d'implantation d'une micro-centrale géothermique pilote en France.
- LOPOUKHINE M. (avec la collaboration de M. SOFFRETES). — Etude d'implantation en France d'une microcentrale électrique chaudes aiguës.
- LOPOUKHINE M., STIELTJES L. — Evaluation du potentiel géothermique de l'île de la Réunion.
- MAGET Ph. — Potentiel géothermique du Bassin Aquitain.
- MAGET Ph., BAUDOIN C. — Possibilités d'utilisation de la géothermie dans l'habitat existant de l'Est Parisien (2^e partie).
- SAUTY J.P. — Rapport de synthèse de l'étude expérimentale d'un doublet hydrothermique.
- VARET Jacques. — Conférence publique. Nancy : La Géothermie ; Les Energies Nouvelles.

VARET Jacques. – Aspects légaux de l'exploitation de l'énergie en France.

VARET J. – High energy geothermal energy : scientific background and exploration technics. (Conférence en Chine). La géothermie à l'étranger.

VARET Jacques. – Compte rendu de mission A.C.T.I.M. Géothermie en Chine.

VARET J., CLOT A. – Interventions du BRGM en géothermie – coordination avec les Services Géologiques Régionaux – objectifs.

Publications dans des revues :

BARBERI F. et VARET J. – La chaîne volcanique de l'Erta Ale. Carte et légende. Ed. C.N.R.S., 1976.

BARBERI F., VARET J. (1977). – The Afar Rift Junction. Rift symposium, OSLO.

CLOT A. (1977). – La géothermie basse énergie ou l'utilisation des eaux chaudes souterraines en France. La Recherche.

CLOT A. – La géothermie et les serres. Publication 77 dans *B.T.I.*

CLOT A. & VARET J. – La Géothermie Où, Quand, Comment ? Publication Avril 77 dans *Techniques de l'Energie*

DEMANGE J. et FAURE (1976). – Etude géologique et structurale des atolls de la partie sud des Tuamotu. Rapport C.E.A.

DEMANGE J. (1976). – Géologie de la partie nord de l'île de Vaté (étude géothermique). International congress of geothermal energy and mineral water. Athens. Carte à 1.50.000^e.

GRINGARTEN A.C., LANDEL P.A. et PEAUDECERF P. (1976). – Pollution thermique des nappes par réinjection d'eau des circuits de climatisation. *Société Hydrotechnique de France*, XIV^{èmes} Journées de l'Hydraulique, Paris. Question IV, rapport 3.

STIELTJES L., JORON J.L., TREUIL M. et VARET J. (1976). – Le rift d'Asal, segment de dorsale émergée : discussion pétrologique et géochimique. *Bull. Soc. Géol. de France*, n° spécial.

STIELTJES L. et GRINGARTEN A.C. (1976). – Study of a geothermal field in the Asal active volcanic rift zone (T.F.A.I. – Afar Depression – East Africa).

STIELTJES L., HARRISON C.G.A. et BONATTI E. (1976). – Faulting within the median valley. *Tectonophysics*.

STIELTJES L. (1977). – Carte géologique du rift d'Asal (T.F.A.I., Afar Central). 1/50 000e.

VARET J. et BARBERI F. (1976). – Volcanism of Afar : small plate tectonics implication. *Bull. Géol. Soc. Amer.*

VARET J. (1976). – Carte géologique de l'Afar central et méridional. Ed. C.N.R.S.

VARET J., LEPINE J.C., RICHARD O., RUEGG J.C. et TREUIL M. (1976). – Mise en évidence d'une zone de faille transformante reliant la vallée axiale de la dorsale de Tadjoura à celle du Ghoulet – Asal (T.F.A.I.). *C.R. Acad. Sc. D*, 283, 9-12.

VARET J. (1976). – Création de nouvelles croûtes en domaine subaérien : exemple de l'Afar. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, n° 4.

VARET J. et BARBERI F. (1976). – Tracé des frontières de plaques en Afar : discussion à partir des données volcaniques.

VARET J. et METRICH N. (1977). – Ash layers intercalated in the Sediments of Holes 407 and 408 Leg 49 IPOD. D.S.D.P. initial report.

VARET J. & DEMANGE J. (1978). – Leg 49 Initial report Part II, Autoclastic submarine breccias in hole 410, Leg 49, and other DSDP Sites. D.S.D.P. initial report.

VARET J., CHOURROUNE P. (1978). – Study of the tectonic deformation in sediments intercalated in the basalts in hole 412A – IPOD LEG 49. D.S.D.P. initial report.

WOOD D.A., VARET J. et al. (1978). – The petrology geochemistry and mineralogy of north atlantic basalts : a discussion based on Ipod Leg 49. D.S.D.P. initial report.

OUVRAGE COLLECTIF (1978). – La géothermie en France.

SECTION IV

GÉOMAGNÉTISME ET AÉRONOMIE

TABLE DES MATIERES

I – Champs magnétiques internes	
L. DALY (LG) aidé de J.C. ROSSIGNOL et V. COURTILLOT	174
1. Induction électromagnétique et conductivité électrique de la Terre	174
2. Levés et cartes magnétiques. Anomalies magnétiques	175
3. Archéomagnétisme et paléomagnétisme	176
4. Magnétisme des roches	178
II – Phénomènes aéronomiques	
G. THUILLIER (Service d'Aéronomie)	185
1. Structures et processus dynamiques de la thermosphère	185
2. Structures et processus dynamiques de la mésosphère	189
3. Structure et dynamique de la stratosphère	191
4. L'exosphère	193
5. Aéronomie des planètes et des comètes	194
III – Phénomènes magnétosphériques	
C. BEGHIN (C.R.P.E.)	199
1. Moyens et méthodes spécifiques à l'étude de l'ionosphère-magnétosphère	199
2. Description et modélisation du milieu.	202
3. Etude des phénomènes dynamiques globaux.	203
4. Processus macroscopiques et phénomènes particuliers	206
IV – Observations, Instruments et Indices	
J. C. GLAUME (I.A.P.)	215
1. Observations magnétiques	215
2. Observations ionosphériques	216
3. Observations des émissions lumineuses	217
4. Observations des ondes radioélectriques naturelles	218
5. Campagnes diverses	218
6. Instruments	219
7. Indices d'activité magnétique	221

Ce rapport a été préparé par L. DALY, G. THUILLIER, C. BEGHIN et J. CHRISTOPHE GLAUME pour chacune des quatre parties avec la collaboration de J.C. ROSSIGNOL et V. COURTILLOT pour la partie n° 1.

Les sigles utilisés sont répertoriés ci-dessous.

ATP	Action Thématique Programmée
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
CEA	Commissariat à l'Energie Atomique
CESR	Centre d'Etudes Spatiales du Rayonnement
CFP	Compagnie Française des Pétroles
CGG	Compagnie Générale de Géophysique
CNES	Centre National d'Etudes Spatiales
CNET	Centre National d'Etudes des Télécommunications
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
COB	Centre Océanologique de Bretagne
CRG	Centre de Recherches Géophysiques
ENS	Ecole Normale Supérieure
GRI	Groupe de Recherches Ionosphériques
IAP	Institut d'Astrophysique
INAG	Institut National d'Astronomie et de Géophysique
IPGP	Institut de Physique du Globe de Paris
LPE	Laboratoire de Physique de l'Exosphère
LPHA	Laboratoire de Physique de la Haute Atmosphère
MIR	Mesures Ionosphériques et Radioélectriques
ONERA	Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques
ORSTOM	Office de la Recherche Scientifique et Technique d'Outre-Mer
RSR	Recherches Spatiales Radioélectriques
TAAF	Administration des Terres Australes et Antarctiques Françaises

I – CHAMPS MAGNETIQUES INTERNES –

L.L. DALY (L.G.)

aidé de J.C. ROSSIGNOL et V. COURTILLOT

1 – INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE ET CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DE LA TERRE.

Outre les approches aujourd'hui classiques de la magnétotellurique et des sondages géomagnétiques, deux domaines particuliers de l'électromagnétisme se sont développés : la modélisation numérique et l'extension vers les basses fréquences des études magnétiques. Enfin il faut signaler l'utilisation des connaissances en électromagnétisme pour la mise en évidence de phénomènes piézomagnétiques liés à l'activité volcanique.

1.1 – Magnétotellurique.

En magnétotellurique large bande, des études ont été réalisées en Argentine (J. FEBRER, J. DEMICHEL, E. GARCIA et H. FOURNIER, 1977), en France (H. FOURNIER, Y. BENDERITTER et J. FEBRER, 1975), en Espagne (H. FOURNIER et J. FEBRER, 1977), un problème méthodologique a été traité par H. FOURNIER et J. FEBRER (1976), et une mise à jour des travaux récents concernant la base de la croûte et le manteau supérieur effectuée par H. FOURNIER (1978).

Mais le domaine le plus étudié a été incontestablement celui des applications à l'étude de structures plus ou moins superficielles. J.L. CARNEZ (1976), A. DUPIS et J.L. CARNEZ (1976) et A. DUPIS (1977) se sont intéressés aux problèmes posés en Génie, Civil. A. DUPIS (1978), A. ECHAARI (1975) B. GUINEAU (1975), C. HERISSON (1975) et J. SHANOUN (1977) ont traité des problèmes relatifs à des structures enfouies sous des recouvrements sédimentaires de faible profondeur. A. DUPIS et J.B. GIBERT (1976) ont fourni une application hydrogéologique.

Enfin diverses techniques électriques ou électromagnétiques ont été testées par V.N. PHAM, D. BOYER, M. CHOUTEAU (1976, 1978), V.N. PHAM et D. BOYER (1978) en vue d'applications tectoniques ou minières. Les profondeurs d'investigation ont atteint 2000 m.

1.2 – Sondages géomagnétiques.

L'étude de l'anomalie des variations géomagnétiques des Pyrénées s'est poursuivie. Grâce à la mise en évidence d'une séparation naturelle des variables de temps et d'espace (K. BABOUR, J. MOSNIER, M. DAIGNIERES, G. VASSEUR, J.L. LE MOUËL et J.C. ROSSIGNOL, 1976), une cartographie fine de cette anomalie de conductivité a pu être dressée par K. BABOUR, M. DAIGNIERES, M. MENVIELLE, J. MOSNIER, G. VASSEUR et J.C. ROSSIGNOL (1977). L'étude de la fonction temporelle apporte des informations sur la structure profonde du lieu où sont induits les courants (probablement les océans) (G. VASSEUR, K. BABOUR, M. MENVIELLE et J.C. ROSSIGNOL, 1977).

D'autres régions ont été étudiées. Au Maroc (Laboratoire d'études des structures profondes LA 195 et Direction des Mines et Géologie du Maroc, 1977, M. MENVIELLE, 1976) une anomalie, certainement d'origine profonde, qui peut être reliée à des structures tectoniques, a été mise en évidence. Dans le Fossé Rhénan (M. FABRIOL, 1977) il existe une ano-

malie d'origine superficielle. Enfin, une anomalie existe probablement dans les Antilles françaises (J. ACHACHE, 1977).

1.3. Etude des variations longues périodes.

L'étude des données des observatoires mondiaux a permis de mettre en évidence une variation aisément corrélable avec le cycle undécennal de l'activité du soleil (V. COURTILLOT et J.L. LE MOUEL, 1976). Une accélération soudaine et importante de la variation du champ a été mise en évidence dans l'hémisphère Nord. Une corrélation avec certains caractères de la vitesse de rotation a été envisagée (V. COURTILLOT, J. DUCRUIX et J.L. LE MOUEL, 1978). Ces résultats indiquent tous que le manteau inférieur possède une conductivité relativement basse (V. COURTILLOT et J.L. LE MOUEL, 1978).

1.4. Modélisation.

Une interprétation des données obtenues sous l'électrojet équatorial conformément à l'hypothèse de P.N. MAYAUD a été proposée par J. DUCRUIX, V. COURTILLOT et J. LE MOUEL (1977). Le modèle utilisé rend compte rigoureusement des observations pour des cas simples de répartition de la conductivité à l'intérieur de la terre. L'étude a été faite simultanément dans le cas plan et le cas sphérique.

Un autre type de modélisation a été développé par G. VASSEUR et P. WEIDELT (1977). Il s'agit d'un modèle de lame mince à conductivité non homogène qui rend compte de nombreuses caractéristiques des anomalies de conductivité. L'anomalie des Pyrénées, bien décrite expérimentalement, a été choisie. On relève bien avec un contraste de conductivité important entre les océans et les continents, qu'il doit exister une direction préférentielle à environ 40°E qui correspond à celle observée. Ce type de modèle a été également appliqué avec succès au cas des anomalies du Maroc et du Fossé Rhénan.

2. LEVES ET CARTES MAGNETIQUES. ANOMALIES MAGNETIQUES.

En vue de suivre l'évolution de la variation séculaire sur le territoire français métropolitain, la détermination complète (D, F, H) du vecteur champ a été effectuée en 1977 dans les trente stations de répétition, par l'équipe de géomagnétisme interne de l'I.P.G de Paris (V. COURTILLOT, J.L. LE MOUEL et B. LEPRETRE, 1978). Les résultats de l'étude des variations de longue période du champ magnétique sont résumés dans le paragraphe précédent (induction électromagnétique).

L'I.N.A.G a poursuivi la réalisation du programme de levés aéromagnétiques entrepris par le C.N.R.S. A la suite des levés déjà nombreux décrits dans le précédent rapport, ont été réalisés le levé des Antilles Françaises en 1975 (E. LE BORGNE et J.L. LE MOUEL, 1976) et le levé de la République de Djibouti en 1977 (V. COURTILLOT et J.L. LE MOUEL, 1978). Ces levés ont été exécutés par la Compagnie Générale de Géophysique (C.G.G.) avec le concours de la division technique de l'I.N.A.G, sous la direction scientifique de l'I.P.G de Paris. Les cartes de l'intensité et les cartes d'anomalies sont calculées, cartographiées et diffusées par l'IPG de Paris. Des interprétations de ces levés ont été faites par J.L. LE MOUEL, J.P. POZZI, M. FEUILLARD et J.C. ROSSIGNOL, 1978 et V. COURTILLOT, 1978. Une attention particulière a été portée aux implications géologiques et géodynamiques. Un nouveau modèle d'ouverture a pu ainsi être proposé pour le golfe d'Aden. L'apport du levé du golfe de Valence à la connaissance tectonique de cette région a été exposé par A. GALDEANO et J.C. ROSSIGNOL (1977). Ces mêmes auteurs ont donné un assemblage à altitude constante des cartes d'anomalies magnétiques couvrant l'ensemble du bassin occidental de la Méditerranée (A. GALDEANO et J.C. ROSSIGNOL, 1977). Ce document est probablement par son étendue, son homogénéité et sa précision, unique au monde.

L'équipe de géomagnétisme interne de l'I.P.G de Paris a, parallèlement, poursuivi le développement des méthodes de traitement des anomalies appartenant à la classe des méthodes inverses et en a donné une généralisation utile pour de nombreux problèmes de la théorie du potentiel (J.L. LE MOUËL, V. COURTILOTT et J. DUCRUIX, 1975 ; V. COURTILOTT, J. DUCRUIX et J.L. LE MOUËL, 1978).

L'équipe de géophysique marine de l'I.P.G de Paris a réalisé, depuis la rédaction du dernier rapport, sept campagnes océanographiques dans l'Océan Indien, représentant plus de 100 000 km de profils magnétiques. Ces profils ont permis d'une part de préciser l'histoire structurale de plusieurs bassins de l'Océan Indien (R. SCHLICH, 1975 ; R. SCHLICH, 1978 ; J. GOSLIN et R. SCHLICH, 1978 ; J. SEGOUFIN, 1978 ; J.G. SCLATER, R.L. FISHER, P. PATRIAT, C. TAPSCOTT et B. PARSONS, 1978), d'autre part d'affiner nos connaissances de l'échelle chronologique des inversions du champ magnétique terrestre (R. SCHLICH, C. MULLER et J. SIGAL, 1978). Dans le bassin de Somalie, par exemple, les grandes directions structurales ont été définies et dans le bassin de Mozambique les anomalies M 0 à M 22 ont été cartographiées. Une nouvelle échelle chronologique des inversions a été proposée pour le Crétacé supérieur et pour le Paléogène. L'étude détaillée de la zone Açores-Gibraltar et de la cinématique d'ouverture de l'Atlantique Nord a été faite par J. BONNIN (1978). Des études ont été également consacrées aux anomalies magnétiques reconstruites au Nord Ouest du Massif Armoricain. Ces anomalies suggèrent l'existence possible d'une suture (J.P. LEFORT et J. SEGOUFIN, 1978), dans le golfe d'Aden et dans le bassin de Somalie (J. TISSEAU, 1978).

L'I.N.A.G a également complété le levé du Massif Central dans sa partie Sud en 1975 (à la suite des levés de 1964 et 1972). Ce levé a été dirigé par le département géophysique du B.R.G.M. Des interprétations ont été proposées par ce département et par l'équipe de géomagnétisme de l'I.P.G de Clermont. Les cartes sont diffusées par le Service Géologique National. N. DEBEGLIA et A. GERARD (1975) et N. DEBEGLIA, A. GERARD et C. WEBER (1977) ont discuté des informations que les anomalies magnétiques permettent d'obtenir, en particulier en ce qui concerne la géologie du socle dans le Nord du Massif Central. Des interprétations des cartes magnétiques au 1/250 000 de Marseille, Nice et Gap ont aussi été publiées par le B.R.G.M (G. DUBREUIL, 1974 ; N. DEBEGLIA, 1977). L'étude de méthodes permettant le traitement quantitatif automatique des anomalies locales a été poursuivie par A. GERARD et N. DEBEGLIA (1975).

L'équipe de géomagnétisme de Clermont-Ferrand a continué l'exploitation des levés aéromagnétiques I.N.A.G couvrant le Massif Central (levés de 1964, 1972, 1975), en effectuant également des études de détail par sondages électriques et levés magnétiques au sol. Elle a développé une méthodologie géophysique pour la reconnaissance des appareils géologiques de type maar, fosse volcano-tectonique et hypostructure volcanique (A. GACHON et J.F. LENAT, 1975 ; BREUGNOT, 1976 ; P. BOIVIN, A. GOURGAUD et J.F. LENAT, 1976 ; P.M. VINCENT, M. AUBERT, J.M. CANTAGREL et J.F. LENAT, 1977 ; M. AUBERT, 1978 ; M. AUBERT et J.F. LENAT, 1978 ; J.F. LENAT et A. GAUCHON, 1978 ; J. ROUX et G. SENAUD, 1978).

Enfin, les chercheurs de l'I.P.G de Strasbourg ont poursuivi l'interprétation des anomalies des Vosges et de la plaine d'Alsace. M. GOUPILLOT (1977) a réalisé une prospection magnétique dans le Nord du Fossé Rhénan ; J.B. EDEL (1978) a obtenu de nouvelles informations sur la structure du socle Varisque ; A. ROCHE, J.B. EDEL, S. GANKARSKI, J.P. LAUER, J. MÈUNIER et J. OTTLE (1977) ont mis au point une méthode de prospection magnétique des zones chaudes qu'ils ont utilisée pour étudier le sous-sol du Fossé Rhénan.

3 - ARCHEOMAGNETISME ET PALEOMAGNETISME

3.1 - Archéomagnétisme

Différents aspects de l'archéomagnétisme ont été développés conjointement par l'Université de Rennes, l'IPG de Paris, l'U.R.A 19 du Centre de Recherches Archéologiques et

le Laboratoire de Géomagnétisme du Parc Saint-Maur. Le travail de E. THELLIER concernant l'établissement de la courbe des variations du champ magnétique terrestre d'Europe occidentale a été poursuivi par I. BUCUR. Un problème de reconstitution de technologie ancienne a pu être abordé par I. BUCUR, J.P. POZZI, M. LE GOFF (1975). L'établissement de corrélations stratigraphiques sur le site iranien de Suse datant du 5ème millénaire a été engagé par A. HESSE et A. LECAILLE (1977). Les variations de l'intensité du champ terrestre au 14ème siècle ont été retracées grâce aux roches de l'Etna par J.C. TANGUY (1975). L'intervention dans ces travaux de disciplines d'appui est à noter ; prospection magnétique des sites (F. DE NAYER), datation par thermoluminescence (L. LANGOUET).

3.2 - Paléomagnétisme

Les différents aspects et applications de l'étude du champ plus ancien, variation séculaire, inversions, caractère dipolaire ou non dipolaire, variation du champ moyen "géologique", ont fait l'objet de nombreux travaux.

L'âge de l'épisode inverse du Laschamp le plus jeune connu, découvert par N. BONHOMMET dans la Chaîne des Puys, a été réévalué par thermoluminescence (J. HUXTABLE M.J. AITKEN, N. BONHOMMET, 1978) et par A_{39} - A_{40} (P. GILLOT, J. LABEYRIE, C. LAJ, G. VALLADAS, G. POUPEAU, G. DELIBRIAS, 1978) à 30-40 000 ans. Une analyse mathématique concernant la fréquence des inversions a été tentée par C. LAJ, D. NORDEMANN et Y. POMEAU (1978). Le problème de la prédominance du caractère dipolaire ou non dipolaire dans le passé, a été abordé par M. PREVOT (1976), L. TAMAYO (1975) et A. ROCHE, M. DELUZARCHE, M. WESTPHAL (1978).

D. BIQUAND (1976, 1978) s'est attaché à l'analyse fine de la variation séculaire et des inversions fossilisées dans les sédiments quaternaires. La position de différentes séquences de formations de Haute Normandie et de la Vallée de la Somme, a pu être précisée par rapport à la limite Bruhnes-Matuyama. De façon similaire, F. SEMAH (1978) et F. SEMAH, D. BIQUAND (1978) ont pu mener à bien différentes applications stratigraphiques dans des sédiments pléistocènes de la Vallée de l'Hérault et villafranchiens du Massif Central.

Les applications paléomagnétiques à l'étude des déformations continentales relativement récentes (Cénozoïques) et des déplacements, soit durant le Mésozoïque des continents actuels, soit durant le Paléozoïque et même le Précambrien des anciens blocs continentaux formant actuellement les cratons, se sont développées principalement dans le cadre des A.T.P. "Plaque Arabique" et "Géodynamique". Les résultats préliminaires de M. WESTPHAL et ceux de M. PREVOT, M. BINA, A. MOTAMMED (1978), montrent que la "plaque perse" a subi d'intenses déformations tectoniques depuis l'Eocène.

Depuis le Mésozoïque, d'importants déplacements des blocs continentaux ont été mis en évidence dans le domaine de la Méditerranée occidentale : rotation du Maroc par A. BOSERT (1976), A. MICHARD, M. WESTPHAL, A. BOSSERT, R. HAMZEH (1975) et M. WESTPHAL (1976), rotation de la Sardaigne par J.B. EDEL, A. LORTSCHER (1977) et H. BELLON, C. COULON, J.B. EDEL (1977), rotation de la Corse par M. WESTPHAL (1976, 1977) et M. WESTPHAL, J. ORSINI, P. VELLUTINI (1976). M. WESTPHAL, J.B. EDEL, J.J. SCHOTT (1978) ont pu ainsi proposer un schéma d'ensemble pour les mouvements de l'Espagne, des Alpes, de la Corse et de la Sardaigne.

L'histoire du continent de Gondwana a pu être précisée par L. DALY, J.P. POZZI (1977) grâce aux nouvelles données obtenues au Maroc par L. DALY, J.P. POZZI (1976), puis à Madagascar par G. RAZAFINDRAZAKA (1975) et M.W. Mc ELHINNY, B.J. EMBLETON, L. DALY, J.P. POZZI (1976). L'hypothèse de Smith et Hallam selon laquelle l'île se serait trouvée au Permien au Nord de sa position actuelle le long des côtes de la Tanzanie et du Kenya a été vérifiée. De même, l'histoire du continent de Pangea au Permien a été examinée par M. WESTPHAL (1978).

Pour des époques plus reculées, de nouvelles données ont été accumulées. En Afrique, avec l'appui des géologues et géochronologues du C.G.G de Montpellier, L. DALY, J.P. POZZI (1977) ont déterminé un nouveau pôle paléomagnétique cambrien sur des roches du Maroc, complétant ainsi la courbe de migration polaire africaine jusqu'au Paléozoïque le plus ancien, et P. MOREL (1978) a obtenu le pôle le plus ancien, commun au cratons congolais et ouest africain. En France, avec l'appui du Centre Armoricaïn d'Etude Structurale des Socles, N. BONHOMMET a amorcé l'étude d'échantillons allant du Carbonifère au Cambrien.

Toutes ces applications à la reconstitution de l'histoire de notre planète mettent bien en évidence une collaboration de plus en plus marquée avec les géologues et les radiochronologues (H. BERTRAND, M. WESTPHAL 1977, L. DALY, M. LEBLANC, J.P. POZZI 1977, N. BONHOMMET, M.H. BEESON, G.B. DALRYMPLE 1977, M. CONDOMINES, J.C. TANGUY 1976).

4 - MAGNETISME DES ROCHES

4.1 - Aspects fondamentaux

La réussite des applications paléomagnétiques proprement dites, ou des autres applications géologiques et géophysiques, est subordonnée à la bonne connaissance du comportement magnétique des porteurs de la (ou des) rémanence : minéralogie magnétique, taille des grains, type et degré d'oxydation. Dans cette optique, M. PREVOT (1975) a particulièrement étudié les titanomagnétites responsables de l'aimantation des roches volcaniques, en mettant en œuvre une nouvelle méthode d'identification de ces minéraux. De même B. SMITH, M. PREVOT (1977) ont étudié l'influence de la taille des grains sur les propriétés magnétiques des minéraux. Enfin, des travaux ont été effectués sur un autre minéral important en magnétisme des roches : l'hématite. M. BINA, M. PREVOT (1976) ont fourni un moyen simple de détermination de la taille et du champ coercitif des grains. I. BUCUR (1978) a recherché l'origine et les propriétés du moment de défaut.

L'intervention d'aimantations secondaires acquises particulièrement sous l'effet de températures et de pressions, pose un autre problème en magnétisme des roches. On a donc cherché à les éliminer et à les analyser. J.P. LAUER (1978) s'est intéressé aux aimantations acquises lors du sciage et du carottage. J.P. POZZI (1977) a analysé les effets dus à l'action des pressions. L. DALY (1978) s'est intéressé au problème de l'analyse des différentes aimantations. Une attention particulière a été portée à l'aimantation rémanente visqueuse (A.R.V) qui peut être extrêmement résistante vis-à-vis des champs alternatifs. D. BIQUAND (1977) et M. OULIAC (1976) ont abordé ce problème sur des roches sédimentaires, M. PREVOT (1975) sur des roches volcaniques et D. BIQUAND (1978) a montré quels étaient les remèdes à apporter dans les applications. Parallèlement C. PLESSARD a analysé un grand nombre de propriétés, notamment en fonction de la température, de ces A.R.V (C. PLESSARD, M. PREVOT 1976).

4.2 - Applications aux sciences de la terre

L'interprétation des anomalies magnétiques océaniques ainsi d'ailleurs qu'une meilleure compréhension des phénomènes d'accrétion, nécessitent l'étude des matériaux formant la croûte océanique. Le Laboratoire de Géomagnétisme du Parc Saint-Maur a participé aux programmes internationaux d'étude de cette croûte : F.A.M.O.U.S en collaboration avec le Centre Océanologique de Bretagne, D.S.D.P et I.P.O.D (leg 51). M. PREVOT, S. GROMME (1975) ont montré l'importance des phénomènes d'oxydation basse température. M. PREVOT, A. LECAILLE, J. FRANCHETEAU (1976) ont prouvé que les basaltes sous-marins fossilisent assez bien le champ terrestre. L'importance des variations pétrologiques a été mise en évidence par M. PREVOT et A. LECAILLE (1976). U. BLEIL, B. SMITH (1978) et B.

SMITH, U. BLEIL (1978) ayant analysé plus de 300 échantillons du leg 51 ont pu montrer, d'une part en bonne correspondance entre les anomalies observées en surface et la polarité des échantillons malgré des effets tectoniques locaux dans les roches les plus superficielles, d'autre part une ressemblance entre le comportement magnétique des pillow-lavas anciens et des roches jeunes. J.P. POZZI (1975) a examiné l'influence possible des effets de pression sur les anomalies de surface.

Plusieurs exemples d'appui du magnétisme des roches à l'interprétation des anomalies continentales ont été fournis. Les uns ont analysé les effets du métamorphisme (J.P. LAUER 1975, J.B. EDEL et D. LOSSY 1975). Les autres ont fait intervenir diverses propriétés magnétiques, susceptibilité, point de Curie, viscosité (S. GANCARSKI, 1977).

L'anisotropie de susceptibilité magnétique a été abondamment utilisée par les géologues pour déterminer le mode de mise en place tant des roches magmatiques et plutoniques que sédimentaires, et les déformations tectoniques subies. H. ARGENTON, C. BOBIER, J. POLVECHE (1975) l'ont utilisée pour la recherche des paléocourants sédimentaires. P. MOREL (1976) en a tenté une utilisation sur des granites corses et D. SYLVAIN (1976) sur des roches algériennes. B. HENRY dans un travail exhaustif sur les roches alpines a, d'une part pu mettre en évidence les effets d'efforts tardi-alpins (1975), d'autre part démontrer que les contraintes tectoniques ont souvent une influence sur l'aimantation rémanente (1975, 1976), enfin souligné l'intérêt des mesures d'anisotropie pour le paléomagnétisme (1977).

Des exemples intéressants de corrélations stratigraphiques utilisant la susceptibilité magnétique comme marqueur, ont été fournis par J.A. POUTIERS (1975, 1978).

La recherche des réponses piézomagnétiques fournies par les roches a été poursuivie par J.P. POZZI (1978) et le raccord avec les effets enregistrés en surface abordé sur le volcan de la Soufrière (1978).

BIBLIOGRAPHIE

- ACHACHE J. (1977) - Les défauts de réduction dans le levé aéromagnétique de la Martinique : existence d'une anomalie de conductivité du Sud de l'île. *Ann. Géophys.*, 33, 217-224.
- BABOUR K. (1977) - The use of the vertical component in Geomagnetic depth sounding. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 51, 265-269.
- BABOUR K. et MOSNIER J. (1977) - Differential magnetic sounding. *Geophysics*, 42 (1), 66-76.
- BABOUR K., MOSNIER J., DAIGNIERES M., VASSEUR G., LE MOUËL J.L. et ROSSIGNOL J.C. (1976) - A geomagnetic anomaly in the Northern Pyrénées. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.*, 45, 583-600.
- BABOUR K., DAIGNIERES M., MENVIELLE M., MOSNIER J., VASSEUR G. et ROSSIGNOL J.C. (1977) - L'anomalie de conductivité des Pyrénées. *Bull. Soc. Géol. France*, XIX, 3, 553-562.
- BABOUR K., MENVIELLE M., ROSSIGNOL J.C. et VASSEUR G. (1977) - Some features of geomagnetic anomaly in the Northern Pyrénées. *Acta Geodaetica Geophysica et Montanistica. Acad. Sc. Hung.*, 12, 81-85.
- CARNEZ J.L. (1976) - La prospection magnétotellurique adaptée aux problèmes de Génie Civil. Thèse 3^e cycle, Lille.
- COURTILLOT V., DUCRUIX J. et LE MOUËL J.L. - Sur une accélération récente de la variation séculaire du champ magnétique terrestre. *C.R. Acad. Sc. Paris*, (sous presse).
- COURTILLOT V. et LE MOUËL J.L. (1976) - On the long period variations of the Earth's magnetic field : from 2 months to 20 years. *J. Geophys. Res.* 81, 2941-2950.
- COURTILLOT V. et LE MOUËL J.L. (1976) - Time variations of the earth's magnetic field with a period longer than two months. *Phys. Earth. Planet. Sci.* 12, 237-240.
- COURTILLOT V. et LE MOUËL J.L. - Comments on "Deep mantle conductivity". *J. Geophys. Res.* (sous presse).
- DUPIS A. (1976) - Localisation des cavités par la méthode magnétotellurique artificielle. *Bull. de liaison Laboratoires Ponts et Chaussées*. 92, 66-67.
- DUPIS A. et CARNEZ J.L. (1976) - Application d'une méthode magnétotellurique à la reconnaissance des sites. *Bull. liaison Laboratoires Ponts et Chaussées*. 84, 61-70.
- DUPIS A. (1978) - Electrical investigation in the "chaîne des Puy" (France). *Phys. Earth. Planet. Int.*, 17, 3, 249-264.

- DUCRUIX J., COURTILLOT V. et LE MOUËL J.L. (1977) – On the induction effects associated with the equatorial electrojet. *J. Geophys. Res.*, 82, 335-351.
- DUPIS A. et GIBERT J.B. (1977) – Apport de la magnétotellurique de faible profondeur aux études hydrogéologiques : Exemple de Chaudes-Aygues. *C.R.Ac. Sci.*, t. 285, série D, 139-142.
- ECHAARI A. (1975) – Interprétation magnétotellurique des données géophysiques enregistrées dans la région du Lac de Garde. Thèse 3^e cycle Paris VI,
- FABRIOL M. (1977) – Sondages magnétiques différentiels rapides. Application à l'étude des anomalies du fossé Rhénan. Thèse de 3^e cycle, Paris.
- FEBRER J., DEMICHELI J., GARCIA E., FOURNIER H. (1977) – Magnetotelluric sounding in Pilar, Cordoba, Argentine. *Acta Geodaetica Geophys. et Montanist. Acad. Sci. Hung.*, Tomus 12, 1-3, 29-31.
- FOURNIER H. – Recent work in magnetotelluric soundings of the lower crust and upper mantle. *Journal Geom. Geoelectricity* (sous presse).
- FOURNIER H., BENDERITTER Y., FEBRER J. (1975) – Sondage magnétotellurique sur le massif granitique de Mortagne sur Sèvre. *C.R.Acad. Sci. Paris*, 280, série B, 141-143.
- FOURNIER H., FEBRER J. (1976) – Gaussian character of the distribution of magnetotelluric results working in log-space. *Physics of the Earth and Planetary Int.* 12, 359-364.
- FOURNIER H., FEBRER J. (1977) – Sondaje magnetotellurico profundo en el Observatorio Geomagnetico de Toledo (España). 2a Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Com. Minist. Planif. del Desarol. Com. Nacion. de Geod. y Geofis. Madrid.
- GUINEAU B. (1975) – Exemples d'application de la méthode magnétotellurique de prospection géophysique à l'étude de structures ou de formations géologiques situées sous très faible recouvrement. *Geophys. prospecting XXIII*, 104-124.
- HERISSON C. (1975) – Méthode magnétotellurique dans la reconnaissance des socles cristallins sous recouvrement sédimentaire : quatre exemples dans le Massif Central. Thèse 3^e cycle, Orléans.
- KLEIN M., LOUVET P., MORAT P. (1975) – Measurement of electromagnetic effects generated by swell. *Phys. Earth Planet. Int.* 10, 49-54.
- Laboratoire d'Etude Géophysique des Structures Profondes et Direction des Mines et de la Géologie du Maroc (1977) – Premiers résultats d'une campagne d'enregistrement des variations géomagnétiques dans le Nord du Maroc. *Ann. Geophys.*, 33, 225-236.
- MENVIELLE M. (1977) – Induction électromagnétique et anomalie de conductivité. Thèse 3^e cycle. Paris.
- PHAM VAN NGOC et BOYER D. (1978) – Propriétés électriques de l'écorce et du manteau supérieur sous une chaîne volcanique quaternaire de la Cordillère canadienne, en relation avec l'expansion de la dorsale NE du Pacifique. *C.R.Ac. Sci. Paris*, 287, série D. 199-202.
- PHAM VAN NGOC, BOYER D., CHOUTEAU M. (1976) – Nouvelle technique de cartographie des résistivités du sol par profilage tellurique-tellurique associé à la magnétotellurique. *C.R.Ac. Sci. Paris*, 282, série B, 71-74.
- PHAM VAN NGOC, BOYER D., CHOUTEAU M. (1978) – Cartographie des "pseudo-résistivités apparentes" par profilage tellurique-tellurique associé à la magnétotellurique. Exemple d'application sur des structures uranifères dans la région de Cluff Lake (Saskatchewan, Canada). *Geophys. Prosp.* 26, n° 1, 218-246.
- POZZI J.P., LE MOUËL J.L., ROSSIGNOL J.C., ZLOTNICKI J. – Magnetic observations made on La Soufrière volcano (Guadeloupe) during the 1976-1977 crisis. *J. of Volc. and Geotherm. Res.* (sous presse).
- SHANOUN J. (1977) – Propagation d'une onde E.M. dans un sol contenant une anomalie sphérique conductrice. Application à la prospection géophysique. Thèse 3^e cycle. Paris.
- THERA A.L. (1977) – Interprétation des mesures magnétotelluriques à partir d'un modèle à deux dimensions. Thèse 3^e cycle, Paris.
- VASSEUR G., BABOUR K., MENVIELLE M., ROSSIGNOL J.C. (1977) – The geomagnetic anomaly in the Northern Pyrenees : a study of the temporal variation. *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 49, 593-607.
- VASSEUR G. et WEIDELT P. (1977) – Bimodal electromagnetic induction in non-uniform thin sheets with an application to northern Pyrenean induction anomaly. *Geophys. J. Roy. Astr. Soc.* 51, 669-690.
- AUBERT M. (1978) – Interprétation de la plus intense anomalie magnétique mesurée en France à 3 km d'altitude, *Bull. B.R.G.M.*, (2), II, 2, p. 139-147.
- AUBERT M., LENAT J.F. (1978) – Extension du volcanisme français sur le plateau continental du golfe du Lion : mise en évidence et étude par levé aéromagnétique en mer, *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), t. XX, 3, p. 237-243.
- BOIVIN P., GOURGAUD A. et LENAT J.F. (1976) – Un nouveau maar à remplissage basaltique : le plot de Laschamp (sud Devès, Massif Central Français), *C.R.Somm. Soc. Géol. Fr.*, fasc. 6, p. 265-267.

- BREUGNOT D. – Interprétation automatique des anomalies bidimensionnelles du champ magnétique par un algorithme de minimisation au sens des moindres carrés. Thèse 3^e cycle, Université Paris VI.
- BONNIN J. (1978) – Evolution géodynamique de la ligne Açores-Gibraltar, Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences Physiques, Université de Paris VII.
- COURTILLOT V. (1977) – Sur l'analyse de certaines variations spatiales et temporelles du champ magnétique terrestre, Thèse d'Etat, Université de Paris VII.
- COURTILLOT et LE MOUËL J.L. (1978) – Le levé aéromagnétique de la République de Djibouti, *Observations magnétiques, IGP*, fascicule n° 34, 39 p. Paris.
- COURTILLOT V., DUCRUIX J. et LE MOUËL J.L. – Inverse methods applied to continuation problems in geophysics, Springer Verlag Lecture Notes on Inverse Problems, édité par P. SABATIER (sous presse).
- COURTILLOT V., LE MOUËL J.L. et LEPRETRE B. (1978) – Réseau magnétique de répétition de la France métropolitaine : campagne 1977, *Observations magnétiques IGP*, fascicule n° 35, 28 p., Paris.
- DEBEGLIA N. (1977) – Interprétation des données aéromagnétiques disponibles sur les cartes à 1/250 000 de Nice et Gap, *Bull. B.R.G.M.*, 2^e série, section 2, n° 4, p. 213-229.
- DEBEGLIA N., GERARD A. et WEBER C. (1977) – Apport des levés aéromagnétiques détaillés à la géologie du socle du Massif Central Nord-oriental. *Bull. Soc. Géol. Fr.* 7, tome 19, n° 3, p. 363-373.
- DEBEGLIA N. et GERARD A. (1975) – Apport de l'aéromagnétisme à l'étude géologique du Nord du Massif Central, *Bull. B.R.G.M.*, 2^e série, n° 3, p. 223-246.
- DUBREUIL G. (1974) – Cartes magnétiques de la France à 1/250 000, Marseille, *Bull. B.R.G.M.* 2^e série, section 2, p. 185-213.
- GACHON A. et LENAT J.F. (1975) – Etude d'anomalies magnétiques situées en Limagne et sur ses marges, Thèse 3^e cycle, Université de Clermont.
- GALDEANO A. et ROSSIGNOL J.C. (1977) – Contribution de l'aéromagnétisme à l'étude du golfe de Valence (Méditerranée occidentale), *Earth Planet. Sci. Lett.*, 34, 85-99.
- GALDEANO A. et ROSSIGNOL J.C. (1977) – Assemblage à altitude constante des cartes d'anomalies magnétiques couvrant l'ensemble du bassin occidental de la Méditerranée, *Bull. Soc. Géol. France*, 7, 461-468.
- GERARD A. et DEBEGLIA N. (1975) – Automatic 3 D modeling for the interpretation of gravimetric or magnetic anomalies, *Geophysics*, 40, n° 6, 1014-1034.
- GOSLIN J. et SCHLICH R. – Structural limits of the South Crozet Basin. Relations to the Enderby Basin and the Kerguelen-Heard Plateau. Volume du "Third Symposium on Antarctic Geology and Geophysics". C. Craddock Ed. (sous presse).
- LE BORGNE E. et LE MOUËL J.L. (1976) – Le levé aéromagnétique des Antilles Françaises, *Observations magnétiques IGP*, fascicule n° 26, 25 p., Paris.
- LEFORT J.P. et SEGOUFIN J. (1978) – Etude comparée des structures profondes et des anomalies magnétiques allongées reconnues en Manche occidentale et en baie d'Audierne : existence possible d'une suture cryptique au nord-ouest du massif Armoricaïn (France), *Tectonophysics*, V. 46, p. 65-76.
- LEFORT J.P. et SEGOUFIN J. (1978) – Etude géologique de quelques structures magnétiques reconnues dans le socle pré-armoricain submergé : implications géodynamiques concernant la fracturation proto-atlantique et l'orogénèse hercynienne, *Bull. Soc. Géol. France*, t. XX, p. 185-192.
- LE MOUËL J.L., COURTILLOT V. et DUCRUIX J. (1975) – A solution of some problems in potential theory, *Geophys. J. Roy. astr. Soc.*, 42, 251-272.
- LENAT J.F. et GACHON A. (1978) – L'anomalie magnétique d'Isserteaux (Bas-Livradois, Massif Central français) ; découverte d'un lac de lave figée associé à un maar, *Bull. Soc. Géol. France*, 7, t. XX, n° 1, p. 115-119.
- ROCHE A., EDEL J.B., GANCARSKI S., LAUER J.P., MEUNIER J. et OTTLE J. (1977) – Mise au point d'une méthode de prospection magnétique des zones chaudes dans le sous-sol du fossé rhénan supérieur, Seminar on geothermal energy, Bruxelles, Comm. of Europ. Communities, vol. 1, p. 265-276.
- ROUX J. et SENAUD G. (1978) – Le levé aéromagnétique du Massif Central 1975 : Interprétation de quelques anomalies caractéristiques liées au volcanisme et au socle, Thèse 3^e cycle, Université Clermont.
- SCHLICH R. (1975) – Structure et âge de l'Océan Indien occidental, *Soc. Géol. France, Mém. Hors série*, n° 6, p. 1-103.
- SCHLICH R. – Structure and age of the Western Indian Ocean – Results of deep sea drilling, Volume du "Third Symposium on Antarctic Geology and Geophysics" C. Craddock ed. (sous presse).
- SCHLICH R., MULLER C. et SIGAL J. – Le Maestrichtien du site 239 (D.S.D.P. Océan Indien) dans son cadre régional et son incidence sur l'échelle chronologique des inversions du champ magnétique terrestre, *Soc. Géol. de France*, (sous presse).
- SEGOUFIN J. (1978) – Anomalies magnétiques mésozoïques dans le bassin de Mozambique, *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 287, série D, p. 109-112.
- TISSEAU J. (1978) – Etude structurale du golfe d'Aden et du bassin de Somalie (océan Indien occidental nord), Thèse de Doctorat de 3^e cycle, spécialité Géophysique Interne, Université de Paris-Sud.

- VINCENT P.M., AUBERT M., CANTAGREL J.M. et LENAT J.F. (1977) – Découverte d'un volcanisme paléocène en Auvergne : les maars de Menat et leurs annexes, études géologique et géophysique, *Bull. Soc. Géol. France*, 7, t. XIX, n° 5, p. 1057-1070.
- EDEL J.B. (1978) – Contribution du magnétisme et de la gravimétrie à la connaissance du socle varisque dans l'Est de la France et le Sud de l'Allemagne. *Sciences Géologiques, Bull. 31*, 2,
- ARGENTON H., BOBIER C. et POLVECHE J. (1975) – La mesure de l'anisotropie de susceptibilité magnétique dans les flyschs : application à la recherche des directions des paléocourants. *Sedimentary Geology*, 14, 149-167.
- BELLON H., COULON C., EDEL J.B. (1977) – Le déplacement de la Sardaigne - Synthèse des données géochronologiques, magmatiques et paléomagnétiques. *Bull. Soc. Géol. Fr. 19* (4), p. 825-831.
- BERTRAND H. et WESTPHAL M. (1977) – Comparaisons géologiques et paléomagnétiques des tholéïtes du Maroc et de la côte orientale de l'Amérique du Nord : Implications pour l'ouverture de l'Atlantique. *Bull. Soc. Géol. Fr. 19* (3), p. 513-520.
- BOGDANOFF S. et SCHOTT J.J. (1977) – Etude paléomagnétique et analyse tectonique dans les schistes rouges permien du sud de l'Argentera. *Bull. Soc. Géol. Fr. 19*, p. 909-916.
- BONHOMMET N., BEESON M.H., DALRYMPLE G.B. (1977) – A contribution to the Geochronology of the Island of LANAI, HAWAII. *Geol. Soc. Bull.*, vol. 88, p. 1282-1286.
- BOSSERT A. (1976) – Paléomagnétisme au Maroc : Les résultats du Mésozoïque et leurs implications - Hypothèses nouvelles Thèse de Docteur-Ingénieur, I.P.G. Strasbourg,
- BOSSERT A., BARDON C., HAMZEH R. et WESTPHAL M. (1977) – Paléomagnétisme des formations volcaniques du crétacé inférieur dans l'Atlas de Beni Mellal. *Notes et Mém. Serv. Carte Géol. Maroc. 39*, n° 272, 7-26.
- BINA M. et PREVOT M. (1976) – Highly coercive hematite grains : size and coercive force from A.F. demagnetization at high temperatures. *Phys. Earth Planet. Int.*, 13, 272-275.
- BIQUAND D. (1976) – Position chronologique de la très haute nappe alluviale de Grâce (vallée de la Somme) par rapport à la limite paléomagnétique Brunhes-Matuyama. *Bull. Ass. Fr. Etude du Quaternaire*, 3-4, 11^e année, n° 40-41.
- BIQUAND D. (1977) – Paléomagnétisme de la formation des grès à Voltzia (Bundsansstein supérieur) du Massif des Vosges (France). *J. Canad. Sci. de la Terre*, 14, 7, 1490-1514.
- BIQUAND D. – On the stability of the viscous remanent magnetization in sedimentary rocks when submitted to a.f. demagnetization new experimental results. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. (sous presse).
- BIQUAND D. et LAUTRIDOU J.P. – Détermination de la polarité magnétique des loess et sables pléistocènes de Haute-Normandie : premiers résultats. *Bull. de l'AFEQ* (Association française pour l'Etude du Quaternaire (sous presse).
- BLEIL U. et SMITH B. – Paleomagnetism of basalts, Leg. 51, *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, vol. 51 (sous presse).
- BLEIL U. et SMITH B. – Petrology of magnetic oxides at Site 417. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, vol. 51 (sous presse).
- BUCUR I. (1978) – Experimental study of the origin and properties of the defect moment in single domain hematite. *Geophysical Journal*. 55, 292-307.
- BUCUR I., LANGOUET L., LE GOFF M. et POZZI J.P. (1975) – Etudes archéologiques et archéomagnétiques des briques gaulois et gallo-romains d'Hirel (Ille-et-Vilaine). *Doss. C.R.A. d'Alet*, n° 3.
- CONDOMINES M. et TANGUY J.C. (1976) – Age de l'Etna déterminé par la méthode du déséquilibre radioactif ²³⁰Th/²³⁸U. *C.R. Ac. Sci.*, 282 D, 1661-1664.
- CONRAD J. et WESTPHAL M. (1975) – Paleomagnetic results from the Carboniferous and Jurassic of the Saharan platform. in Campbell K.S.W. (Editeur Third Gondwana Symposium, Canberra, p. 9-13.
- DALY L. – Des aimantations partielles aux aimantations superposées ; espoirs et difficultés. Colloque International de Magnétisme des roches organisé en l'honneur du Professeur Thellier (sous presse).
- DALY L. et POZZI J.P. (1976) – Résultats paléomagnétiques du Permien inférieur et du Trias marocain ; comparaison avec les données africaines et sud-américaines. *Earth Planet Sci. Lett.*, 29, 71-80.
- DALY L. et POZZI J.P. (1977) – Détermination d'un nouveau pôle paléomagnétique africain sur des formations cambriennes du Maroc. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 34, 264-272.
- DALY L. et POZZI J.P. (1977) – Conséquences des résultats paléomagnétiques permien et triasiques du Maroc pour l'histoire du Gondwana. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 7, t. XIV, n° 3, 507-512.
- DALY L., LEBLANC M. et POZZI J.P. (1977) – Mise en évidence de plusieurs phases d'aimantation et d'un nouveau pôle paléomagnétique cambrien dans les formations de Bou Azzer El Graara (Anti-Atlas, Maroc). *C.R. Acad. Sci. 284 D*, 271-274.
- EDEL J.B. et LOSSY D. (1975) – Magnétisme et géologie dans les Vosges méridionales. *Sci. Geol. Bull.* 28, 149-159 Strasbourg
- EDEL J.B. et LORTSCHER A. (1977) – Paléomagnétisme du volcanisme tertiaire de Sardaigne - Nouveaux résultats et synthèse. *Bull. Soc. Géol. Fr. 19*, (4) p. 815-824.
- GANCARSKI S. (1977) – Contribution à l'étude des propriétés magnétiques du socle rhénan. Dipl. Ing. Géophys. Strasbourg,

- GILLOT P.Y., LABEYRIE J., LAJ C., VALLADAS G., POUPEAU G., DELIBRIAS G. – The age of the magnetic inversion of Laschamp revisited. *Earth and Planetary Science Letters*. (sous presse).
- GOUPILLOT M. (1977) – Prospection magnétique dans le nord du Fossé Rhénan. Dipl. Ing. Géophys. Strasbourg.
- HENRY B. (1975) – Microtectonique et anisotropie de susceptibilité magnétique du massif tonalitique des Riesenferner-Vedrette di Ries (frontière italo-autrichienne), *Tectonophysics*, 27, 155-165.
- HENRY B. (1975) – Sur l'aimantation des roches permienes de la vallée du Guil (Hautes-Alpes). *C.R. Somm. Soc. Géol. de France*.
- HENRY B. (1976) – Relations entre contraintes et propriétés magnétiques des roches volcaniques permienes de la vallée du Guil. *Pure and Appl. Geophys.*, 114, 685-700.
- HENRY B. (1977) – Sur les propriétés magnétiques des laves spilitiques peu déformées de la bordure ouest du Pelvoux. *C.R. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève*, 11, 105-110.
- HUXTABLE J., AITKEN M.J., BONHOMMET N. (1978) – Thermoluminescence dating of sediment baked by lava flows of the Chaîne des Puys. *Nature*, 275, p. 207-209.
- JONQUET H., GIROD M. et WESTPHAL M. (1975) – Le mode de mise en place des brèches basanitiques de la région du Puy-en-Velay ; éléments de réponse par le paléomagnétisme. *C.R.Acad. Sc.* 280, série D, p. 2309-2312.
- LAJ C., NORDEMANN D., POMEAU Y. – Correlation function analysis of geomagnetic field reversals. *Journal of Geophysical Research*. (sous presse).
- LAUER J.P. (1975) – Contribution à l'étude de l'influence du métamorphisme thermique sur les propriétés magnétiques des roches. Exemples pris dans les Vosges cristallines du Nord. Thèse de Docteur Ingénieur, I.P.G. Strasbourg.
- LAUER J.P. (1978) – Création d'aimantations rémanentes de sciage et de forage au cours de la préparation d'échantillons de roches destinées à une étude paléomagnétique. *C.R. Acad. Sc.*, 287 : 1-4.
- LE GOFF M. (1975) – Inductomètre à rotation continue pour la mesure de faibles aimantations rémanentes et induites en magnétisme des roches. Mémoire d'ingénieur C.N.A.M., Paris.
- MC ELHINNY M.W., EMBLETON B.J., DALY L. et POZZI J.P. (1976) – Paleomagnetic evidence for the location of Madagascar in Gondwana land. *Geology*, 4, 455-457.
- MICHAUD A., WESTPHAL M., BOSSERT A. et HAMZEH R. (1975) – Tectonique de blocs dans le socle atlasomésien du Maroc ; une nouvelle interprétation des données géologiques et paléomagnétiques. *Earth and Planet. Sc. Lett.*, 24, p. 363-368.
- MOREL P. (1976) – Etude de l'anisotropie de susceptibilité magnétique des granites hercyniens de la vallée du Golo (Corse). D.E.A. Tectonophys., U.S.T.L., Montpellier.
- MOREL P. (1978) – Etude paléomagnétique d'une intrusion dioritique panafricaine dans l'Adrar des Iforas (Mali). Présentation de reconstitutions paléoccontinentales pour le Paléozoïque inférieur et le Protérozoïque. Thèse de 3^e cycle, option tectonophysique, Montpellier.
- OULIAC M. (1976) – Removal of secondary magnetization from natural remanent magnetization of sedimentary rocks : alternating fields or thermal demagnetization technique ? *Earth Planet. Sci. Lett.*, 29, 65-70.
- PLESSARD C. et PREVOT M. (1976) – The magnetic viscosity of submarine basalts. D.S.D.P. leg 37. Initial Rep. D.S.D.P. leg 37,
- POUTIERS J.A. (1975) – "Sur les propriétés magnétiques de certains sédiments continentaux et marins ; applications". Thèse Bordeaux.
- POUTIERS J.A. et GONTHIER E. (1978) – Sur la susceptibilité magnétique des sédiments du bassin d'Islande comme indicateur de la dispersion du matériel volcanoclastique à partir de l'Islande et des Faeroe (mission Faegas II). *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, Bordeaux, 23, 173-226.
- POZZI J.P. (1975) – Magnetic properties of oceanic basalts. Effects of pression and consequences for the interpretation of anomalies. *E.P.S.L.* 26, 337-344.
- POZZI J.P. (1977) – Effects of stresses on magnetic properties of volcanic rocks. *Phys. Earth Planet. Int.*, 14, 77-85.
- POZZI J.P. et LE MOUËL J.L. – Effets piéomagnétiques et application à la prévision des éruptions volcaniques. Colloque International de Magnétisme des roches organisé en l'Honneur du Professeur Thellier (sous presse).
- PREVOT M. (1975) – Magnétisme et minéralogie magnétique de roches néogènes et quaternaires. Contribution au paléomagnétisme et à la géologie du Velay. Thèse Doct. d'état, Univ. P. et M. Curie, Paris.
- PREVOT M. et GROMME S. (1975) – Intensity of magnetization of subaerial and submarine basalts and its possible change with time. *Geophysical Journal Roy. Astr. Soc.* 40, 207-224.
- PREVOT M. (1976) – Large intensities changes of the non-dipole field during a polarity transition. *Phys. Earth Planet. Int.*, 13, 342-345.
- PREVOT M. (1976) – Chronologie des inversions du champ magnétique terrestre au Quaternaire. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 18, 951-958.
- PREVOT M., BINA M. et MOTAMED A. – Paleomagnetic evidence for a large post eocene rotation of Central Elbrouz (Iran). *Geology*. (sous presse).

- PREVOT M. et LECAILLE A. (1976) – Comments on paper by K.D. Klitgord - The central anomaly magnetization high. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 33, 164-168.
- PREVOT M. et LECAILLE A. (1976) – Sur le caractère épisodique du fonctionnement des zones d'accrétion : critique des arguments géomagnétiques. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 18, 903-911.
- PREVOT M., LECAILLE A., FRANCHETEAU J., HEKINIAN R. (1976) – Magnetic inclination of basaltic lavas from the Mid-Atlantic Ridge. *Nature*, 259, 649-653.
- RAZAFINDRAZAKA G. (1975) – Paléomagnétisme de formations sédimentaires permienes de Madagascar. Thèse de 3^e cycle, Montpellier.
- RAZAFINDRAZAKA G., DALY L., POZZI J.P., BLACK R. (1976) – Position de Madagascar dans le Gondwana à partir de l'étude magnétique des formations du Karroo. *C.R. Ac. Sci.*, 282 D, 17-20.
- ROCHE A. (1975) – Dans traité de Géophysique interne, Masson Editeurs, *Paléomagnétisme*, Vol. 2, Chapitre 28, p. 107-128.
- ROCHE A., DELUZARCHE M. et WESTPHAL M. – Le caractère dipolaire du champ magnétique terrestre pendant le passé de la Planète. Colloque organisé en l'honneur du Professeur Goguel (sous presse).
- SCHOTT J.J. (1976) – Etude paléomagnétique des sédiments permien de l'Argentera-Mercantour. Thèse de 3^e cycle, I.P.G. Strasbourg.
- SEMAH F. (1977) – Chronologie des dépôts du Pléistocène inférieur et moyen ancien de la vallée de l'Hérault ; apport du paléomagnétisme. Mém. D.E.A., Univ. de Marseille Luminy.
- SEMAH F. et BIQUAND D. (1978) – Mise en évidence d'une inversion de polarité magnétique au sein des sédiments villafranchiens de Perrier (Massif Central). Interprétation stratigraphique. *C.R. Ac. Sc.* 286, série D, 829-832.
- SEMAH F. et BIQUAND D. – Détermination de la polarité magnétique de sédiments et de basaltes du Massif Central et du Midi Méditerranéen français. Interprétation chronostratigraphique. *Bull. de l'AFEQ.* (sous presse).
- SYLVAIN J.D. (1976) – Déterminations expérimentales et traitements mathématiques de quelques propriétés magnétiques des roches. Application au Massif de Herbillon-Chetabi (Algérie du Nord). Thèse de Spécialité, Nice.
- SMITH B. – Magnetic viscosity of Leg 46 basalts. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, vol. 46 (sous presse).
- SMITH B. et BLEIL U. – Rock magnetism of the basalts at Site 417. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, vol. 51 (sous presse).
- SMITH B. et PREVOT M. (1977) – Variations of the magnetic properties in a basaltic dyke with concentric cooling zones. *Phys. Earth Planet. Int.*, 14, 120-136.
- TAMAYO BALLON L. (1975) – Etude paléomagnétique de formations volcaniques miocènes et pliocènes du Cantal (France). Thèse de Doctorat d'Université.
- TANGUY J.C. (1975) – Intensity of the geomagnetic field from recent italian lavas using a new paleointensity method. *E.P.S.L.*, 27, 314-320.
- TISSERAND D., THUIZAT R., AGARD J. – Données géochronologiques sur le complexe de roches alcalines du Tamazeght (Haut-Atlas de Midelt, Maroc). *Bulletin du B.R.G.M.* (sous presse).
- WESTPHAL M. (1976) – Contribution du Paléomagnétisme à l'étude des déplacements continentaux autour de la Méditerranée Occidentale. Thèse de Doctorat d'Etat, I.P.G. Strasbourg.
- WESTPHAL M., ORSINI J., VELLUTINI P. (1976) – Le microcontinent corso-sarde, sa position initiale : données paléomagnétiques et raccords géologiques. *Tectonophysics*, 30, p. 141-257.
- WESTPHAL M. (1977) – Paléomagnétisme des formations permienes de Corse. Comparaisons avec la Sardaigne et et l'Estérel. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 18, : 1209-1215.
- WESTPHAL M. (1977) – Comments on : "Postulated rotation of Corsica not confirmed by new paleomagnetic data" by K.M. STORETVEDT and N. PETERSEN. *J. Geophys.*, 42 : 399-401.
- WESTPHAL M. (1977) – Configuration of the magnetic field and reconstruction of Pangaea in the Permian period. *Nature*, 267 : 136-137.
- WESTPHAL M., EDEL J.B. et SCHOTT J.J. (1978) – Essai de synthèse des données paléomagnétiques et de la tectonique des plaques en Méditerranée Occidentale. *C.R. Somm. Soc. Géol. France*, 20 (1), p. 12-15.
- DOLFUS G. et HESSE A. (1977) – Les structures de combustion du Tépé Djaffarabad ; périodes I à III. Cahier de la DAFI, 7, 11-47.

II – PHENOMENES AERONOMIQUES

G. THUILLIER
Service d'Aéronomie

I – STRUCTURES ET PROCESSUS DYNAMIQUES DE LA THERMOSPHERE

La mesure de ces quantités a été effectuée par plusieurs types d'instruments différents utilisant des méthodes différentes (mesures directes ou indirectes). L'analyse de l'ensemble des résultats montre une excellente cohérence et permet donc de s'assurer de leur validité physique. Les sources de données utilisées sont constituées pour l'essentiel par des mesures effectuées à bord de satellites, des expériences placées au sol dont, en particulier, le sondeur français à diffusion incohérente.

1.1 – Température de la thermosphère et de la basse thermosphère

1.1.1 – Thermosphère

Une coordination des efforts a été conduite pour construire des modèles locaux ou globaux des paramètres de la thermosphère.

La mesure de la température par l'interféromètre sphérique Fabry-Perot à bord du satellite OGO 6 a permis de construire un modèle global de la température exosphérique en fonction du jour, de l'heure locale, de la latitude et de l'activité solaire et magnétique (Thuillier et al., 1977a, Thuillier et al., 1977b). Un autre modèle utilisant en plus des paramètres précédant la latitude magnétique a permis de rendre compte des effets différents de l'activité magnétique observés à Millstone Hill et à St Santin qui ont la même latitude géographique, mais des latitudes magnétiques différentes (Thuillier et al., 1978).

La méthode de déduction de paramètres d'atmosphère neutre à partir des données ionosphérique et l'étude des variations de température exosphérique a fait l'objet de publications antérieures dont les résultats sont rappelés par Alcaydé et Bauer (1977). Par ailleurs, dans le souci d'inclure ces données dans des modèles complets de la thermosphère, des comparaisons ont été menées avec les données analogues obtenues à Millstone Hill (U.S.A.) Salah et al., 1976), ce qui a permis de les inclure ensuite dans le modèle basé sur des données de spectrométrie de masse (MS) et diffusion incohérente (IS) (Hedin et al., 1977).

L'ensemble des modèles maintenant publiés donne un tableau cohérent de la thermosphère malgré quelques écarts dus sans doute à la méthode de réduction des données ou bien dus aux conditions observationnelles (Alcaydé et al., 1978).

Une comparaison des températures électroniques et ioniques de nuit à St Santin fait apparaître un déficit de la température des électrons d'environ 15°K, expliqué par l'excès des pertes par conduction électrons-neutres sur les frottements électrons-ions (Mazaudier et Bauer, 1976).

Les mesures de température tirées de spectre de diffusion incohérente sont comparées avec celles des sondes du satellite AE-C (sonde électrostatique et à potentiel retardé). L'écart systématique moyen de T_e , de 10 % en excès aux moyennes latitudes pour les sondes spatiales, est renforcé aux altitudes élevées et dans la plasmopause. Cet écart s'expliquerait

(Hoegy, 1971) par la distribution non-maxwellienne au niveau des sondes spatiales (Benson et al., 1977).

Les résultats du satellite AE-C pendant un orage magnétique montrent un effet de concentration (accrue pour des espèces lourdes, affaiblie pour les espèces légères) qui persiste après le maximum de l'agitation magnétique. La concentration d'espèces lourdes augmente vers les basses latitudes, et les moyennes reproduisent bien le modèle de circulation générale et de diffusion.

1.1.2 - Basse thermosphère

Grâce à onze années de mesure de température neutre effectuées en région polaire dans le cadre de la coopération franco-soviétique, une variation en fonction du cycle solaire de l'équilibre thermique a pu être mise en évidence (Chanin, Toulinov, 1978). L'interprétation fait l'hypothèse que la turbulence joue un rôle important et jusqu'alors négligé par les modèles dans le transport d'énergie entre la thermosphère et la mésosphère.

La technique de la diffusion incohérente a aussi apporté une contribution intéressante cette région avec l'utilisation de 10 années d'observation (Alcaydé et al., 1979).

1.2 - Composition

L'analyse des trajectoires des satellites artificiels fournit la valeur de la densité totale au voisinage du périhélie. On dispose actuellement de près de 20 années de données représentant 2 cycles d'activité solaire. Par ailleurs, on dispose aussi de mesures directes de la température exosphérique, qui ont été modélisées par Thuillier et al. (1977 a) et Thuillier et al., (1977 b). On connaît aussi avec une précision analogue le profil de la température à partir de 200 km jusqu'à l'exosphère. En dessous, la connaissance du profil et de ses variations spatio-temporelles demeure insuffisante ; ceci explique pourquoi on a adopté la valeur de 200 km comme limite inférieure de validité. Au-delà de 1200 km, les mesures de freinage sont peu nombreuses pour que le modèle soit valable.

On peut considérer que les composants neutres majoritaires se répartissent comme s'ils étaient seuls selon l'hypothèse de l'équilibre hydrostatique. Les composants, azote moléculaire, oxygène atomique, hélium, sont tour à tour majoritaires en fonction de l'altitude. La connaissance de la densité totale et du profil de température permet de les déterminer. On peut ainsi modéliser les trois composants les plus importants de l'atmosphère neutre entre 200 et 1200 km et par voie de conséquence, la densité totale qui en est la somme (Barlier et al., 1977). Il faut seulement ajouter que l'oxygène moléculaire et l'hydrogène doivent être déduits d'autres types de mesures, mais ils ne représentent en général dans les zones d'altitude considérées qu'un faible pourcentage de la densité totale.

Les trois composants majoritaires sont représentés à l'altitude conventionnelle de 120 km à l'aide d'un développement en harmoniques sphériques limité aux premiers ordres, avec comme paramètres la latitude, l'heure locale solaire, le jour de l'année et l'activité solaire et géomagnétique. La précision est de l'ordre de 10 % à 20 %.

L'accord global avec les autres modèles existant peut être considéré comme satisfaisant, l'ensemble des mesures et des résultats est très cohérent (Barlier et al., 1978).

A partir des données du sondeur français à diffusion incohérente, la concentration de l'azote moléculaire dans la région 90-120 km (Alcaydé et al., 1979) a été décrite. A plus haute altitude, la concentration de l'oxygène atomique a été étudiée par Alcaydé et Bauer (1977) en période de faible activité solaire (1973 à 1977).

1.4 - Dynamiques et ondes

Le transfert dynamique d'énergie dans la thermosphère emprunte différents types de propagation périodiques :

- a) les modes forcés (marées, circulation à grande échelle ;
- b) les modes libres (ondes de gravité).

1.4.1 – Circulation à grande échelle

Amayenc et al. (1975), Alcaydé et al. (1977 b) ont mené une étude de bilan thermodynamique de la thermosphère à moyenne latitude par une résolution locale des équations de conservation et ont montré le rôle joué par la circulation à grande échelle dans la régulation des variations à long terme et saisonnières de la température exosphérique.

Ce travail est actuellement poursuivi par l'introduction des vents thermosphériques dans les équations de conservation des éléments minoritaires inertes (He, Ar) ou chimiquement actifs (H, H₂) pour étudier les distributions à l'échelle planétaire de ces constituants compte tenu des informations expérimentales sur la diffusion turbulente dans la basse thermosphère (Alcaydé et al., 1978).

L'émission à λ 630 nm de l'oxygène atomique observée aux basses latitudes présente des variations en longitude à heure locale constante. Ces variations sont expliquées par l'action du vent neutre de l'ionosphère dont l'effet dépend de la déclinaison magnétique (Thuillier et al., 1976).

1.4.2 – Ondes de gravité

Le sondeur à diffusion incohérente permet une étude de la propagation des ondes de gravité. Deux méthodes sont utilisées :

- les variations spatio-temporelles du contenu total d'électrons déduites de la rotation Faraday d'émission des satellites-balises ;
- l'analyse de la fréquence de la raie de plasma conduit à la densité électronique et à ses variations.

La première méthode a permis à Bertin et al. (1975) et Bertel et al. (1976) de relier les ondes de gravité de moyenne échelle à une origine météorologique. Un échantillon d'une centaine d'ondes de gravité observées pendant cinq jours consécutifs montre leur relation avec le Jet Stream de la tropopause. Une méthode d'inversion de la propagation d'énergie a permis d'évaluer le flux d'énergie qui pénètre dans la basse thermosphère. L'apport d'énergie produit une augmentation de la température neutre (Bertel et al., 1978 ; Bertin et al., 1979).

La seconde méthode a été utilisée par Vidal-Madjar et al. (1975) pour l'étude des fluctuations de densité électroniques de périodes comprises entre 12 et 30 mn. Un modèle numérique de propagation des ondes dans la thermosphère a été construit (Vidal-Madjar, 1978a). En utilisant les mesures de Bertin et Testud (1978) le modèle a permis d'évaluer le flux moyen d'énergie déposé dans la thermosphère, provenant de la troposphère sous forme d'ondes de moyenne échelle (Bertel et al., 1978). Le modèle numérique décrivant les interactions d'une onde de moyenne échelle avec l'atmosphère, permet de préciser la zone de dépôt d'énergie : entre 120 et 200 km (Vidal-Madjar, 1979). A l'altitude de 120 km, l'énergie déposée est de 0.1 erg/cm²/s. Ce dépôt conduit à une augmentation de la température de l'ordre de 5 % et une modification du vent de 15 ms⁻¹ en moyenne. L'origine de ces ondes est le Jet Stream de la tropopause (Vidal-Madjar et al., 1978b) où il propose comme mécanisme l'interaction non linéaire de deux instabilités présentes simultanément dans le Jet. Ce type d'étude connaît un développement important grâce au sondeur français multistatique.

L'accéléromètre CACTUS (Capteur Accélérométrique Capacitif Tri-axial Ultra Sensible) construit par l'ONERA et lancé par le C.N.E.S. en mai 1975 à bord du satellite CASTOR (inclinaison 30°) permet de déterminer la densité totale au voisinage du périégée (270 km) et jusqu'à une altitude variant de 450 km à 600 km (Barlier et al., 1975). et qui diminue avec l'altitude (pression de radiation, effets liés à la charge électrique de la bille (Bernard et al., 1977 ; Juillerat et al., 1978).

Des variations à petite ou à moyenne échelle comme celles engendrées par les ondes de gravité provenant de la très basse atmosphère ou des régions polaires sont étudiées (Villain, 1978).

L'amplitude des perturbations dépend de plusieurs paramètres (latitude, longitude, heure locale, activité géomagnétique). La fréquence d'apparition de perturbations pour les passages successifs du satellite au périhélie est directement fonction de l'amplitude relative de cette perturbation. Elle est rarement supérieure à 8 %. On observe par exemple que les amplitudes relatives sont plus importantes de nuit que de jour.

Il apparaît aussi qu'au-dessus de certaines régions terrestres, par exemple la zone de l'Atlantique Sud par opposition à la zone des Caraïbes, l'amplitude des perturbations est moins forte.

Ce phénomène semble corrélé à l'apparition plus ou moins fréquente de phénomènes météorologiques importants (cyclone par exemple) qui peuvent induire des ondes de gravité.

L'amplitude absolue de la perturbation augmente aussi avec l'activité géomagnétique mais dépend de l'heure locale.

La résolution temporelle permet aussi d'étudier le temps de retard qui sépare le début d'une activité géomagnétique importante et l'augmentation de la densité totale. Les temps de réponse de l'atmosphère dans la zone équatoriale sont de l'ordre de 4 à 6 heures.

Enfin, le comportement moyen de la haute atmosphère a été étudié en fonction de la longitude. Des variations significatives apparaissent (Barlier et al., 1978).

1.5 – Les émissions aéronomiques

1.5.1 – Mesures en altitude

Plusieurs campagnes de mesures photométriques embarquées à bord de ballons stratosphériques ont été réalisées à moyenne et basse latitudes.

Les résultats ont montré :

a) que le renforcement précrépusculaire de la raie rouge de l'oxygène est observable au moins jusqu'à des latitudes correspondant à une valeur $L = 5,1$ (G. Weill et M.L. Duboin, 1975) ;

b) que dans la zone de l'anomalie équatoriale Sud (Brésil) :

– le rapport des intensités des raies 557,7/630 nm de l'oxygène pouvait servir d'indicateur de l'altitude de la couche F,

– la détermination des taux de recombinaison de l'oxygène atomique dans les états 1S et 1D était possible,

– le maximum d'ionisation peut être localisé au moyen des émissions permises de l'oxygène à 777,4 nm (G. Weill et al., 1976).

1.5.2 – Mesures au sol

La précipitation de particules aurorales dans la calotte polaire centrale durant un orage magnétique à début brusque, a été étudiée (K. Lassen et G. Weill, 1975) à l'aide de caméras plein ciel et d'un photomètre photo-électrique.

L'étude des observations $H\alpha$ géocoronales par le satellite D_2A Tourmesol a été faite. Toutes les observations H Alpha antérieures montraient que l'émissivité intégrée semblait, quelle que soit la direction d'observation, deux à trois fois plus grande que ne le prévoyait la théorie.

Les valeurs mesurées sont en accord avec les valeurs théoriques calculées par transfert de rayonnement, et présentent après réduction, une erreur inférieure à 0,5 R (Levasseur et al., 1976). Il a été établi que les résultats antérieurs trop élevés provenaient d'une mauvaise

évaluation du signal zodiacal. La distribution verticale de l'émissivité dans la thermosphère déterminée avec l'hypothèse d'une stratification horizontale est, au premier ordre, compatible avec un modèle Kockarts-Nicolet. Une variation journalière, interprétée en terme d'asymétrie matin-soir de la géocouronne a été mise en évidence, ainsi qu'une évolution à long terme, due à des variations de flux solaire et de concentration en hydrogène. La comparaison des résultats H Alpha D₂A aux résultats Ly-Béta d'Apollo 16 obtenus par Meier et al. (1977) a confirmé la qualité du modèle géocoronal variable dans le temps et surtout a permis d'évaluer le flux au centre de la raie Ly-Béta solaire avec une erreur relative inférieure à 25 % ($6,5 \times 10^9$ photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{\AA}^{-1}$).

Enfin, l'émission H Alpha (Levasseur, 1976) dans la basse thermosphère équatoriale lors d'activité magnétique a été confirmée par les observations en satellite et au sol.

Cette émission est induite par des protons (15 - 250 keV) traversant la thermosphère équatoriale : ces protons semblent provenir d'un processus d'échange de charge, initialisé par des protons du courant annulaire lors de la phase principale d'un orage magnétique.

1.6 - Bilan radiatif

L'accéléromètre CACTUS (voir § 1.4) peut en l'absence de perturbation (freinage atmosphérique, force parasite instrumentale) mesurer la pression de radiation reçue. De nuit, il mesure la pression due au rayonnement IR de la Terre, de jour il mesure la différence entre la pression de radiation solaire et la pression de radiation rediffusée par la Terre, les nuages et l'atmosphère (Barlier et al., 1976 et Bouttes et al., 1978).

II - STRUCTURES ET PROCESSUS DYNAMIQUES DE LA MESOSPHERE -

2.1 - Température

Les mesures par Lidar sur le sodium utilisé comme traceur a permis de mesurer la température neutre entre 80 et 100 km (Mégie et al., 1978) à l'Observatoire de Haute Provence (44°N, 6°E), et à l'île de Heyss (80°5N, 50°E).

2.2 - Composition

Les sondages de l'atmosphère par Lidar effectués à partir de l'Observatoire de Haute Provence (lat. 44°N ; long. 6°E) sur les 3 alcalins : Na (depuis 1972), K (depuis 1975) et Li (depuis 1977), et à partir de Heyss URSS (lat. 80°5 N, long. 50°E) sur Na ont maintenant fourni des résultats géophysiques importants (Mégie et al., 1978).

Sur l'origine de ces alcalins, ils ont fourni la preuve d'une origine à la fois terrestre et météoritique pour Na et ceci à partir de la variation saisonnière du rapport Na/K (Mégie et al., 1978). Une excellente corrélation est observée entre les averses météoritiques et les augmentations brutales de chacun des 3 alcalins dont la source se situe vers 92 km. Enfin très récemment, les 2 isotopes 6 et 7 du Lithium ont pu être détectés et permettront de mesurer le rapport isotopique dans les averses météoritiques.

Les mesures crépusculaires sont aussi utilisées pour la mise en évidence des poussières de la haute mésosphère. C'est ainsi que la couche de polarisation du ciel crépusculaire présente vers 10° de dépression solaire un palier qui est expliqué par la présence de particules météoritiques diffusantes (Link et Martel, 1976). Cette mise en évidence a aussi été faite par des mesures photométriques effectuées à bord de ballons stratosphériques (Link, 1976).

On notera la tendance suivante concernant les mesures des émissions aéronomiques : elles ne sont plus, en général, étudiées pour elles-mêmes mais servent à déduire d'autres paramètres, en particulier d'origine dynamique (Thuillier, 1977) comme cela est maintenant le cas des émissions de l'oxygène atomique O¹S et de OH⁺ (voir § dynamique).

Une étude comparée des variations à long terme de l'intensité des bandes de OH, du taux d'humidité stratosphérique, du flux solaire et des variations de la température troposphérique tropicale suggère que les événements se produisant au niveau de la stratosphère suivent avec un retard d'environ 6 mois les variations undécennales observées au niveau de la mésopause (G. Weill et J. Christophe, 1977).

2.3 - Dynamique

Le sodium utilisé comme traceur a permis de mesurer la température neutre entre 80 et 100 km, le coefficient de diffusion turbulente à partir de la hauteur d'échelle supérieure de la couche (Mégie et al., 1977). En région polaire, la mise en évidence par Lidar des ondes de gravité a permis d'étudier de façon précise l'évolution de la vitesse de phase (Chanin et al., 1978) de ces ondes.

En 1973, Peterson et Kieffaber en photographiant le ciel nocturne dans le proche infra-rouge ont découvert des structures brillantes. Par triangulation, l'altitude de la région émissive a été trouvée à 85 km ; c'est pourquoi cette émission a été attribuée à OH⁺. Ces observations ont été reprises par Moreels et Hersé au cours de 12 campagnes à différentes latitudes. Il apparaît trois types de structures (grande, moyenne et petite échelle). La structure à petite échelle est formée de bandes parallèles distantes de 40 km environ et de plusieurs centaines de kilomètres de long. Leur vitesse de déplacement est inférieure à 20 ms⁻¹.

Les variations d'intensité peuvent être interprétées comme étant dues à l'effet géométrique d'une ondulation en altitude des couches. On n'observe effectivement aucune structure au zénith.

Hersé et Moreels (1978) ont mis au point des techniques de correction de l'effet de perspective et développent des théories rendant compte des phénomènes observés. On sait, en effet, que les observations de OH montrent une grande variabilité temporelle de l'émission (Rao et Kulkarni, 1972 ; Wiens et Weill, 1973), ce qui montre l'influence des phénomènes dynamiques. L'obtention d'images de l'émission OH est sans doute un moyen puissant pour étudier la dynamique de la mésopause. Pour pouvoir étudier la structure à grande échelle (1000 km) il a été proposé à l'Agence Spatiale Européenne un instrument prenant des photographies dans le proche infra-rouge et destiné à être embarqué lors du premier vol Spacelab.

La variation diurne d'intensité de la raie (O¹S - ¹D) présente des fluctuations de différentes amplitudes (> 2 %) et de période (T > 1 mn). Une étude quantitative de la relation entre les fluctuations et les phénomènes dynamiques se propageant dans cette région a été entreprise. Il a été montré à partir des intensités observées de l'émission de la raie verte et de la marée semi-diurne que les fluctuations de densité et de température induites par celle-ci rendaient compte de la variation moyenne de l'intensité de la raie verte (Petitdidier et Teitelbaum, 1977). Ce résultat a permis de montrer que le mécanisme d'émission de Chapman était prépondérant dans l'atmosphère et que l'énergie d'activation E₁ du coefficient de cette réaction était égale à 200 cal/mole.

Les fluctuations de courte période (2 - 15 mn) dans l'intensité d'émission de la raie verte à 100 km d'altitude ont été mesurées. Ces mesures montrent une variation systématique du taux de fluctuation qui présente un minimum autour de minuit. L'augmentation que l'on trouve au voisinage des crépuscules serait liée au passage du terminateur (Teitelbaum et Petitdidier, 1978).

Le développement en amplitude appliqué à l'étude des marées et ondes de gravité se justifie dans certains cas. Avec cette méthode et une expression qui permet de calculer l'effet de la viscosité on a montré que l'interaction des marées et ondes de gravité peut créer des ondes secondaires qui peuvent se propager librement mais avec des caractéristiques différentes des ondes de gravité classiques (Teitelbaum et Blamont, 1975).

On a montré que l'altitude de la turbopause varie pendant la nuit entre 95 et 110 km

d'altitude. Par l'analyse des données expérimentales on a montré que l'atmosphère reste turbulente jusqu'à 105 km d'altitude dans la première partie de la nuit et que la turbopause descend à 95 km d'altitude au milieu de la nuit (Teitelbaum et Blamont, 1976).

On a étudié la formation des discontinuités hydrodynamiques comme conséquence de la propagation des ondes de gravité. On a montré que l'interaction de deux ondes peut créer une discontinuité tangentielle dans l'écoulement. Ce processus peut expliquer de forts gradients de vent existants entre 100 et 110 km d'altitude et l'apparition de couches turbulentes dans cette région stable de l'atmosphère (Teitelbaum et Sidi, 1976 ; Sidi et Teitelbaum, 1978).

On a calculé les marées atmosphériques créées par chauffage de l'atmosphère dû à l'ozone.

On a montré que les asymétries dans la distribution de l'ozone (mesuré par le satellite Nimbus IV) sont suffisamment importantes pour créer des marées asymétriques à l'équinoxe (Teitelbaum et Cot, 1978).

2.4 - Chimie des agrégats

Les travaux de laboratoire concernant les agrégats mésosphériques ont été élargis. On étudie maintenant la cinétique chimique des agrégats ioniques et des agrégats neutres, et la photofragmentation des ions agrégats.

Les réactions d'hydratation des ions $H^+ (H_2O)_n$ ont été étudiées entre 130 et 160°K (Burke, 1977) ; Les données obtenues indiquent qu'à basse température les espèces $H^+ (H_2O)_n$ se comportent comme une phase condensée, même pour n aussi petit que 4. La cinétique d'hydratation de ces agrégats s'interprète par des processus d'adsorption-désorption, plutôt que par des réactions ion-molécule en phase gazeuse. Les travaux concernant la photodissociation des ions agrégats positifs ont montré que ce processus ne joue qu'un rôle secondaire dans le bilan ionique de la région D (Burke et Wayne, 1977).

III - STRUCTURE ET DYNAMIQUE DE LA STRATOSPHERE -

3.1 - Composition

3.1.1 - Ozone

De nombreuses équipes travaillent sur la détermination de la distribution verticale et de la distribution géographique de l'ozone par des méthodes très différentes : mesures in-situ ou mesures optiques.

Par spectrophotométrie UV et visible, Rigaud (1974 a, 1974 b, 1977) a mis en évidence une diminution de l'ozone au niveau de la stratopause au lever du Soleil. Ces mesures mettent en évidence le cycle de destruction de l'ozone au lever du Soleil par les oxydes d'azote par suite de l'arrivée successive dans le temps du flux solaire à des longueurs d'onde différentes. Des sondages verticaux ont aussi été effectués (Rigaud, 1975).

Un ozomètre stratosphérique à grande résolution temporelle a été construit pour étudier l'évolution in-situ de l'ozone stratosphérique (Aimedieu, 1976). Il permet d'étudier les mécanismes de transport dans la basse stratosphère en utilisant l'ozone comme traceur passif et d'étudier son évolution dans les régions de production au-dessous de 40 km d'altitude. L'instrument utilise la chimiluminescence en phase gazeuse de la réaction de l'ozone et de composés éthyléniques ; il mesure des variations relatives à 1% près et fournit des valeurs absolues à 5%. Six profils de la concentration d'ozone ont été obtenus lors de vols sous ballons stratosphériques jusqu'à l'altitude de 42 km. L'analyse des résultats obtenus montrent l'existence de strates turbulentes pour lesquelles la valeur du coefficient de trans-

port turbulent a été déduit dans l'approximation de Kolmogoroff. Les profils mesurés montrent la stabilité de la concentration de l'ozone dans la basse stratosphère au crépuscule à mieux que 1 % confirmant ainsi son usage comme traceur passif (Aimedieu, 1978 a et 1978 b).

Le Lidar permet aussi la détermination de profils verticaux (Mégie et al., 1977) du sol jusqu'à 30 km.

3.1.2 - Eau

La fluorescence UV du radical OH à 300 nm obtenue en éclairant les molécules de vapeur d'eau par un rayonnement UV Lyman Alpha a permis à Bertaux et Delannoy (1978) de mesurer le profil vertical de la concentration de la vapeur d'eau stratosphérique : la concentration varie peu entre 12 et 20 km et augmente aux altitudes moyennes à 20 km.

Un hygromètre à point de givre (Roulleau et Poc, 1978) pour la mesure de la vapeur d'eau dans la basse stratosphère a été construit et a effectué un vol stratosphérique préliminaire.

3.1.3-NO₂

Des observations systématiques du dioxyde d'azote atmosphérique en absorption sur le Soleil dans le domaine visible ont été conduites depuis le sol et en altitude en ballon et en avion.

Les principaux résultats obtenus sont les suivants :

- variation rapide aux crépuscules et durant une éclipse solaire de l'équilibre $\text{NO} \rightleftharpoons \text{NO}_2$;
- variation diurne de NO_2 avec un maximum, peu après midi, et un autre après le coucher du Soleil ;
- variation saisonnière aux latitudes moyennes avec un maximum au mois de juillet à 43°N et un minimum au mois de janvier ;
- variation en latitude avec un maximum en région intertropicale du même ordre de grandeur que le maximum d'été des latitudes moyennes ;
- distribution verticale à midi présentant un maximum dans la région de la tropopause (concentrations de 3 à 4 10^{10} mol cm^{-3} ;
- quantité totale de NO_2 atmosphérique très élevée qui varie à midi de 0.6 10^{17} mol cm^{-2} en hiver à 6 10^{17} en été (Pommereau, 1979).

La méthode d'absorption est aussi utilisée avec des sources stellaires pour déterminer la distribution verticale de composants minoritaires comme NO_2 ou les aérosols (Rigaud, 1977). Pour exploiter efficacement ces mesures, il est nécessaire de connaître les sections efficaces d'absorption des composants minoritaires dans des conditions proches de celles existant dans la stratosphère. Celle de ClO a été mesurée (Rigaud, 1977 et 1978) celle de NO_2 en fonction de la température est en cours de détermination.

3.1.4 - Autres composants

Les expériences Stratoz ont mis en œuvre une série de mesures radiométriques et spectrométriques de constituants mineurs de la stratosphère à bord d'une Caravelle naviguant à l'altitude 11 km :

- radiomètre à émission IR mesurant HNO_3 , O_3 ;
- radiomètre à modulation sélective mesurant NO_2 ;
- les spectromètres à grille en absorption sur l'IR solaire mesurant NO , NO_2 , HNO_3 , N_2O , CO , CH_4 , H_2O et les fréons 11 et 12.

Ces mesures ont été effectuées entre 72°N et 64°S.

3.2 – Dynamique

La crainte de la destruction de la couche naturelle d'ozone par des réactions catalytiques dues à l'activité humaine a conduit à mesurer le transport vertical et l'intensité des zones de turbulence. Ces mesures ont été réalisées en utilisant un anémomètre ionique embarqué sur ballon stratosphérique (vols COVOS). Les résultats obtenus sont les suivants (Barat, 1979) :

- l'intensité de la turbulence est mesurée à partir de la détermination des échelles dissipatives qui varient de 5 cm (turbulence faible). L'extension du domaine inertiel ne dépasse pas 40 m ;
- plusieurs couches ont été observées d'épaisseur moyenne égale à 180 m et ayant une probabilité d'apparition de 15 %.

L'efficacité de ces structures pour le transport turbulent évident à un coefficient de transport moyen de $0.015 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

- l'apparition des zones de turbulence est bien corrélée avec des nombres de Richardson voisins de 0.25.

Il reste à étudier la relation entre les zones de turbulence et leurs sources (ondes de gravité).

Les mesures de la vitesse du vent en fonction de l'altitude montrent des gradients de vitesse très importants dans la basse stratosphère (Cadet, 1975).

3.3 – Bilan radiatif de la stratosphère

Des mesures du flux infrarouge tellurique et du flux solaire réfléchi incidents dans la basse stratosphère ont été obtenues au cours de vols de ballons plafonnants de longue durée. Ces flux sont déterminés à partir de la mesure de la température du gaz des ballons, à l'aide de leur équation d'équilibre thermique en vol.

Les valeurs de flux infrarouge tellurique obtenues sont en assez bon accord avec les observations par satellite, bien qu'elles montrent une plus grande variation avec le contenu de vapeur d'eau troposphérique et l'altitude du sommet des nuages.

L'albedo mesuré dans la stratosphère est toujours plus élevé que l'albedo des mêmes surfaces mesuré par satellite à cause de sa dépendance avec l'angle d'observation. Cette différence doit être prise en compte dans les calculs photochimiques stratosphériques.

IV – L'EXOSPHERE –

4.1 – La géocouronne d'hydrogène

Un photomètre Lyman alpha placé à bord du satellite OGO 5 a permis en 1968 et 1969 des observations de l'hydrogène exosphérique. L'analyse des variations temporelles de la densité, liées à l'activité solaire, a permis de mettre en évidence un fait nouveau : le flux d'échappement thermique (ou de Jeans) augmente avec la température exosphérique. Ceci ne peut s'admettre que si d'autres mécanismes d'échappement, d'importance au moins égale, se comportent à l'opposé. On a montré (Bertaux, 1975) que tel était le cas de l'échange de charge entre l'hydrogène exosphérique et protons plasmasphériques.

L'exosphère étant non-maxwellienne, grâce à des calculs théoriques de forme de raie exosphérique on a pu interpréter les mesures faites avec une cellule à absorption, qui permet l'analyse spectrale de la raie Lyman-alpha émise par la géocouronne. On trouve que la température exosphérique de l'hydrogène mesurée en 1968 coïncide avec le modèle de Jacchia (1971) et on montre qu'il y a très peu d'atomes d'hydrogène sur des orbites satellites dans l'exosphère jusqu'à 2.5 Rayons Terrestres.

La géocouronne d'hydrogène a aussi été étudiée par le satellite OSO 5 qui montre que, au cours d'un cycle solaire, le flux Lyman Alpha varie d'un facteur 2 (Vidal-Madjar, 1975 et 1977). Emerich et Cazes (1977) ont montré l'anomalie de la distribution de l'hydrogène à l'exobase le matin et au niveau des pôles à l'aide des mesures d'un photomètre embarqué sur le satellite D₂A. Ces résultats ont été confirmés de façon indépendante grâce aux données de l'expérience OSO 5 par Emerich et al. (1976).

Un modèle d'exobase a été développé (Vidal-Madjar et al, 1974) et utilisant des données du satellite OGO 6 a permis d'interpréter les faits précédents (Vidal-Madjar et Thomas, 1978). L'anomalie de la distribution d'hydrogène aux pôles a été interprétée en tenant compte de l'échappement par le vent polaire (Thomas et Vidal-Madjar, 1978).

Enfin, le comportement de l'hydrogène pendant le dernier minimum de l'activité solaire a été modélisé par Vidal-Madjar (1978).

La raie Lyman Alpha solaire a été mesurée avec précision (0.02 Å) par le spectromètre à haute résolution embarqué sur le satellite OSO 8 (Artzner et al., 1977 ; Bonnet et al., 1978). Un spectre Lyman Alpha solaire pris dans une région modérément active (pour diminuer l'auto-absorption) présente un décalage Doppler par rapport à l'absorption géocoronale. Une faible absorption correspondant à un décalage Doppler dû à une vitesse de 32 km/s est aussi décelée. Cette absorption a été interprétée par Emerich et Cazes (1978) comme étant due à l'hydrogène interplanétaire dont ils ont déduit plusieurs paramètres (densité, pression de radiation, coefficient d'ionisation).

Les mesures de l'émission Lyman alpha effectuées par le satellite D₂A ont permis à Cazes et Emerich (1977) de séparer l'émission Lyman Alpha géocoronale de l'émission Lyman Alpha de l'hydrogène interplanétaire et de déduire le profil Doppler de cette dernière en se servant de la géocouronne comme cellule à absorption, le balayage en longueur d'onde étant réalisé par des effets géométriques conduisant à des décalages Doppler différents. Les profils sont obtenus au voisinage des pôles de l'écliptique ; la température déduite est $(10 \pm 2) 10^3$ K. Les deux profils obtenus présentent tout deux un décalage vers le bleu indiquant que la pression de radiation solaire est inférieure à l'effet de gravitation.

V – AERONOMIE DES PLANETES ET DES COMETES –

5.1 – Vénus

En collaboration avec l'URSS un photomètre Lyman Alpha avec cellule à absorption de H a été construit pour étudier l'hydrogène dans l'atmosphère de Vénus.

Les mesures ont mis en évidence une remontée de la température exosphérique vers 3000 km, tout à fait anormale, interprétée comme due à l'onde de choc provoquée par l'obstacle que représente la planète Vénus à l'écoulement du vent solaire. Cette émission Lyman-alpha "chaude" est attribuée à la résonance de photons solaires sur une population d'atomes placés en orbites satellites lors de l'échange de charge entre les protons du vent solaire (devenu turbulent derrière l'onde de choc) et les atomes d'hydrogène neutres de l'exosphère (Bertaux et al., 1978).

Une analyse détaillée a permis de distinguer l'émission de l'oxygène à 1304 Å (auquel le photomètre est sensible) de celle de l'hydrogène à 1216 Å. La variation de l'intensité le long du disque a permis de mesurer pour la première fois la quantité de H atomique se trouvant entre 110 et 250 km d'altitude dans l'atmosphère de Vénus. De plus, on a mesuré une variation jour-nuit de la température exosphérique, de 500 à 200 K (Bertaux et al., 1979).

5.2 – Jupiter

Avec le spectromètre du satellite OAO-3 (Copernicus) nous avons pu mesurer l'intensité de la raie Lyman-alpha émise par Jupiter. En utilisant une calibration de l'instrument

sur la géocouronne, terrestre, nous avons pu déterminer la quantité totale de H dans l'atmosphère de Jupiter. Cette quantité impose une contrainte stricte sur le coefficient moyen de diffusion turbulente K, que nous trouvons égal à 10^6 (Bertaux et al., 1979).

Analysant les fluctuations en longitude de la Tâche Rouge de Jupiter, F. Link (1974) suggère que leurs causes peuvent être liées à l'activité solaire.

5.3 - Mars

La photométrie photoélectrique de l'occultation de ϵ Geminorum par Mars montre une différence de température d'environ 60°K entre les atmosphères nocturne et diurne de Mars vers 50 km (F. Link, 1977).

5.4 - Comètes

Grâce à l'observation de la largeur de la raie Lyman-alpha de la comète Kobayashi-Berger-Milon avec OAD-3, on a pu démontrer que l'hydrogène observé provenait bien de la photodissociation de la vapeur d'eau (Festou, 1977 ; Festou et al., à paraître).

On a également pu déterminer le taux de production d'hydrogène des comètes West et d'Arrest.

BIBLIOGRAPHIE

- THUILLIER G. (1977) - Study of dynamic processes in the Thermosphere by observation of aeronomical emissions. *J. Atmos. Terra. Phys.*, 39, 1183.
- HERSE M. and MOREELS G. (1978) - Photogrametry of OH waves structures. 6. AM Proceedings (to be published).
- MOREELS G. and HERSE M. (1977) - *Planet. Space Sci.* 25, 265.
- WIENS, R.H. and WEILL, G. (1973) - *Planet. Space Sci.* 21, 1011.
- AIMEDIEU P. (1976) - Thèse de Spécialité. Université Pierre et Marie Curie.
- AIMEDIEU P. (1978 a) - *C.R. Acad. Sci. Paris* (séance du 13/11/1978).
- AIMEDIEU P. (1978 b) - *C.R. Acad. Sci. Paris* (séance du 27/11/1978).
- ALCAYDE D., BAUER P., HEDIN A. and SALAH J.E. (1978) - Compatibility of seasonal variations in mid-latitude/thermospheric models at solar maximum and low geomagnetic activity, *J. Geophys. Res.*, 83, 1141.
- BERTIN F., TESTUD J., KERSLEY L., and REES P. (1978) - The meteorological jet stream as a source of medium scale gravity waves in the thermosphere on experimental study. A paraître dans *J. Atmos. Terr. Phys.*
- BERTAUX J.L. and DELANNOY A. - Vertical distribution of H₂O in the stratosphere as determined by UV fluorescence in-situ measurements. Accepté pour publication dans *Geophys. Res. Lett.*
- POMMEREAU J.P., HAUCHECORNE A. et SOUCHON G. (1976) - Observations de la variation de l'épaisseur optique intégrée de NO₂ dans l'atmosphère au cours d'une éclipse de soleil. Variation diurne comparée aux tropiques et aux latitudes moyennes. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 283.
- BLAMONT J.E., POMMEREAU J.P. et SOUCHON G. (1975) - Observations crépusculaires du NO₂ stratosphérique. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 281.
- EMERICH C., CAZES S. (1977) - Local perturbations of the atomic hydrogen density distribution near the exobase, inferred from D2A Lyman-alpha and dayglow measurements. *Geophys. Res. Lett.* 4, 523.
- MEGIE G., ALLAIN J.Y., CHANIN M.L., BLAMONT J.E. (1977) - Vertical profile of stratospheric ozone (18-28 km) by lidar sounding from the ground. *Nature*, 270, p. 329.
- MEGIE G., BOS F., BLAMONT J.E., CHANIN M.L. (1978) - Simultaneous measurements of atmospheric sodium and potassium. *Planet. Space Sci.*, 26, p. 27-35.
- MEGIE G., CHANIN M.L., TULINOV G.Y., DOUDOLADOV Y.P. (1978) - High latitude measurements of the atomic sodium concentration and neutral temperature at the mesopause level by the Lidar technique. *Planet. Space. Sci.*, 26, 5 p. 509.
- CHANIN M.L., TOULINOV G.F. (1978) - The polar thermospheric temperature behaviour during the 11 year solar cycle. Accepté au *Journ. Geophys. Res.*

- ALCAYDE D., BAUER P. and FONTANARI J. (1974) - Long term variations of thermospheric temperature and composition, *J. Geophys. Res.* 79, 629-637.
- POMMEREAU J.P. - Détermination depuis le sol de la quantité totale de dioxyde d'azote atmosphérique. *C.R. Acad. Sci.* (à paraître).
- THUILLIER G., FALIN J.L., WACHTEL C. (1977a) - Experimental global model of the exospheric temperature based on measurements from the Fabry-Perot interferometers on board the OGO 6 satellite., *J. Atm. Terr. Phys.* 39, 399.
- THUILLIER G., FALIN J.L., BARLIER F. (1977b) - Global experimental model of the exospheric temperature using optical and incoherent scatter measurements. *J. Atm. Terr. Phys.* 39, 1195.
- BARLIER F., BERGER C., FALIN J.L., KOCKARTS G. and THUILLIER G. (1978) - Comparisons between various semi-empirical thermospheric models of the terrestrial atmosphere, *J. Atm. Terr. Phys.* A paraître en déc. 1978.
- BENSON R.F., BAUER P., BRACE L.H., CARLSON H.C., HAGEN J., HANSON W.B., HOEGY W.R., TORR M.R., WAND R.H., WICKWAR V.B. (1977) - Electron and Ion Temperatures. A comparison of Ground based Incoherent scatter and AE. C. Satellite Measurements. *J. Geophys. Res.* 82, 36.
- JENKINS E.B., DRAKE J.F., BARKER E., UPSON W. III, BERTAUX J.L., FESTOU M., KELLER H.U. - Lyman-alpha observations of comet Kobayashi Berger Milon with Copernicus. A paraître dans *Astrophysical Journal*.
- BERTAUX J.L., BLAMONT J., MARCELIN M., KURT V.G., ROMANOVA H.H., SMIRNOV A.S. (1978) - Lyman-alpha observations of Venera-9 and 10. The non thermal hydrogen population in the exosphere of Venus. *Planet. Space Sci.* 26, 817.
- MARCELIN M. (1978) - Analyse des données sur l'exosphère de Vénus fournies par un photomètre Lyman-alpha embarqué sur les sondes soviétiques Vénéra-9 et 10. Thèse de Doctorat de 3^e cycle. Université de Paris.
- ROULLEAU M. and POC M.M. (1978) - A frost-point hygrometer for horizontal soundings of the lower stratosphere, *Journal of Applied Meteorology*, 17, n° 6.
- HAUCHECORNE A. (1977) - Equilibre thermique d'un ballon en vol et applications à l'étude du bilan radiatif atmosphérique. Thèse de 3^e cycle, Paris.
- HAUCHECORNE A. and POMMEREAU J.P. - Stratospheric radiometric measurements from constant level balloons, *J. Atmos. Sci.* (à paraître).
- TEITELBAUM H. and BLAMONT J.E. (1975) - *J. Atmos. Terr. Phys.* 37, 697-716.
- TEITELBAUM H. and BLAMONT J.E. (1977) - *Planet and Space Sci.* 25, 723-734.
- TEITELBAUM H. and SIDI C. (1976) - *J. Atm. and Terr. Phys.* 38, 413-421.
- SIDI C. and TEITELBAUM H. (1978) - *J.A.T.P.* 40, 529-540.
- TEITELBAUM H. and COT C. - *J.A.T.P.* (à paraître).
- PETITDIDIER M. and TEITELBAUM H. (1977) - Lower thermosphere emissions and tides, *Planet. Space Sci.* 25, 711-721.
- TEITELBAUM H. et PETITDIDIER M. (1978) - Night-time variation of short period fluctuations (2-15 mois) in the oxygen green line, *J. Atmos. Terr. Phys.* 40, 223-227.
- PETITDIDIER M. (1978) - Etude de l'influence des phénomènes dynamiques au niveau de la mésopause sur l'intensité de la raie verte. Thèse de Doctorat d'Etat. Université de Paris VI.
- ALCAYDE D., FONTANARI J. et AMAYENC P. (1977) - Bilan thermodynamique de la thermosphère à moyenne latitude. *Ann. Geophys.* 33, 289-303.
- ALCAYDE D., BAUER P., HEDIN A., SALAH J.E. (1978) - Compatibility of seasonal variations in mid-latitude thermospheric models at solar maximum and low geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.* 83, 1141-1144.
- ALCAYDE D., FONTANARI J., BAUER P., BERNARD R., KOCKARTS G. (1979) - Lower thermosphere modelling of neutral concentrations and temperature. *Ann. Geophys.* 35, to be published.
- ALCAYDE D. (1978) - "Incoherent scatter data related to thermospheric modelling" Space Research XIX, M.J. Rycroft editor - Pergamon Press.
- AMAYENC P., ALCAYDE D. et KOCKARTS G. (1975) - Solar EUV heating and dynamical processes in the mid-latitude thermosphere. *J. Geophys. Res.* 80, 2887-2891.
- AMAYENC P. (1975) - Mouvements thermosphériques de grande échelle - Etude par diffusion incohérente à moyenne latitude, Thèse d'Etat, Paris VI.
- HEDIN A., SALAH J.E., EVANS J.V., REBER C.A., NEWTON G.P., SPENCER N.W., KAYSER D.C., ALCAYDE D., BAUER P., COGGER L. et MC CLURE J.P. (1977) - A global thermospheric model based on Mass Spectrometer and Incoherent Scatter data - N2 density and temperature. *Jour., Geophys. Res.* 82, 2139-2147.
- HEDIN A.E., BAUER P., MAYR H.G., CARIGNAN G.R., BRACE L.H., BRINTON H.C., PARKS A.D., PELZ D.T. (1977) - Observations of Neutral Composition and Related Ionospheric Variations during a magnetic storm in february 1974, *J. Geophys. Res.* 82, 3182.
- ALCAYDE D. (1975) - Structure et thermodynamique de la thermosphère à moyenne latitude. Thèse de doctorat ès-Sciences Physiques, Toulouse.

- ALCAYDE D. et BAUER P. (1977) – Modélisation des concentrations d'oxygène atomique observés par diffusion incohérente. *Ann. Geophys.* 33, 305-320.
- TESTUD J., AMAYENC P. and BLANC M. (1975) – Middle and low-latitude effects of auroral disturbances from incoherent scatter, *J. Atmos. Terr. Phys.* 37, 989-1010.
- BERNARD R. (1978) – Etude de la variabilité des marées atmosphériques. Mesures par radar météorologique et sondeur à diffusion incohérente. Thèse de Doctorat d'Etat. Paris VI.
- BERNARD R. (1979) – Incoherent scatter results for coordinated special interval at S^t Santin (à paraître, *J. Atmos. Terre Phys.*).
- BERTEL L., BERTIN F. et TESTUD J. (1976) – De la mesure du contenu électronique intégré appliqué à l'observation des ondes de moyenne échelle. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 37, (3) 261-270.
- BERTEL L., BERTIN F., TESTUD J. et VIDAL-MADJAR D. (1979) – Evaluation of the vertical flux of energy into the thermosphere from medium scale gravity waves generated by the jet stream (à paraître dans *J. of Atmos. Terr. Phys.*).
- BERTIN F., TESTUD J. and KERSLEY L. (1975) – Medium scale gravity waves in the ionospheric F-region and their possible origin in weather disturbances, *Planet. Space Sci.*, 23 (3) 493-507.
- BERTIN F., HUGUES K.A. and KERSLEY L. (1977) – Atmospheric waves induced by an eclipse, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 457-461.
- BERTIN F., TESTUD J. (1977) – Jet stream et ondes de gravité, une étude expérimentale. *La météorologie*. Nov.
- BERTIN F., TESTUD J., KERSLEY L., REES P. (1979) – The meteorological jet stream as a source of medium scale gravity waves in the thermosphere, an experimental study (à paraître, *J. Atmos. Terr. Phys.*).
- BLANC M. and AMAYENC P. (1976) – Contribution of Incoherent scatter radar to the study of middle and low latitude Electric fields, in *Atmospheric Physics from spacelab* Edit. Burger (Reidel Netherlands).
- MAZAUDIER C. et BAUER P. (1976) – Nocturnal disequilibrium of the F2 region ionosphere at middle latitudes *J. Geophys. Res.* 81, 3447-3451.
- SALAH J.I., EVANS J.V., ALCAYDE D., BAUER P. (1976) – Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and Saint-Santin, *Ann. Geophys.* 32, 257-266.
- LEVASSEUR A.C., MEIER R.R., TINSLEY B.A. (1976) – Resolution of the discrepancy between Balmer alpha emission rates, the solar Lyman flux and models of geocoronal hydrogen concentration. *Journal of Geophysical Research* 81, p. 5587.
- LEVASSEUR A.C. (1976) – Observations atmosphériques et astronomiques au voisinage de 6563 Å à bord du satellite D2A : contribution à l'étude de la lumière zodiacale, de la géocouronne, des nébuleuses émissives et des aurores équatoriales, Thèse de Doctorat d'Etat. CNRS AO 12631.
- MEIER R.R., CARRUTHERS G.R., PAGE T.L., LEVASSEUR A.C. (1977) – Geocoronal Lyman and Balmer alpha emissions measured during the Apollo 16 Mission. *Journal of Geophysical Research* 82, p. 737.
- BURKE R.R. Ions mésosphériques (1977) – *Revue Générale de l'Electricité* 86, 438.
- BURKE R.R. and WAYNE R.P. (1977) – Photodissociation of positive cluster ions by CW and pulsed laser radiation, *Int. J. Mass Spectrom. Ion Phys.* 25, 199.
- VIDAL-MADJAR D., KOFMAN W. et LEJEUNE G. (1975) – Mesures de la raie de plasma par diffusion incohérente à Nançay et premiers résultats morphologiques. *Ann. de Géophys.* 31, p. 227.
- VIDAL-MADJAR D. (1978) – Gravity wave detection in the lower thermosphere with the French incoherent scatter facility, *J.A.T.P.*, 40, p. 685
- VIDAL-MADJAR D. (1978) – Theoretical study of propagation of short periodic gravity waves within the thermosphere application to the plasma line measurement and to a Faraday rotation experiment, *J.A.T.P.*, 40, p. 1.
- BERTEL L., BERTIN F., TESTUD J. et VIDAL-MADJAR D. (1978) – Evaluation of the vertical flux of energy into the thermosphere from medium scale gravity waves generated by the Jet Stream, *J.A.T.P.* 40, p. 691.
- VIDAL-MADJAR D. (1978) – Medium scale gravity waves and their non linear interaction with the mean flow : a numerical study, accepté au *J.A.T.P.*
- VIDAL-MADJAR D., BERTIN F. et TESTUD J. (1978) – Sur le Jet Stream de la tropopause en tant que source des ondes de gravité observées dans la thermosphère. *Ann. Géophys.* 34, p. 1.
- CHANIN M.L. (1975) – Filling in of the Fraunhofer lines by scattering on the ground. *Journ. Geophys. Res.* 80, n° 19, 2859.
- CHANIN M.L., GOUTAIL J.P. (1975) – Diurnal variation of the sodium dayglow. *Journ. Geophys. Res.* 80, n° 19, 2854. 2854.
- BARLIER F., BERGER C., FALIN J.L., KOCKARTS G. and THUILLIER G. – A thermospheric model based on satellite drag data 1978. *Annales Géophysiques* 34, 9.
- LASSEN K. and WEILL G. (1975) – Precipitation of auroral particles in the central polar cap during a sudden commencement magnetic storm. Danish Meteorological Institute Geophysical Papers ISBN.87.7478.113.8.

- LINK F. (1975) – Some particularities affecting the movements of Jupiter's Red Spot. *Planet. Space Sci.*, 23, 805.
- LINK F. (1976) – Sur les éclipses du satellite IK-3. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 282, 415.
- LINK F. (1976) – Scattering Layer of Cosmic Dust in the upper atmosphere Lecture Notes in Physics Edited by H. Elsässer and H. Fechtig, *Springer-Verlag*, 48, 107.
- LINK F. (1977) – Occultation de ϵ Geminorum par Mars le 8 avril 1976. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 284, 41.
- LINK F. et MARTEL M.T. (1976) – Polarisation du ciel crépusculaire et de l'activité météoritique. *Ann. Geophys.* 32, 157.
- LINK F. et WEILL G. (1975) – Calcul de la luminance crépusculaire due à la diffusion primaire II. *Ann. Geophys.* 31, 279.
- WEILL G., CHRISTOPHE J., LIPPENS C., ACKERMAN M. and SAHAI Y. (1976) – Stratospheric balloon observation of the southern intertropical arc of airglow in the Southern America area. *Mémoires Société Royale des Sciences de Liège IX*, 179.
- WEILL G. and CHRISTOPHE J. (1977) – Long term variations of OH nightglow emission. Relation to stratospheric humidity ? Dynamical and Chemical Coupling between the Neutral and Ionized Atmosphere (NATO Advanced Study Institute Series) Ed. B. Grandal and J.A. Holter, D. Reidel.
- BOURG-HECKLY G., CIESLIK S. and PETITDIDIER M. (1975) – Internal Partition Function for the NO molecule ; integrated line absorption cross-sections for the $A^2 - X^2$ (1-0) and (2-0) bands. *J. Quant. Spectros. Radia. Transfer.* 15, 405.
- CADET D. (1975) – Vertical Wind Shear measurements in the lower Stratosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 101, 485.
- EMERICH C., CAZES S., VIDAL-MADJAR A. (1976) – More evidence of an exospheric hydrogen sub-solar bulge. *Geophys. Res. Let.* 3, 715.
- BLAMONT J.E., CAZES S. et EMERICH C. (1975) – Direct measurement of hydrogen density at exobase level and exospheric temperatures from Lyman alpha line shape and polarisation. 1- Physical background and first results on day side, *J. Geophys. Res.* 81, 6103.
- VIDAL-MADJAR A., CAZES S. et EMERICH C. (1974) – Influence of the earth rotation and of possible perturbation on the exobase and exospheric hydrogen densities. *Pl. Sp. Sci.* 22, 1375.
- CAZES S. et EMERICH C. (1977) – Interstellar medium Lyman alpha emission : line profile, temperature and polarization measurements deduced from its geocoronal absorption. *Astron. Astrophys.* 68, 59.
- ARTZNER G. (1978) – The solar H-Lyman alpha line : wavelength and profile measurement. *Astron. Astrophys.* 70, L11.
- PRANGE R., CAZES S. et EMERICH C. (1976) – Contribution of Lyman alpha geocoronal emission to the measurement of low fluxes of charged particles by electrostatic analysers. *Ann. Geophys.* 32, 381.
- VIDAL-MADJAR A. (1975) – *Solar Physics* 40, 1, 69.
- VIDAL-MADJAR A. (1977) – The solar output and its variations - Edité par O.R. White Colorado Ass. Univ. Press. Boulder.
- VIDAL-MADJAR A. et THOMAS G (1978) – The terrestrial hydrogen problem. *Planet. Sp. Sci.* 26, 863.
- EMERICH C. et CAZES S. (1978) – Interplanetary atomic hydrogen parameters inferred from OSO-8 high resolution measurements of the solar H Lyman alpha profile. *Astron. Astrophys.* 69, L13.
- VIDAL-MADJAR (1978) – *Geophys. Res. Let.* 5, 29.
- THOMAS G. et VIDAL-MADJAR A. (1978) – *Planet. Space Sci.* 26, 873.
- BARAT J. (1979) – Transport vertical dans la stratosphère. A Paraître.
- BONNET R.M., LEMAIRE P., VIAL J.C., ARTZNER G., GOUTTEBROZE P., JOUCHOUX A., LEIBACHER J., SKUMANICH A., VIDAL-MADJAR A. (1978) – *Astrophys. J.* 221, 1032.
- ARTZNER C., BONNET R.M., LEMAIRE P., VIAL J.C., JOUCHOUX A., LEIBACHER J., VIDAL-MADJAR A. (1977) – *Space Science Instrument*, 3, 131.
- BERTAUX J.L. (1975) – Observed variations of the exospheric hydrogen density with exospheric temperature. *J. Geophys. Res.* 80, 639.
- BERTAUX J.L. (1978) – Interpretation of OGO-5 line shape measurements of Lyman-alpha emission from terrestrial exospheric hydrogen. *Planet. Space Sci.* 26, 431.
- RIGAUD P., FPEIGER O. et HUGUENIN D. (1974 a) – *C.R. Soc. Phys. Hist. Nat. Genève*, 9, 84.
- RIGAUD P. (1974 b) – *Ann. Geophys.* 30, 319.
- RIGAUD P., FPEIGER O. et HUGUENIN D. (1975) – *Ann. Geophys.* 31, 455.
- RIGAUD P. (1977) – *J. Geophys Res.* 82, 3661.
- RIGAUD P., NAUDET J.P. et HUGUENIN D. (1977) – *C.R.A.S. Paris* 284 B, 331.
- RIGAUD P., LEROY B., LE BRAS G., POULET G., JOURDAIN J.L. et COMBOURIEU J. (1977) – *Chem. Phys. Lett.* 46, 161-163.
- JOURDAIN J.L., LE BRAS G., POULET G., COMBOURIEU J., RIGAUD P. et LEROY B. (1978) – *Chem. Phys. Lett.* 57, 109-112.

III – PHENOMENES MAGNETOSPHERIQUES

C. BEGHIN
C.R.P.E

La finalité de cette discipline est de comprendre les phénomènes et les lois qui régissent la stabilité et la dynamique de tout l'environnement ionisé qui entoure la Terre depuis les basses couches de l'ionosphère jusqu'à l'onde de choc créée par notre planète dans le vent solaire. Les équipes françaises ont réalisé que ces objectifs ne seraient atteints que dans le cadre d'une étroite coopération nationale d'abord, puis internationale. On remarque d'autre part, surtout ces dernières années, un effort de coordination, de synthèse et d'analyse théorique qui a été notamment suscité par une Action Thématique Programmée, placée sous l'égide du CNRS dans le cadre de l'IMS (International Magnetospheric Study), effort qui devrait s'accroître encore dans les années à venir. On a, dans ce rapport, classé les travaux effectués tout d'abord en moyens et méthodes mis en œuvre, puis description plutôt morphologique du milieu et étude des processus macroscopiques et phénomènes particuliers, tous travaux concourant de manière indispensable à la partie centrale de nos études : les phénomènes globaux fondamentaux (circulation générale des basses couches, circuits électromoteurs et interaction planète-vent solaire).

1 – MOYENS ET METHODES SPECIFIQUES A L'ETUDE DE L'IONOSPHERE-MAGNETOSPHERE

1.1 – Moyens à partir du sol

Les moyens mis en œuvre dans les Observatoires métropolitains ou d'Outre-Mer, qui constituent un support indispensable à l'étude de la magnétosphère, font l'objet d'un compte-rendu au Chapitre IV. Nous ne soulignerons ici que les singularités propres à l'étude de l'ionosphère-magnétosphère ainsi que les travaux d'amélioration ou de conception de moyens ou méthodes nouvelles.

Parmi les moyens mis en œuvre au sol, signalons tout d'abord la technique du radar à diffusion incohérente (P. BAUER, 1975) pour l'étude de la thermosphère et des processus dynamiques couplant très étroitement le milieu ionisé et l'atmosphère neutre, de la région D à la région F. Une amélioration importante est apparue dès 1975 avec le système quadristatique : le faisceau vertical de Saint-Santin observé par le grand réflecteur radioastronomique de Nançay est recoupé par les antennes de deux nouvelles stations à Monpazier et Mende. Ce dispositif donne accès aux trois composantes de la vitesse ionique, donc au champ électrique perpendiculaire au champ magnétique.

Les antennes des nouvelles stations permettent en outre une meilleure résolution temporelle (P. BAUER et al., 1974). La haute résolution temporelle de la mesure de la raie de plasma, permettant d'obtenir les variations de densités et la température électronique, a été mise à profit, en particulier pour l'étude des ondes de gravité (D. VIDAL-MADJAR et al., 1975). Toujours par la mesure de la raie de plasma, on a pu mesurer la fonction de distri-

bution des photo-électrons (G. LEJEUNE et KOFMAN, 1977). Enfin l'étude de l'ionosphère aurorale par diffusion incohérente sera incontestablement liée au projet européen EISCAT à partir des années 80 (M. BLANC et PETIT, 1978).

Comme autres techniques permettant d'accéder aux mêmes régions, signalons celle du radar cohérent pour l'étude de la couche E (M. CROCHET, 1977), la rétrodiffusion des ondes décamétriques dans les liaisons grandes distances (A. BOURDILLON et al., 1977) et la technique du radar météorique (R. BERNARD, 1978). Enfin on a mis au point, sous l'égide de l'Institut National d'Astronomie et de Géophysique, une Station Mobile de Réception des Signaux Géophysiques. Cette station comporte un grand nombre de capteurs (optiques, magnétiques, électromagnétiques) dont certains sont liés par télémesure à la station centrale. Elle a été utilisée au cours de deux campagnes : l'une en Norvège (Novembre-Décembre 1976), l'autre en Islande (Juillet-Septembre 1977), en liaison avec le satellite GEOS-1 (S. PERRAUT et al., 1978 a).

1.2 - Moyens in-situ

Dès le début de l'ère spatiale la discipline a largement utilisé les ballons, fusées sondes et satellites permettant l'investigation in-situ. Ces moyens, accessibles à la communauté française, sont essentiellement internationaux depuis 1975, sous l'égide du CNES (agence française), de l'ESA (agence européenne), de la NASA (agence US), de l'INTERCOSMOS (agence soviétique) etc. . . .

On trouvera dans l'analyse des travaux ci-dessous référence à nombre de ces moyens, citons cependant les plus importants d'entre eux qui feront date dans les grandes entreprises de la discipline par la participation qu'y ont prise plusieurs laboratoires français.

En janvier-février 1975 fut réalisée l'expérience ARAKS (F. CAMBOU et al., 1978) sous l'égide du CNES, de l'INTERCOSMOS et des TAAF consistant dans le tir de deux fusées sondes depuis l'île de Kerguelen pour étudier les phénomènes induits par l'injection artificielle de faisceaux d'électrons (voir § 4.4). En avril 1977 fut lancé le premier satellite GEOS sous l'égide de l'ESA, qui, par suite d'une défaillance du lanceur américain ne fut pas placé sur orbite géostationnaire, mais fut suivi en juillet 1978 par GEOS 2, placé correctement sur orbite. Plusieurs équipes françaises ont été impliquées dans la totalité de la mission de ces satellites : étude des ondes et du plasma magnétosphérique (K. KNOTT, 1975) (voir § 2, 3.2. et 4.1.).

Enfin en octobre 1977 a été lancé le couple de satellites ISEE A et B sous l'égide de l'ESA et de la NASA pour l'étude des interactions soleil-terre et des régions de transition, impliquant également trois équipes françaises (A.C. DURNEY, 1978) (voir § 1.3., 3.3. et 4.1.).

1.3 - Méthodologie

Performances des instruments

L'extension des possibilités de la technique du radar à diffusion incohérente a été étudiée pour la mesure des courants alignés le long du champ magnétique grâce au déplacement Doppler de la raie plasma (P. BAUER et al., 1976), voire son utilisation à bord d'un engin spatial (M. BLANC et al., 1976).

Une technique d'asservissement rapide utilisant le principe de la sonde de Langmuir a été développée dans le but de mesurer le potentiel plasma par rapport au potentiel de référence d'un engin spatial avec une bonne résolution temporelle (J.L. MICHAU, 1977). La technique des sondes à plasma, basée sur la mesure de l'impédance mutuelle autour des résonances de plasma, a fait l'objet de nombreuses études théoriques et expérimentales soit pour élargir le champ des paramètres accessibles in-situ (densité, température, conductivité,

vitesse de dérive et caractérisation des plasmas non maxwelliens), soit pour augmenter la précision des mesures (R. POTTELETTE et al., 1975 ; R. DEBRIE et al., 1976 ; E. MICHEL, 1976 ; L.R.O. STOREY et MALINGRE, 1976 ; R. DEBRIE et al., 1977 ; P.M.E. DECREAU et DEBRIE, 1977 ; M. MALINGRE et STOREY, 1977).

Cette technique a été mise en œuvre sur fusées sondes (C. BEGHIN et al., 1976) et à bord des satellites GEOS (P.M.E. DECREAU et al., 1978 a). La comparaison avec d'autres techniques mises en œuvre simultanément à bord de GEOS 1 a permis d'estimer la qualité des diagnostics du plasma thermique dans la magnétosphère (P.M.E. DECREAU et al., 1978 b) ainsi que l'identification d'ondes électrostatiques naturelles (P.J. CHRISTIANSEN et al., 1978 a). Parallèlement, on a étudié théoriquement le comportement d'antennes électriques vis-à-vis du micro-champ d'ondes électrostatiques d'un plasma en équilibre thermique en vue de développer des sondes donnant accès à la fonction de distribution (R. POTTELETTE et al., 1977).

La technique des sondes à relaxation, basée sur l'excitation des résonances du plasma, a de la même façon fait l'objet d'études systématiques sur son comportement autour de la fréquence plasma et des harmoniques de la fréquence à l'occasion de tirs sur fusées sondes (J. BITOUN et al., 1975 ; B. HIGEL, 1975 ; B. HIGEL et de FERAUDY, 1977). Installée à bord des satellites GEOS (J. ETCHETO, 1976) et ISEE, et bénéficiant d'un système automatique de poursuite des résonances (B. HIGEL, 1978 b) cette technique s'est révélée extrêmement précise pour la mesure de la densité électronique, de l'intensité du champ magnétique et pour l'identification des ondes naturelles (J. ETCHETO et PETIT, 1977 ; J. ETCHETO et BLOCH, 1978 ; P.J. CHRISTIANSEN et al., 1978 a).

Une extension de cette technique aux très basses fréquences autour de la fréquence de résonance hybride basse, a été étudiée à partir des résultats du sondeur installé à bord du satellite ISI S 2 (M. HAMELIN et BEGHIN, 1976 ; M. HAMELIN, 1978).

Enfin, on a développé et mis en œuvre une nouvelle technique de mesure de densité électronique intégrée entre les deux satellites ISEE A et B, basée sur la propagation de deux ondes au-delà de la fréquence plasma (C.C. HARVEY et al., 1978) ; cette technique, combinée avec le sondeur à relaxation, est destinée à l'étude du vent solaire aux régions de transition.

Traitement du signal

Des recherches sur la détermination de la fréquence instantanée d'un signal, ont conduit à la mise au point d'un appareil analogique fournissant amplitude, fréquence et phase instantanées d'un ou plusieurs signaux (C. BERTHOMIER, 1975, 1976 ; C. BERTHOMIER et CORNILLEAU-WEHRLIN, 1975). Cet appareil a été utilisé pour la détermination des directions de normales d'onde instantanées de signaux naturels TBF (N. CORNILLEAU-WEHRLIN et al., 1976), et a des applications dans d'autres domaines (C. DEMARS et al., 1978).

En étendant le concept de fréquence instantanée (et de temps de groupe) à un signal pourvu d'une largeur de bande (et d'une durée) intrinsèques, une méthode originale d'analyse du signal qui concentre l'énergie autour du point de puissance instantanée maximale a été développée (K. KODERA, 1976 ; K. KODERA et al., 1976 ; K. KODERA et al., 1978). Un organigramme de calcul a été mis au point, fondé sur la représentation complexe d'un signal polarisé à deux composantes et permettant de déterminer la polarisation instantanée de signaux variant dans le temps (K. KODERA, 1976). L'application de cette méthode à l'analyse des signaux UBF observés en deux points conjugués au sol a permis de mettre en évidence les caractéristiques complexes de la polarisation de ces ondes à diverses fréquences (K. KODERA et al., 1977 ; C. de VILLEDARY et al., 1977). Enfin cette méthode est en cours d'application aux signaux TBF et UBF détectés par les satellites GEOS.

Par ailleurs, des études théoriques ont montré comment on peut déterminer expéri-

mentalement la répartition de la densité d'énergie des ondes, en fonction des variables fréquence et direction de la normale d'onde ; ces méthodes ont été appliquées à l'analyse des données du satellite OGO-5 sur le "souffle" TBF (F. LEFEUVRE, 1977) et sont en cours d'application pour l'analyse des données des satellites GEOS.

Enfin une méthode basée sur la mesure de cohérence et d'écart en temps a été développée pour préciser les relations entre les signaux de la gamme UBF captés au sol en des points éloignés (~ 1000 km) ou simultanément au sol et en satellite (A. KNOB et LACOUME, 1977 a et 1977 b).

2 - DESCRIPTION ET MODELISATION DU MILIEU

Régions D, E et F

En ce qui concerne les constituants neutres, le compte-rendu des recherches dans ces régions figure au chapitre précédent. On fera état ici essentiellement des aspects relatifs à la description et à la modélisation du milieu ionisé. Quant aux phénomènes électro-dynamiques et couplages entre les deux milieux, on en rendra compte aux paragraphes 3.1 et 4.3.

En combinant des données expérimentales de sources variées (freinage des satellites, diffusion incohérente, spectroscopie de masse in-situ etc. . .) on a pu élaborer des modèles de la thermosphère (D. ALCAYDE et al., 1978) et comparer les mesures obtenues par différentes techniques. C'est ainsi que les mesures de température électronique tirées du spectre de diffusion incohérente ont été comparées avec celles des mesures in situ du satellite AE-C. L'écart systématique moyen de T_e , de 10 % en excès aux moyennes latitudes pour les sondes spatiales, est renforcé aux altitudes élevées et dans la plasmopause. Cet écart s'expliquerait par la distribution non-maxwellienne au niveau des sondes spatiales (R.F. BENSON et al., 1977). D'autre part, une comparaison des températures électroniques et ioniques de nuit à Saint-Santin fait apparaître un déficit de la température des électrons d'environ 15°K , expliqué par l'excès des pertes par conduction électrons-neutres sur les frottements électrons-ions (C. MAZAUDIER et BAUER, 1976).

En zones aurorale et polaire, un effort a été entrepris dans le cadre de la coopération franco-soviétique pour une meilleure connaissance de l'ionosphère de ces régions. C'est ainsi que le programme SAMBO I (1974) avait pour but d'étudier l'ionosphère aurorale en période d'orage magnétique par la multiplication des ballons volant simultanément, chacun des ballons comportant comme un véritable observatoire flottant capable d'enregistrer à la fois le rayonnement X de freinage généré par les électrons précipités, les émissions lumineuses qui en résultent et les champs électriques ionosphériques qui leur sont associés (I.A. ZHULIN et al., 1978). En particulier la distribution du champ électrique ionosphérique dans les diverses phases orageuses et les situations calmes a été comparée aux prévisions des modèles théoriques. A la frontière Nord de la zone aurorale, des tirs de fusées sondes soviétiques ont été effectués depuis l'île de Heyss (URSS) au cours des campagnes IPOCAMP I (1974) et II (1976), comportant des mesures de profils de densité et de température électroniques et de champs électriques (E. MICHEL et al., 1975 ; C. BEGHIN et al., 1976).

En ce qui concerne la modélisation de la région F, à partir du modèle CCIR qui fournit l'altitude $h_m F_2$ de la concentration électronique maximum $N_m F_2$ en fonction de l'année, du jour, du temps universel (TU), de la latitude et de la longitude et en introduisant la représentation en heure locale plutôt qu'en heure TU, on a mis en évidence des structures très simples qui s'expliquent dans le cadre de la dynamique de la région F. De plus, on a mis en évidence des situations où les quantités $h_m F_2$ et $N_m F_2$ sont complètement fausses en s'appuyant sur les données optiques - émission à 630 nm de $O(^1D)$ - obtenues par satellites et des explications physiques ont été données (J.W. KING et al., 1975).

Magnétosphère

La description de la magnétosphère et l'étude des zones de transition plasmopause, magnétopause et onde de choc par mesures in-situ ont été rendues accessibles aux équipes françaises grâce aux satellites GEOS et ISEE. La densité et la température électroniques du plasma thermique ont été mesurées avec grande précision pour la première fois par techniques de sondage radioélectrique local (voir § 1.3). Typiquement des densités allant de 0,1 à 70 électrons/cm³ ont été mesurées avec une précision de quelques 10⁻³ el/cm³ (J. ETCHETO et BLOCH, 1978 ; B. HIGEL, 1978 b). La température du secteur diurne, entre 4 et 7 rayons terrestres, a été trouvée beaucoup plus basse qu'escomptée auparavant, typiquement 10.000 à 20.000°K (P.M.E. DECREAU et al., 1978 a). Par ailleurs, l'intensité du champ magnétique local (typiquement 100 γ) est mesurée à quelques 10⁻¹ γ près. Une carte statistique de la plasmasphère diurne autour de la plasmopause a été établie et les modèles seront affinés au fur et à mesure des dépouillements en cours.

En ce qui concerne le plasma chaud, les mesures effectuées à bord du satellite GEOS 1 ont montré que des électrons et des ions (~ 1 KeV) s'écoulent le long des lignes de force sur la face diurne de la magnétosphère, de l'ionosphère vers le plan équatorial, au cours des orages magnétiques. Un écoulement dans la direction opposée a été aussi mis en évidence, uniquement composé de protons. La transition entre ces 2 écoulements, au niveau du satellite GEOS, se produit en une fraction de seconde. Par ailleurs les fonctions de distributions électroniques ont été comparées aux émissions électrostatiques au-dessus de la gyrofréquence électronique. Ces nouveaux résultats, présentés lors de l'ESLAB Symposium à Innsbruck (juin 1978), seront édités en 1979.

3 - ETUDE DES PHENOMENES DYNAMIQUES GLOBAUX

3.1 - Relation ionosphère-atmosphère neutre

Transfert d'énergie du milieu neutre au milieu ionisé

L'étude des variations des profils de densité et de température ioniques a fait apparaître le transfert d'énergie de l'atmosphère neutre inférieure vers la thermosphère par l'intermédiaire d'ondes de gravité (F. BERTIN et al., 1975 ; L. BERTEL et al., 1976). Une étude théorique (D. VIDAL-MADJAR, 1978 a, 1978 b, 1978 c ; D. VIDAL-MADJAR et al., 1978) a porté sur la résolution des équations de transfert des ondes de moyennes et courtes périodes dont la source résulterait de l'interaction non-linéaire de deux ondes de l'aérojet troposphérique. Par ailleurs, des ondes acoustico-gravitationnelles engendrées par une éclipse totale de soleil ont été détectées pour la première fois à l'occasion de l'éclipse du 30 juin 1973 en Afrique et interprétées théoriquement (P. BROCHE et CROCHET, 1975 ; P. BROCHE et al., 1976).

Couplages électro-dynamiques

Beaucoup plus nombreux, ces types de couplages font intervenir un transfert d'énergie du milieu ionisé au milieu neutre et vice-versa, via les forces électro-magnétiques, avec une source apparente soit dans la magnétosphère, soit dans l'atmosphère. Parmi ces processus, citons tout d'abord les travaux sur l'induction des courants et champs électriques produits aux basses et moyennes latitudes par effet dynamo ionosphérique (M. BLANC et AMAYENC, 1976). Une étude des variations diurnes et saisonnières de la dérive induite par champ électrique est en cours afin de dissocier les effets d'origine magnétosphérique liés à la convection ou à la co-rotation (J. TESTUD et al., 1975) des effets de marée troposphérique (R. BERNARD, 1978). Les données obtenues par la mesure des trois composantes de vitesse de dérive des ions ont permis d'étudier théoriquement les effets de transport des perturbations aurorales vers les moyennes latitudes (M. BLANC et al., 1977) et à l'échelle semi-globale vis-à-vis du renversement du champ magnétique interplanétaire (M. BLANC, 1978).

La campagne de lancements de ballons SAMBO 1 (voir § 2) a par ailleurs, fourni des mesures sur la dynamique du champ électrique horizontal des zones aurorales en périodes calme et d'orage (I.A. ZHULIN et al., 1978). D'autre part, l'électrojet équatorial a été étudié expérimentalement en latitude et longitude et dans le cadre d'une modélisation de ce type de circulation (M. CROCHET et al., 1976 ; M. CROCHET, 1977 ; J. GAGNEPAIN et al., 1976, 1977). De plus, le phénomène de contre-électrojet a été observé par radar cohérent pour la première fois en 1977.

Par ailleurs, la dynamique et l'extension longitudinale des irrégularités alignées de la région F ont été étudiées des latitudes moyennes aux latitudes aurorales ainsi que leur déplacement vers l'équateur en période d'activité magnétique (A. BOURDILLON et NICOLLET, 1977 ; A. BOURDILLON et al., 1977).

Enfin la variation longitudinale à heure locale constante de l'altitude de concentration maximum de la couche F ($h_m F_2$) s'est trouvée corrélée avec celle de l'intensité de l'émission 630 nm de l'oxygène atomique dans les arcs tropicaux mesurée à bord du satellite OGO 4. On a montré que cette distribution particulière résulte de l'effet du vent neutre sur l'ionosphère qui, en fonction de la valeur de la déclinaison magnétique, modifie l'altitude $h_m F_2$ expliquant ainsi les effets de longitude observés (G. THUILLIER et al., 1976).

3.2 - Relations ionosphère-magnétosphère

Le problème de la convection au sens large (établissement du circuit électrodynamique entre la magnétosphère et l'ionosphère et modification des caractéristiques de ce circuit par suite des interactions entre ondes et particules ou autres processus non linéaires tels que résistivité anormale, phénomènes de doubles couches . . .) a été abordé d'une part sous l'aspect de la morphologie du circuit global et d'autre part sous l'aspect de la stabilité du circuit vis-à-vis des interactions ondes-particules ou l'inverse (génération et stabilité des ondes).

A partir des résultats obtenus par le satellite franco-soviétique ARCADE 1 lancé en décembre 1971, l'évolution des spectres en énergie en fonction de la longitude a été étudiée ; elle a permis de montrer que les protons responsables des aurores observées dans le secteur diurne de la magnétosphère étaient originaires d'une région "source" située à l'arrière de la magnétosphère (Y.I. GALPERIN et al., 1976 b). Les variations de l'énergie moyenne des flux de protons de basse énergie mettent en évidence la convection magnétosphérique et les accélérations de type Betatron et Fermi qui l'accompagnent dans le plan équatorial de la magnétosphère (Y.I. GALPERIN et al., 1978). A partir des caractéristiques des précipitations diffuses des électrons de basse énergie ($E < 30$ KeV) dans le secteur nocturne avant minuit de la magnétosphère, on a démontré que la frontière équatoriale de ces précipitations est la projection aux latitudes ionosphériques de la frontière interne du feuillet de plasma (Y.I. GALPERIN et al., 1977 ; V.L. KHALIPOV et al., 1977). Frontière qui, à deux occasions (orages des 13-17 février 1974) était confondue avec le plasmopause et qui d'autre part coïncide avec celle de la dépression électronique de l'ionosphère mesurée à bord d'un autre satellite (M. ERCHOVA et al., 1977).

Par la technique d'analyse des sifflements radioélectriques (Y. CORCUFF, 1975 ; P. CORCUFF, 1977, P. CORCUFF et al., 1977) les mouvements de dérive équatoriale du plasma magnétosphérique ont été étudiés en période de sous-orage et de recouvrement magnétique. L'importance relative et les rôles respectifs des champs électriques d'induction et de convection ont notamment été déterminés (P. CORCUFF, 1978).

Les calculs théoriques (Y.I. GALPERIN et al., 1976 a) des émissions lumineuses des raies de l'hydrogène démontrent qu'il n'est pas possible de retrouver les propriétés initiales (énergie, angle) des faisceaux de protons à partir de profils lumineux expérimentaux obtenus au sol.

En ce qui concerne le problème de la convection étudiée sous le double aspect des tra-

jectoires de particules énergétiques et de leurs interactions avec les ondes, les zones interdites de pénétration des protons ou des électrons après l'établissement d'un champ électrique de convection ont été déterminées (S.W.H. COWLEY et ASHOUR-ABDALLA, 1976 a, b). La variation des paramètres globaux du plasma chaud (anisotropie, énergie caractéristique) a été précisée (S.W.H. COWLEY et ASHOUR-ABDALLA, 1975, 1976 c). Parallèlement, on a déterminé la variation de la fonction de distribution angulaire des protons avec la longitude au cours d'un mouvement de convection (J. SOLOMON, 1975, 1976). On en a déduit la variation du taux d'amplification des ondes cyclotroniques avec la longitude (J. SOLOMON, 1977 ; J. SOLOMON et PELLAT, 1978).

Dans un domaine voisin, l'étude des "échos de dérive" observés au niveau de l'orbite géostationnaire sur les électrons de très haute énergie ($\sim 1 - 2$ MeV) a permis de justifier des modèles simples de champ magnétique non dipolaire et d'étudier les variations des paramètres caractéristiques de ces modèles avec la pression du vent solaire (G. CHANTEUR et al., 1977, 1978).

3.3 - Relations magnétosphère-milieu interplanétaire

Au moyen de l'utilisation combinée de mesures magnétiques au sol qui offrent une excellente couverture spatiale et temporelle des données obtenues par des sondes interplanétaires, on a poursuivi l'étude du couplage magnétosphère-milieu interplanétaire. Ceci a permis la mise en évidence de l'influence de la polarité du champ magnétique interplanétaire sur la variation annuelle et diurne de l'activité magnétique (A. BERTHELIER, 1976).

Par ailleurs, des mesures de champ électrique en ballon ont montré le rôle de la composante azimuthale du CMI (Champ Magnétique Interplanétaire) sur la convection au niveau du cornet polaire ainsi que le comportement à grande échelle de la convection en zone aurorale (HOLEWORTH et al., 1977). L'étude détaillée des mesures d'absorption ionosphériques à Dumont d'Urville (J. LAVERGNAT et al., 1976 ; M. SYLVAIN et al., 1978 ; J. VASSAL et al., 1976) a permis d'identifier certains phénomènes typiques du cornet polaire. Enfin le dépouillement des données du satellite ISIS 2 ainsi que l'analyse des ionogrammes effectués à partir du sol ont mis en évidence deux anomalies de la région F caractéristiques de la frontière calotte polaire-zone aurorale (D. ROUX, 1977).

D'autre part, l'étude de la dynamique du vent solaire et des ondes de choc associées aux éruptions solaires d'août 1972 s'est poursuivie à partir des données de l'expérience CALIPSO-1 lancée en 1972 (F. CAMBOU et al., 1975 b, M. SROCZYNSKA, 1976 ; BOSQUED et al., 1977). La forme des ondes de choc a été déterminée en comparant les résultats de plusieurs satellites et des observations de radiosources (C. d'USTON et al., 1977 a, b ; V.V. TEMNY et al., 1977 ; O.L. VAISBERG et al., 1975 ; G.N. ZASTENKER et al., 1975). Si une onde de choc quasi-sphérique est observée pour les éruptions du 2 août 1972, les ondes de choc suivantes sont non sphériques (G.N. ZASTENKER et al., 1978).

Enfin la mesure des particules énergétiques (K.A. ANDERSON et al., 1978) par le couple de satellites ISEE A et B a démontré que les frontières de la magnétosphère (magnétopause, choc frontal) n'étaient pas stables mais se déplacent à des vitesses variables de quelques km/s à 90 km/s. Les traversées de l'onde de choc sont identifiées par de grandes augmentations des flux de protons de 2 à 30 KeV ; le résultat nouveau est qu'un flux stable d'électrons accompagne le flux de protons repartant vers l'espace interplanétaire. Les publications de ces résultats récents seront éditées en 1979.

4 – PROCESSUS MACROSCOPIQUES ET PHENOMENES PARTICULIERS

4.1 – Caractéristiques, identification et propagation des ondes, localisation des sources

Dans le domaine des perturbations magnétiques de fréquence quasi nulle l'étude des caractéristiques équatoriales des débuts brusques d'orages magnétiques, d'abord effectuée (J. ROQUET, 1975) à partir des données d'Addis-Abéba et de Bangui (1958 à 1972), a été développée (J. ROQUET, 1976) en utilisant les données des 9 stations de la chaîne méridienne Tamanrasset – Binza.

L'enregistrement au sol des variations géomagnétiques UBF (Pc et Pi) a été poursuivi dans les stations de Chambon-la-Forêt et de Garchy (France), ainsi qu'à Addis-Abéba (Ethiopie), accompagné d'interprétations théoriques relatives au rayonnement de sources de pulsation dans un modèle simple de magnétosphère (M. SIX, 1975). Par ailleurs, on a mis en évidence une dérive du point d'émergence des Pc 1 dans l'ionosphère, en liaison avec la dérive des particules sources (F. GLANGEAUD et LACOUME, 1976 ; F. GLANGEAUD et al., 1978). Enfin, la diffusion horizontale de ces ondes à partir de leur ligne de force de piégeage a été expliquée en terme de propagation guidée dans des conduits horizontaux, en utilisant la méthode "full-wave" (C. ALTMAN et FIJALKOW, 1978).

Toujours dans la gamme UBF, des pulsations ont été observées à bord des satellites GEOS, avec mesure de leur polarisation et parfois comparaison avec les enregistrements au sol (S. PERRAUT et al., 1978 b ; R. GENDRIN et al., 1978).

Dans le domaine TBF des sifflements reçus par différents satellites au-dessus de l'Europe, entre 300 et 2000 km d'altitude, ont été étudiés (M. TIXIER, 1976 ; M. TIXIER et CHARCOSSET, 1978). Leurs caractéristiques peuvent s'expliquer par divers modes de propagation des ondes TBF dans la magnétosphère : modes non guidé et quasi transverse aux basses latitudes ($L < 2$), modes guidé et partiellement guidé aux moyennes latitudes ($1,5 < L < 3$). Par ailleurs, les mesures d'ondes TBF artificielles effectuées par le satellite FR1, groupées et organisées en fonction de différents paramètres géophysiques, ont montré l'étroite relation existante entre la direction de propagation de l'onde et certaines caractéristiques à grande échelle de l'ionosphère telles que ses variations en longitude et heure locale (L. CAIRO et CERISIER, 1976 ; J.C. CERISIER, 1977).

A bord des satellites GEOS, on a mis en évidence différents types d'ondes électromagnétiques TBF (N. CORNILLEAU-WEHRLIN et al., 1978 a) et les relations qu'elles représentent avec les ondes similaires observées simultanément ou non au sol en un point conjugué (N. CORNILLEAU-WEHRLIN et al., 1978 b). On a également étudié la réception d'un émetteur TBF de grande puissance situé aux Etats-Unis (N. CORNILLEAU-WEHRLIN et al., 1978 c).

Toujours à bord de GEOS, et dans le domaine de fréquences supérieures à la gyrofréquence électronique locale, on a identifié les principales émissions naturelles électrostatiques : $(n + 1/2)f_{ce}$, f_{pe} , f_q ... (P.J. CHRISTIANSEN et al., 1978 a, b).

Enfin des observations d'ondes naturelles ont été effectuées à bord du satellite ISEE dans le vent solaire, en relation avec la fréquence de plasma locale, résultats récents qui seront édités en 1979.

4.2 – Interactions résonnantes ondes-particules

Un article de synthèse sur les observations et les théories des interactions (linéaire et non linéaire) dans le domaine des ondes TBF a été publié (R. GENDRIN, 1975 a).

Dans le domaine des interactions électromagnétiques (instabilités cyclotroniques), on a poursuivi l'étude du rôle joué par le plasma froid dans l'amplification des ondes. On a montré

que les régions préférentielles d'interactions entre protons et ondes UBF n'étaient pas toujours localisées sur le bord interne de la plasmopause, mais que dans de nombreux cas, les émissions pouvaient prendre naissance à des valeurs de L élevées (R. GENDRIN, 1975 b ; S. PERRAUT et al., 1976).

Les ondes électrostatiques engendrées au voisinage des multiples demi-entiers de la gyrofréquence électronique ont également été étudiées (M. ASHOUR-ABDALLA, 1975 ; M. ASHOUR-ABDALLA et al., 1975). Pour des fonctions de distribution particulières des électrons chauds, il a été possible de calculer les fréquence et nombre d'ondes des modes les plus instables en fonction des rapports de densité et de température des plasmas "chaud" et "froid" (M. ASHOUR-ABDALLA et KENNEL, 1975, 1976 a et b).

La phase non linéaire des interactions a été étudiée principalement dans le cas de l'interaction d'une distribution d'électrons avec une onde monochromatique intense se propageant dans le mode des sifflements. On a appliqué un formalisme mis au point antérieurement et obtenu une théorie analytique complète de la génération des ondes TBF déclenchées (A. ROUX, 1975 ; A. ROUX et PELLAT, 1976, 1978).

4.3 - Instabilités ionosphériques et courants alignés

Les instabilités de plasma à deux faisceaux et en champs croisés engendrées dans l'électrojet équatorial ont été étudiées au Tchad et en Ethiopie (C. HANUISE et CROCHET, 1977 et 1978).

L'étude théorique des irrégularités de la couche E de l'ionosphère équatoriale s'est poursuivie, du point de vue des phénomènes non-linéaires (A. ROGISTER et JAMIN, 1975) et de la convection en milieu faiblement inhomogène en faisant ressortir l'influence prépondérante de la composante de vitesse de groupe des ondes, parallèle au champ magnétique (E. JAMIN et KENNEL, 1976).

Dans la couche E, à la frontière entre la calotte polaire et l'anneau auroral, on a mis en évidence des instabilités associées à des fluctuations de densité de forte intensité ($\sim 10\%$) mesurées in-situ au cours de la campagne IPOCAMP 1 (C. BEGHIN et al., 1976) suscitant leur étude dans le cadre de deux autres campagnes (1976 et 1979).

Dans la couche F de moyenne latitude des instabilités associées à des fluctuations de densité de faible intensité ($< 1\%$) ont été mises en évidence in-situ au cours des campagnes EIDI (B. HIGEL, 1975).

Dans la magnétosphère enfin, des fluctuations de densité ($\geq 150 - 300$ m) ont été mises en évidence dans les zones de transition : plasmopause et îlots de plasma détachés (B. HIGEL, 1978 b).

Une étude théorique sur la fonction de distribution des vitesses des électrons dans un courant aligné a montré qu'elle peut s'écarter très significativement de la forme couramment admise d'une maxwellienne déplacée (N. SINGH, 1978).

4.4 - Processus déclenchés artificiellement

Dans la basse ionosphère, les ondes acoustiques engendrées par explosions nucléaires ont été étudiées et un modèle précis d'excitation et de propagation de ces ondes a été élaboré (P. BROCHE, 1977).

Dans un autre domaine une expérience d'interaction onde-onde dans l'ionosphère à partir du sondeur à diffusion incohérente de Saint-Santin a montré que les effets non linéaires pouvaient être utilisés à des fins de diagnostic du plasma ionosphérique : densité et vitesse électroniques du plasma froid (J. LAVERGNAT et al., 1977).

Amorcée avec l'expérience ZARNITZA (F. CAMBOU et al., 1975 a), la participation des équipes françaises aux expériences actives d'injection de faisceaux de particules dans la

magnétosphère s'est poursuivie avec l'expérience ARAKS. Deux tirs de fusée ont eu lieu desus les îles Kerguelen. L'un dirigé vers le nord magnétique où l'accent était mis dans les mesures ondes, l'autre dirigé vers l'est magnétique dont l'objectif était plus particulièrement l'étude des particules avec comme principale retombée la détermination exacte du point géomagnétique conjugué, point miroir des particules. Par ailleurs, il s'est avéré que le problème de la dynamique d'un faisceau d'électrons était un problème complexe dont l'incidence sur les retombées géophysiques des telles expériences était fondamentale. Des résultats nouveaux sur l'influence de la neutralisation du canon à électrons ont été obtenus (F. CAMBOU et al., 1978). En ce qui concerne les ondes déclenchées, on a fait une analyse détaillée des processus d'émission cohérente ainsi que des instabilités en dimensions finies (J. LAVERGNAT et al., 1977 ; PELLAT et al., 1976).

BIBLIOGRAPHIE

- ALCAYDE D. (1975) - Structure et thermodynamique de la thermosphère à moyenne latitude. Thèse de Doctorat ès-Sciences Physiques. Toulouse.
- ALCAYDE D. et BAUER P. (1977) - Modélisation des concentrations d'oxygène atomique observées par diffusion incohérente. *Ann. Géophys.*, **33**, 305-320.
- ALCAYDE D., FONTANARI J. et AMAYENC P. (1977) - Bilan thermodynamique de la thermosphère à moyenne latitude. *Ann. Géophys.*, **33**, 289-303.
- ALCAYDE D., BAUER P., HEDIN A., SALAH J.E. (1978) - Compatibility of seasonal variations in mid-latitude thermospheric models at solar maximum and low geomagnetic activity. *J. Geophys. Res.*, **83**, 1141-1144.
- ALTMAN C. and FIJALKOW E. (1978) - Propagation of PCI micropulsations in horizontal ionospheric ducts. *Space Research XVIII*, Pergamon Press, 305-308.
- AMAYENC P., ALCAYDE D. and KOCKARTS G. (1975) - Solar EUV heating and dynamical processes in the mid-latitude thermosphere. *J. Geophys. Res.*, **80**, 2887-2891.
- AMAYENC P. (1975) - Mouvements thermosphériques de grande échelle - Etude par diffusion incohérente à moyenne latitude. Thèse d'Etat, Paris VI.
- ANDERSON K.A., LIN R.P., PARKS G.K., LIN C.S., REME H., BOSQUED J.M. and MARTEL F. (1978) - An experiment to Study Energetic Particle Fluxes In and Beyond the Earth's Outer Magnetosphere. *Geoscience Electronics, GE-16*, 213-216.
- ASHOUR-ABDALLA M. (1975) - Instability theory of electrostatic half-harmonic electron gyrofrequency waves in the magnetosphere : a review. *Ann. Geophys.*, **31**, 151-158.
- ASHOUR-ABDALLA M., CHANTEUR G. and PELLAT R. (1975) - A contribution to the theory of the electrostatic half-harmonic electron gyrofrequency waves in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.*, **80**, 2775-2782.
- ASHOUR-ABDALLA M. and KENNEL C.F. (1975) - VLF electrostatic waves in the magnetosphere, in *Physics of the Hot Plasma in the Magnetosphere*, ed. by B. Hultqvist and L. Stenflo, Plenum Pub. Co., New-York, 201-227.
- ASHOUR-ABDALLA M. and KENNEL C.F. (1976 a) - VLF electrostatic waves in the magnetosphere of Earth and Jupiter, in *The Scientific Satellite Programme during the IMS*, ed. by K. Knott and B. Battrik, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 305-325.
- ASHOUR-ABDALLA M. and KENNEL C.F. (1976 b) - Convective cold upper hybrid instabilities, in *Particles and Fields in the Magnetosphere*, ed. by B.M. McCormac, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, Holland, 181-196.
- BAUER P., WALDTEUFEL P., VIALLE C. (1974) - The french quadriratic incoherent scatter facility, *Radio Science*, **9**, 2.
- BAUER P. (1975) - Theory of waves incoherently scattered, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, **A 280**, 167-191.
- BAUER P., COLE K. and LEJEUNE G. (1976) - Field-aligned currents and their measurement by incoherent scatter technique, *Planet Space Sci.*, **24**, (5), 479-485.
- BEGHIN C., BERTHELIER J.J., COVINHES J., DEBRIE R., HAMELIN M., RENARD C., GONFALONE A., IVANOV Y.F., POKHUNKOV A.A., TESLENKO V.P. and TULINOV G.F. (1976) - Electron temperature and density profiles and fluctuations of electron density obtained by a rocket experiment in the polar ionosphere. *Space Research XVI*, Akademie-Verlag, Berlin, 453-456.
- BENSON F., BAUER P., BRACE L.H., CARLSON H.C., HAGEN J., HANSON W.B., HOEGY W.R., TORR M.R., WAND R.H., WICKWAR V.B. (1977) - Electron and ion temperatures. A comparison of ground based incoherent scatter and AEC satellite measurements. *J. Geophys. Res.* **82**, 36.
- BERNARD R. (1978) - Etude de la variabilité des marées atmosphériques - Mesure par radar météorologique et sondeur à diffusion incohérente. Thèse de Doctorat d'Etat, Paris VI.

- BERTEL L., BERTIN F. et TESTUD J. (1976) – De la mesure du contenu électronique intégré appliqué à l'observation des ondes de moyenne échelle. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 37, (3), 261-270.
- BERTHELIER A. (1976) – Influence of the polarity of the interplanetary magnetic field on the annual and diurnal variations of magnetic activity. *J. Geophys. Res.*, 81, 25, 4546-4551.
- BERTHOMIER C. (1975) – Sur une méthode d'analyse de signaux. *Ann. Géophys.*, 31, 239-252.
- BERTHOMIER C. et CORNILLEAU-WEHRLIN N. (1975) – Publication de la notion de signal analytique à la détermination de l'amplitude et de la fréquence instantanée d'un signal. *Ann. Télécom.* 30, 224-230.
- BERTHOMIER C. (1976) – Représentation d'un signal dans un plan fréquence instantané-temps. Thèse d'Etat, Paris VI.
- BERTIN F., TESTUD J. and KERSLEY L. (1975) – Medium scale gravity waves in the ionospheric F-region and their possible origin in weather disturbance. *Planet Space Sci.*, 23 (3), 493-507.
- BERTIN F., HUGUES K.A. and KERSLEY L. (1977) – Atmospheric waves induced by an eclipse. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 39 (4), 457-461.
- BERTIN F., TESTUD J. (nov. 1977) – Jet stream et ondes de gravité, une étude expérimentale. *La météorologie*.
- BITOUN J., FLEURY L. and HIGEL B. (1975) – Theoretical study of gyroresonances with application to rocket experiment... *Radio Sci.*, 10, 875-889.
- BLANC M. et PETIT M. (1978) – Un "chat" bien adapté au Grand Nord. *La Recherche*, 90, 576-579.
- BLANC M. and AMAYENC P. (1976) – Contribution of incoherent scatter radar to the study of middle and low latitude electric fields. in *Atmospheric Physics from Spacelab*, Edit. Burger (Reidel, Netherlands), 61-90.
- BLANC M., BAUER P. and LEJEUNE G. (1976) – Field-aligned currents measured by incoherent scatter on board of Spacelab, in *Atmospheric Physics from Spacelab*, Edit. Burger (Reidel, Netherlands), 281-296.
- BLANC M., AMAYENC P., BAUER P., TAIEB C. (1977) – Electric fields induced drifts from the french incoherent scatter facility. *J. Geophys. Res.*, 82, 87.
- BLANC M. (1978) – Mid-latitude convection electric fields and their relation to ring current development. *Geophys. Res. Lett.* 5/3, 203-206.
- BOSQUED J.M., ZERTZALOV A., d'USTON C., VAISBERG O.L. (1977) – Study of alpha component dynamics in the solar wind using the Prognos satellite. *Solar Physics*, 51, 231.
- BOURDILLON A., NICOLLET M. (1977) – Observation d'une P.I.I. par la propagation directe 1F₂. *Ann. Géophys.*, 33 (3), 321-328.
- BOURDILLON A., DELLOUE J., GARNIER M., NICOLLET M. (1977) – Etudes radio-électriques de la propagation des perturbations ionosphériques itinérantes de moyenne période entre Tromsø et Valensole. *Ann. de Géophys.*, 33 (3), 269-280.
- BROCHE P., CROCHET M. (1975) – Génération of atmospheric gravity waves by the 30 June 73 Solar eclipse in Africa. *J.A.T.P.*, 37, 1371-1374.
- BROCHE P., CROCHET M. and DE MAISTRE J.C. (1976) – Gravity waves generated by the 30 June 1973 Solar eclipse in Africa. *J.A.T.P.* 38, 1361-1364.
- BROCHE P. (1977) – Propagation des ondes acoustico-gravitationnelles excitées par des explosions. *Ann. Géophys.*, 33, (3), 281-288.
- BROCHE P., CROCHET M. and GAGNEPAIN J. (1978) – Neutral winds and phase velocity of the instabilities in the equatorial electrojet. *J.G.R.*, 83, 1145-1146.
- CAIRO L. et CERISIER J.C. (1976) – Experimental study of ionospheric electron density gradients and their effect on VLF propagation. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 38, 27-36.
- CAMBOU F., DOKOUKINE V.S., ICHENKO V.N., MANAGADZE G.G., MIGULIN V.V., NAZARENKO O.K., NEXMY-ANOVITCH A.T., PYATSI A.Kh., SAGDEEV R.Z., ZHULIN I.A. (1975 a) – The ZARNITZA rocket experiment on electron injection. *Space Research XV*, Akademie Verlag, Berlin, 491-500.
- CAMBOU F., VAISBERG O.L., ESPAGNE H., TEMNY V.V., d'USTON D., ZASTENKER G.N. (1975 b) – Characteristics of interplanetary plasma near the Earth observed during the solar events of August 1972. *Space Research XV*, Akademie Verlag, Berlin, 461-469.
- CAMBOU F., LAVERGNAT J., MIGULIN V.V., MOROZOV A.I., PATON B.E., PELLAT R., PYATSI A.Kh., REME H., SAGDEEV R.Z., SHELDON W.R. and ZHULIN I.A. (1978) – ARAKS – Controlled or puzzling experiment. *Nature* 271, 723-726.
- CERISIER J.C. (1977) – Comments on "The theory of VLF Doppler signatures and their relation to magnetospheric density structure" by B.C. EDGAR. *J. Geophys. Res.*, 82 (22), 3337-3338.
- CHANTEUR G., GENDRIN R. and PERAUT S. (1977) – Experimental study of high-energy electron drift echoes observed on board ATS-5. *J. Geophys. Res.*, 82, 5231-5242.
- CHANTEUR G., GENDRIN R. and PERAUT S. (1978) – High-energy drift echoes at the geostationary orbit, *J. Atmosph. Terr. Phys.* 40, 367-371.

- CHRISTIANSEN P.J., GOUGH M.P., MARTELLI G., BLOCH J.J., CORNILLEAU-WEHRLIN N., ETCHETO J., GENDRIN R., JONES D., BEGHIN C., DECREAU P. (1978 a) – GEOS-1 : Identification of natural magnetospheric emissions. *Nature*, 272, 682-686.
- CHRISTIANSEN P.J., GOUGH M.P., MARTELLI G., BLOCH J.J., CORNILLEAU-WEHRLIN N., ETCHETO J., GENDRIN R., BEGHIN C., DECREAU P., JONES D. (1978 b) – GEOS-1 : Observations of electrostatic waves and their relationships with plasma parameters. *Space Sci. Rev.*, 22, 383-400.
- CORCUFF P. (1977) – Méthodes d'analyse des sifflements électroniques : 1. Application à des sifflements théoriques. *Ann. Géophys.*, 33, 443.
- CORCUFF P., CORCUFF Y. et TARCSAI G. (1977) – Méthodes d'analyse des sifflements électroniques : 2. Application à des sifflements observés au sol. *Ann. Geophys.*, 33, 455.
- CORCUFF P. (1978) – "Contribution à l'étude de la convection magnétosphérique et de la dynamique de la plasmasphère (en particulier, au moyen de données de satellites et de sifflements radioélectriques)", Thèse d'Etat, Poitiers.
- CORCUFF Y. (1975) – Probing the plasmopause by whistlers. *Ann. Geophys.*, 21, 53.
- CORNILLEAU-WEHRLIN N., ETCHETO J. and BURTON R.K. (1976) – Detailed analysis of magnetospheric ELF chorus : preliminary results. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 38, 1201-1210.
- CORNILLEAU-WEHRLIN N., GENDRIN R., LEFEUVRE F., BAHNSEN A., UNGSTRUP E., GRARD R.J.L., JONES D. and GIBBONS W. (1978 a) – VLF electromagnetic waves observed on board GEOS-1. *Space Sci. Rev.*, 22, 371-382.
- CORNILLEAU-WEHRLIN N., GENDRIN R. and TIXIER M. (1978 b) – VLF waves : conjugated ground-satellite relationships. *Space Sci. Rev.*, 22, 409-432.
- CORNILLEAU-WEHRLIN N., GENDRIN R. and PEREZ R. (1978 c) – Reception of the NKL (Jim Creek) transmitter on board GEOS-1. *Space Sci. Rev.*, 22, 443-452.
- COWLEY S.W.H. and ASHOUR-ABDALLA M. (1975) – Adiabatic plasma convection in a dipole field : variation of plasma bulk parameters with L. *Planet Space Sci.*, 23, 1527-1549.
- COWLEY S.W.H. and ASHOUR-ABDALLA M. (1976 a) – Adiabatic plasma convection in a dipole field : electron forbidden zone effects for a simple electric field model. *Planet Space Sci.*, 24, 805-819.
- COWLEY S.W.H. and ASHOUR-ABDALLA M. (1976 b) – Adiabatic plasma convection in a dipole field : proton forbidden zone effects for a simple electric field model. *Planet Space Sci.*, 24, 821-833.
- COWLEY S.W.H. and ASHOUR-ABDALLA M. (1976 c) – The structure of the outer radiation zone in a simple model of the convecting magnetosphere. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 38, 1047-1053.
- CROCHET M., POMAN C. and HANUISE C. (1976) – Radar profiles of the equatorial electrojet. *Geophys. Research Letters*, 3, 673-676.
- CROCHET M. (1977) – Radar studies of longitudinal differences in the equatorial electrojet : a review. *J.A.T.P.*, 39, 1103-1117.
- DEBRIE R., ARNAL Y. and ILLIANO J.M. (1976) – Measurement of low electronic temperatures in unmagnetized plasmas. *Phys. Lett.*, 56 A, 95-96.
- DEBRIE R., DECREAU P.M.E. and ARNAL Y. (1977) – Measurement of low electronic temperature in weakly magnetized plasma. *Phys. Lett.*, 61 A, 457-458.
- DECREAU P.M.E. et DEBRIE R. (1977) – Diagnostics dans les plasmas de densité et température électroniques faibles par mesure d'impédance mutuelle (sonde quadripolaire) et d'impédance propre (dipôle double sphère). *Rev. Phys. Appl.* 12, 1043-1047.
- DECREAU P.M.E., BEGHIN C. and PARROT M. (1978 a) – Electron density and temperature as measured by the mutual impedance experiment on board GEOS 1. *Space Sci. Rev.*, 22, 581-596.
- DECREAU P.M.E., ETCHETO J., KNOTT K., PEDERSEN A., WRENN G.L. and YOUNG D.T. (1978 b) – Multi-experiment determination of plasma density and temperature. *Space Sci. Rev.*, 22, 633-646.
- DEMARS C., BERTHOMIER C. and GOUSTARD M. (1978) – A few results about the ontogenesis of the "great call" of gibbons (Hylobates Concolor), in *Recent Advances in Primatology*, 1, Academic Press, London, 827-830.
- DURNEY A.C. (1978) – The international Sun-Earth Explorer (ISEE) Mission, ESA/ASE, *Bulletin n° 12*, 12-23.
- ERCHOVA M., ZOZIMOVA M., CRASNIER J., BLANC E., SAUVAUD J.A. (1977) – Mesure par spectrométrie de masse effectuée à bord du satellite OREOL2. *Kosmich. Issled (La Recherche Spatiale, en russe)*, 38, 279-286.
- ETCHETO J. (1976) – "Diagnostics of spatial plasmas with a relaxation sounder", in "The scientific satellite program during the IMS", ed. by K. Knott and B. Battrock. D. Reidel Pub. Co., Dordrecht. Holland.
- ETCHETO J. et PETIT M. (1977) – Une nouvelle méthode de caractérisation du plasma magnétosphérique. *C.R. Acad. Sci. série B*, 285, 329.
- ETCHETO J. and BLOCH J.J. (1978) – Plasma density measurement from the GEOS 1 relaxation sounder. *Space Sci. Rev.*, 22, 597-610.
- GAGNEPAIN J., CROCHET M., RICHMOND A. (1976) – Theory of longitudinal variations in the equatorial electrojet. *J.A.T.P.*, 38, 279-286.

- GAGNEPAIN J., RICHMOND A.D., CROCHET M. (1977) – Comparison of equatorial electrojet models, *J.A.T.P.*, 39, 1119-1124.
- GALPERIN Yu.I., KOVRAZHKN R.A., PONOMAREV Yu.I., CRASNIER J., SAUVAUD J.A. (1976 a) – Pitch angle distributions of auroral protons, *Ann. Geophys.*, 32, 109-115.
- GALPERIN Yu.I., JORJIO N.V., KOVRAZHKN R.A., CAMBOU F., SAUVAUD J.A., CRASNIER J. (1976 b) – On the origin of auroral protons at the day-side auroral oval, *Ann. Geophys.*, 32 (2), 117-129.
- GALPERIN Yu.I., CRASNIER J., LISSAKOV Y.V., NIKOLAENKO L.M., SINITSIN V.M., SAUVAUD J.A., KHALIPOV V.L. (1977) – Zone aurorale diffuse : 1°, Modèle de la frontière équatoriale de la zone diffuse des précipitations des électrons auroraux dans le quadrant de soir, avant minuit, *Kosmich. Issl.* (Recherche Spatiale, en russe), XV, 421.
- GALPERIN Yu.I., GLADYSHEV V.A., JORJIO N.V., KOVRAZHKN R.A., CAMBOU F., SAUVAUD J.A., CRASNIER J. (1978) – Adiabatic acceleration in the plasmashet, *J. Geophys. Res.*, 83, 2567-2573.
- GENDRIN R. (1975 a) – Waves and wave-particle interactions in the magnetosphere : a review, *Space Sci. Rev.*, 18, 145-200
- GENDRIN R. (1975 b) – Is the plasmopause a preferential region for proton precipitation ?, *Ann. Geophys.*, 31, 127-136.
- GENDRIN R., PERRAUT S., FARGETTON H., GLANGEAUD F. and LACOUME J.L. (1978) – ULF waves ; conjugated ground-satellite relationships. *Space Sci. Rev.*, 22, 433-442.
- GLANGEAUD F. and LACOUME J.L. (1976) – Localization of PCI, *J.A.T.P.*, 38, 1147-1155.
- GLANGEAUD F., KNOB A., LACOUME J.L., TROITSKAYA V., KRILOV S. and GROBINE W. (1978) – Movement and distribution of the energetic particles which generate PCI, *J.A.T.P.*, 40, 379-387.
- HAMELIN M. and BEGHIN C. (1976) – Electromagnetic waves in a multi-component plasma near the lower hybrid frequency, *J. Plasma Physics*, 15, (1), 115-131.
- HAMELIN M. (1978) – Contribution à l'étude des ondes électrostatiques et électromagnétiques au voisinage de la fréquence hybride basse dans le plasma ionosphérique" Thèse d'Etat, Orléans.
- HANUISE C. and CROCHET M. (1977) – Multifrequency HF radar studies of plasma instabilities in Africa, *J.A.T.P.*, 39, 1097-1101.
- HANUISE C. and CROCHET M. (1978) – Oblique HF radar studies of plasma instabilities in the equatorial electrojet in Africa, *J.A.T.P.*, 40, 49-59.
- HARVEY C.C., ETCHETO J., DE JAVEL Y., MANNING R., PETIT M. (1978) – The ISEE electron density experiment, *I.E.E.E., Trans. Geo. Sc. Electr., G.E.*, 231.
- HEDIN A., SALAH J.E., EVANS J.V., REBER C.A., NEWTON G.P., SPENCER N.W., KAYSER D.C., ALCAUDE D., BAUER P., COGGER L. and MC CLURE J.P. (1977) – A global thermospheric model based on mass spectrometer and incoherent scatter data - N2 density and temperature, *Jour. Geophys. Res.*, 82, 2139-2147.
- HEDIN A., BAUER P., MAYR H.G., CARIGNAN G.R., BRACE L.H., BRINTON H.C., PARKS A.D., PELZ D.T. (1977) – Observations of neutral composition and related ionospheric variations during a magnetic storm in February 1974, *J. Geophys. Res.*, 82, 3182.
- HERISCHI D.J. and LEGRAND J.P. (1976) – The intensity variations of solar and galactic cosmic rays with azimuthal angle in the polar region, *Planet Space Sci.*, 24, 281-285.
- HIGEL B. (1975) – Non stationnarités des signaux de résonance des plasmas ionosphérique et magnétosphérique, *Ann. Télécom.*, 30, 7-8, 239-246.
- HIGEL B. and de FERAUDY H. (1977) – Experimental and theoretical first approach to f_H plasma resonance from a relaxation sounding rocket experiment, *Radio Sci.*, 12, 879-889.
- HIGEL B. (1978 a) – Small scale irregularities of electron density in the F-region from f_N resonances observed by a rocket borne relaxation sounding experiment, *Radio Sci.*, 13, 5, 901-916.
- HIGEL B. (1978 b) – Small scale structure of magnetospheric electron density through online tracking of plasma resonances, *Space Sci. Rev.*, 22, 611-632.
- HOLEWORTH, BERTHELIER J.J., CULLERS D.K., FAHLESON U.V., FALTHAMMAR C.G., HUDSON M.K., JALONEN L., KELLEY M.C., KELLOG P.J., TANSKANEN P., TEMERIN M., MOZER F.S. (1977) – The large scale ionospheric electric field : its variation with magnetic activity and relation to terrestrial kilometric radiation, *J. Geophys. Res.*, 82, (19), 2735-2742.
- HOURI A. (1976) – "Contribution à l'étude des mécanismes intervenant dans les émissions naturelles TBF à partir d'un ensemble d'enregistrements au sol", Thèse de Doctorat d'Etat, Paris VI.
- JAMIN E. and KENNEL C.F. (1976) – Effects of parallel propagation on equatorial electrojet irregularities, *J. Geophys. Res.*, 81, 4612.
- KHALIPOV V.L., GALPERIN Yu.I., CRASNIER J., LISSAKOV Y.V., NIKOLAENKO L.M., SINITSINE V.M., SAUVAUD J.A. (1977) – Zone aurorale diffuse : 2° Formation et dynamique de la limite polaire de la principale chute de concentration ionosphérique subaurorale, *Kosmich. Issled* (Recherche Spatiale, en russe), XV, 708.
- KING J.W., SAMUEL J.C., THUILLIER G. (1975) – Accuracy of the CCIR F2 layer model at low and middle latitudes, *Electronics Letters*, 11, (16).
- KNOB A. et LACOUME J.L. (1977 a) – Etude de la précision de l'estimation de la densité spectrale de puissance croisée obtenue par transformation de Fourier de la fonction de corrélation, *Annales des Télécom.*, 32, 7-8, 248-256.

- KNOB A. et LACOUME J.L. (1977 b) – Etude des relations statistiques entre deux signaux temporels par analyse interspectrale, *Compte-rendus du GRETSI*, Nice, ed. by Zimmermann, (70-1) à (70-7).
- KNOTT K. (1975) – Payload of the GEOS Scientific Geostationary Satellite, *ESA/ASE Scientific and Technical Review*, 1 173-196.
- KODERA K. (1976) – “Analyse numérique de signaux géophysiques non-stationnaires”, Thèse d’Université, Paris VI.
- KODERA K., de VILLEDARY C. and GENDRIN R. (1976) – A new method for the analysis of non-stationary signals, *Phys. Earth Planet. Interiors*, 12, 142-150.
- KODERA K., GENDRIN R. and de VILLEDARY C. (1977) – Complex representation of a polarized signal and its application to the analysis of ULF waves, *J. Geophys. Res.*, 82, 1245-1255.
- KODERA K., GENDRIN R. and de VILLEDARY C. (1978) – Analysis of time-varying signals with small BT values, *IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing*, ASSP-26, 64-76.
- LAVERGNAT J., BERTHELIER J.J., SYLVAIN M., VASSAL J. (1976) – Discussion critique de l’application des mesures d’absorption par riomètre à l’étude de l’ionosphère, *Ann. de Géophys.*, 32 (4), 391-400.
- LAVERGNAT J., BAUER P., DELAHAYE J.Y., NEY R. (1977) – Non linear sounding of the ionospheric plasma, *Geophys. Res. Lett.*, 4, (10), 417-420.
- LAVERGNAT J., LEQUEAU D., PELLAT R., ROUX A. (1977) – Instabilités non linéaires rayonnées dans un plasma par un faisceau d’électrons, *C.R. Acad. Sc., B*, 284, 417-419.
- LEFEUVRE F. (1977) – “Analyse de champs d’ondes électromagnétiques aléatoires observés dans la magnétosphère, à partir de la mesure simultanée de leurs six composantes”, Université d’Orléans, Thèse de Doctorat d’Etat.
- LEJEUNE G. and KOFMAN W. (1977) – Photoelectron distribution determination from plasma line intensity measurement obtained at Nançay (France), *Planet and Space Sci.*, 25, 123-133.
- MALINGRE M. et STOREY O. (1977) – Influence du rayon des électrodes sur l’impédance de transfert d’une sonde quadri-polaire. *C.R. Acad. Sci., Paris*, 284, Série B, 519-522.
- MAZAUDIER C. and BAUER P. (1976) – Nocturnal disequilibrium of the F2 region ionosphere at Middle latitudes, *J. Geophys. Res.*, 81, 3447-3451.
- MICHAU J.L. (1977) – Control system for maintaining a Langmuir probe at plasma potential, *Rev. Sci. Instr.*, 48 (9), 1174-1178.
- MICHEL E., BEGHIN C., GONFALONE A. et IVANOV I.F. (1975) – Mesures de densité et de température électroniques sur l’ionosphère polaire par l’étude du cône de résonance, *Ann. Géophys.* 31, fasc. 4, 463-471.
- MICHEL E. (1976) – Analytical derivation of the HF electrostatic potential created by an oscillating point source in a streaming water-bag plasma, *J. Plasma Phys.*, 15, 3, 395-408.
- NICOLLET M. (1976) – Onde de gravité et vents thermosphériques, *Ann., Géophys.*, 32 (4), 457-466.
- PELLAT R., LAVERGNAT J. et SAINT-MARC A. (1976) – Instabilités rayonnées dans un plasma par un faisceau d’électrons, *C.R. Acad. Sci.*, 282, 201.
- PERRAUT S., GENDRIN R. and ROUX A. (1976) – Amplification of ion-cyclotron waves for various typical radial profiles of magnetospheric parameters, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 38, 1191-1199.
- PERRAUT S., GENDRIN R., de VILLEDARY C., FOUASSIER D., LAVERGNAT J., MEUNIER J.P., MORLET B., BITTERLY J., CORCUFF Y., TIXIER M., GLANGEAUD F., FEHRENBACH M., WEILL G. (1978 a) – “French mobile station for recording geophysical data : description ; initial results of the conjugated campaign in association with GEOS-1” in “*European sounding rockets, balloons and related research, with emphasis on experiments at high latitudes*” ESA SP/135, ed. B. Battrock and M. Halvorsen, 97-108.
- PERRAUT S., GENDRIN R., ROBERT P., ROUX A. and de VILLEDARY C. (1978 b) – ULF waves observed with magnetic and electric sensors on GEOS-1, *Space Sci. Rev.*, 22, 347-370.
- POTTELETTE R., ROOY B. and FIALA V. (1975) – Theory of the mutual impedance of two small dipoles in a warm isotropic plasma, *J. Plasma Phys.*, 14, 209-243.
- POTTELETTE R., CHAULIAGUET C. and STOREY O. (1977) – Theoretical cross-spectrum of the microfield measured by two small dipoles in a warm isotropic plasma, *J. Plasma Phys.*, 17, 201-231.
- ROGISTER A. and JAMIN E. (1975) – Two dimensional non linear processes associated with Type 1 irregularities in the equatorial electrojet, *J. Geophys. Res.*, 80, 1820.
- ROQUET J. (1975) – Sur l’amplification des débuts brusques d’orages magnétiques à Addis-Abéba, *Bull. Geophys. Obs.*, Addis-Abéba, 15, 91-98.
- ROQUET J. (1976) – “Débuts brusques d’orages magnétiques en région équatoriale”, *Comm. 5° Symp. Inter. Aeron. Equat. Townsville (Australie)*, Conf. Digest 8-7, 1-6.
- ROUX A. (1975) – Piégeage des particules dans une onde monochromatique d’amplitude finie. Application à l’interprétation de phénomènes magnétosphériques et d’expériences en laboratoire”, Thèse d’Etat, Paris.
- ROUX A. and PELLAT R. (1976) – “A study of triggered emissions”, in “*Magnetospheric Particles and Fields*”, ed. par B.M. Mc Cormac, D. Reidel Pub. Co., Dordrecht, 209-221.

- ROUX A. and PELLAT R. (1978) - A theory of triggered emissions, *J. Geophys. Res.*, *83*, 1433-1441.
- ROUX D. (1977) - Perturbation du profil de l'ionosphère supérieure antarctique en été local au niveau du cornet polaire, *C.R. Acad. Sci.*, *285*, série B, 183-186.
- SALAH J.I., EVANS J.V., ALCAYDE D., BAUER P. (1976) - Comparison of exospheric temperatures at Millstone Hill and Saint-Santin, *Ann. Geophys.*, *32*, 257-266.
- SINGH N. (1978) - Electron distribution function in a plasma with a constant electric field, *Plasma Phys.*, *20*, 927-941.
- SIX M. (1975) - Périodes de résonance des lignes de force-dans le mode guidé, pour un modèle simple de magnétosphère, *C.R. Acad. Sci.*, *280*, Série B, 21-24.
- SOLOMON J. (1975) - "Drift of particles and waves-particle interactions", in *"The Magnetospheres of the Earth and Jupiter"*, ed. par V. Formisano, D. Reidel Pub Co., 153-159.
- SOLOMON J. (1976) - On the azimuthal drift of substorm injected protons, *J. Geophys. Res.*, *81*, 3452-3454.
- SOLOMON J. (1977) - "Injections de particules énergétiques dans la magnétosphère ; conséquences sur les déformations des fonctions de distribution et sur les interactions de gyrorésonance", Thèse d'Etat, Paris.
- SOLOMON J. and PELLAT R. (1978) - Convection and waves-particle interactions, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, *40*, 373-378.
- SROCZYNSKA M. (1976) - Non sphericity of the matter flow in the solar wind, *Ann. Geophys.*, *32*, 376.
- STOREY O. and MALINGRE M. (1976) - "A proposed method for the direct measurement of enhanced resistivity", in *"European Programs on Sounding Rocket and Balloon Research in the auroral zone"*, ASE, Rapport ESA-SP-115, 387-409.
- SYLVAIN M., BERTHELIER J.J., LAVERGNAT J., VASSAL J. (1978) - F. lacuna events in Terre Adélie and their relationship with the state of the ionosphere, *Planet Space Sci.*, *26*, 785-789.
- S-300 EXPERIMENTERS (1978) - Measurements of electric and magnetic wave fields and of cold plasma parameters on board GEOS-1. Preliminary results. *Planet Space Sc.*, *26*.
- TAIEB C., SCIALOM G. and KOCKARTS G. (1975) - Daytime valley in the F1 region observed by incoherent scatter, *Planet Space Sci.*, *23*, (3), 523-531.
- TEMNY V.V., ZASTENKER G.N., EROSHENKO E.G., d'USTON C., BOSQUED J.M., VAISBERG O.L., CAMBOU F. (1977) - "Caractéristiques énergétiques et structure du plasma et du champ magnétique derrière l'onde de choc liée à l'éruption solaire du 4 août 1972", *Kosmich. Issled.*, *XV*, 212.
- TESTUD J., AMAYENC P., BLANC M. (1975) - Middle and low-latitude effects of auroral disturbances from incoherent scatter, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, *37*, 989-1010.
- THULLIER G., KING J.W., SLATER A.J. (1976) - An explanation of the longitudinal variation of the O¹D-630 nm tropical nightglow intensity, *J. of Atm and Terr. Physics*, *38*, 155-176.
- TIXIER M. (1976) - "Contribution à l'étude de la propagation des ondes radioélectriques de très basse fréquence rayonnées par l'éclair", Thèse d'Etat, Poitiers.
- TIXIER M. and CHARCOSSET G. (1978) - Partly ducted whistlers over Europe, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, *40*, 601.
- USTON (d') C., TEMNY V.V., ZASTENKER G.N., BOSQUED J.M., EROSHENKO E.G., VAISBERG O.L. and CAMBOU F. (1977 a) - Energetic properties of interplanetary plasma at the Earth's orbit following the August 4, 1972 flare, *Solar Physics*, *51*, 217.
- USTON (d') C., ZASTENKER G.N., TEMNY V.V., BOSQUED J.M. (1977 b) - "The shape and the energy of the interplanetary shock waves associated to August 1972, solar flares", Contributed papers to the study of travelling interplanetary phenomena, 1977, Air Force Geophysics Laboratory Report n° AFGL-TR-77-0309, 151-160.
- VAISBERG O.L., ZASTENKER G.N., CAMBOU F., TEMNY V.V., KHOKHLOV M.Z. (1975) - Propagation for solar flare generated shock waves on August 1972 by solar wind measurements, *Kosmich. Issled.*, *13*, 1039, (en russe).
- VASSAL J., BERTHELIER J.J., LAVERGNAT J. and SYLVAIN M. (1976) - A study of ionospheric absorption events at very high latitudes. *J. Atmosph. Terr. Phys.*, *38*, 1289-1297.
- VIDAL-MADJAR D., KOFMAN W. et LEJEUNE G. (1975) - Mesures de la raie de plasma par diffusion incohérente à Nançay et premiers résultats morphologiques, *Ann. Géophys.*, *31*, (2), 227-234.
- VIDAL-MADJAR D. (1978 a) - Gravity wave in the lower thermosphere with the french incoherent scatter facility, *J. of Atmosph. and Terr. Phys.*, *40*, 685-689.
- VIDAL-MADJAR D. (1978 b) - Theoretical study of propagation of short periodic gravity waves within the thermosphere. Application to the plasma line measurement and to Faraday rotation experiment, *J. of Atmosph. Terr. Phys.* *40*, 1-12.
- VIDAL-MADJAR D. (1978 c) - "Les ondes de gravité de moyenne échelle dans le thermosphère : Etude expérimentale et théorie de leur propagation et de leur production par le jet stream de la tropopause", Thèse de Doctorat d'Etat, Paris VI.
- VIDAL-MADJAR D., BERTIN F. et TESTUD J. (1978) - Sur le jet stream de la tropopause en tant que source des ondes de gravité observées dans la thermosphère, *Ann. Géophys.*, *34*, 1-7.
- VILLEDARY (de) C., KODERA K. et GENDRIN R. (1977) - "Représentation complexe de signaux polarisés à large bande ; application à l'analyse de signaux géophysiques naturels", GRETSI, ed. par Zimmerman, Nice, 1-5.

- WRIGHT J.W., AMAYENC P. and VASSEUR G. (1976) – The interpretation of ionospheric radio drift measurements IX Direct comparison between field-aligned ion drifts by incoherent scatter and kitesonde measurements, *J. Atmosph. Terr. Phys.*, 38, 731-738.
- ZASTENKER G.N., VAISBERG O.L., CAMBOU F., TEMNY V.V., KHOKHLOV N.Z. (1975) – Propagation of solar flare generated shock waves on August 1972 by solar wind measurements, *Kosmich. Issled.* 13, 859. (en russe).
- ZASTENKER G.N., BOSQUED J.M., DJATCHKOV A.V., d'USTON C., ROMANOV S.A., TEMNY V.V., VAISBERG O.L. (1978) – "Solar wind parameters during STIP intervals I and II according to VENERA 9 and VENERA 10 measurements", Contributed papers to the study of travelling interplanetary phenomena/1977, Air Force Geophysics Laboratory Report n° AFGL-TR-77-0309, 151-160.
- ZASTENKER G.N., TEMNY V.V., d'USTON C., BOSQUED J.M. (1978) – The shape and energy of the shock waves from solar flares on August 2, 4 and 7, 1972, *J. Geophys. Res.*, 83, 1035-1041.
- ZERTZALOV A., BOSQUED J.M., d'USTON C., OMETCHENKO A., VAISBERG O.L. (1976) – La mesure de la composante alpha du vent solaire à partir du satellite Prognoz, *Kosmich. Issled. (La Recherche Spatiale)*, 14, 463.
- ZHULIN I.A., KOPAIEV I.M., KOREPANOV V.E., LAZUTIN L.L., PUDOVKIN M.I., TSVETKOV A.V., BOUTONNET A., TREILHOU J.P. (1978) – On some results of the balloon stratospheric electric field during the SAMBO-1 experiment, *Ann. Geophys.*, 3, 181.

IV – OBSERVATIONS, INSTRUMENTS ET INDICES –

J. CHRISTOPHE-GLAUME

I.A.P.

I – OBSERVATOIRES MAGNETIQUES –

Excepté le transfert de la station permanente d'enregistrement des variations magnétiques rapides de Chambon-la-Forêt à Garchy (site moins perturbé par les parasites d'origine industrielle), le fonctionnement des divers observatoires magnétiques s'est poursuivi sans modifications.

La liste de ces observatoires, la région où ils sont implantés et l'organisme qui en assure le fonctionnement est donnée ci-dessous :

GARCHY	France	IPGP
M'BOUR	Sénégal	ORSTOM
BANGUI	République Centrafricaine	ORSTOM
PAMATAI	Tahiti	ORSTOM
PORT aux FRANCAIS	Kerguelen	TAAF
DUMONT D'URVILLE	Terre Adélie	TAAF
PORT ALFRED	Crozet	TAAF

liste à laquelle il faut ajouter la station de l'Observatoire d'Addis Abeba travaillant en collaboration avec l'IPGP.

Les trois centres dépendant de l'ORSTOM sont maintenant équipés de magnétomètres vecteur pour les mesures absolues de H et Z (I).

Dans le cadre de l'IMS, une station magnétique de l'UCLA relayée par satellite fonctionne depuis le début de 1978 à Pamataï.

Les observatoires magnétiques austraux de Kerguelen, Terre Adélie et Crozet, placés sous la responsabilité scientifique de l'IPGP, sont équipés d'une manière identique. Ils comportent pour les mesures absolues des théodolites (déclinaison), des Q.H.M. (composante horizontale) et des magnétomètres à protons (intensité du champ total). Les variations magnétiques sont suivies à l'aide de variomètres tri-directionnels Fluxgate et de magnétomètres à protons à précession libre. Les informations "champ magnétique" sont enregistrées numériquement, toutes les minutes, sur bande magnétique 7 ou 9 pistes et minicassette. La visualisation est assurée par deux enregistreurs graphiques 4 voies dont l'un à décalage de zone automatique. Les magnétographes La Cour, installés en 1957 aux observatoires de Dumont d'Urville et de Port-aux-Français, ont été maintenus en fonctionnement. Les variations magnétiques rapides (5 s à 1 000 s) sont détectées à l'aide de capteurs inductifs à noyau perméable à contre-réaction de flux et sont enregistrées numériquement, toutes les deux secondes, sur bande magnétique 9 pistes.

Les caractéristiques de la station de Garchy sont les mêmes que celles de Chambon-la-Forêt : enregistrement magnétique analogique des phénomènes de période comprise entre 0,2 et 600 s.

De nouveaux variomètres à asservissement de champ réalisés par le CRG (Mosnier, 1977) sont expérimentés à Brest d'une façon couplée à une station de télémessure de surface.

Diffusion de données obtenues dans les observatoires austraux

L'exploitation des observations est faite sur une base annuelle, la diffusion régulière concerne :

- les indices d'activité (Service des indices mondiaux : I.P.G.P. ; Service international des indices d'activité magnétisme : De Bilt, Centre mondial ; W.D.C.C.1. Copenhagen) ;
- les microfilms des magnétogrammes (Centre mondial : W.D.C.C.1. Copenhagen) ;
- les fascicules valeurs moyennes horaires (202 correspondants ayant manifesté leur intérêt effectif pour ces publications) ;
- les valeurs moyennes annuelles (Izmiran) ;
- les valeurs moyennes horaires sur bande magnétique (Centres mondiaux : W.D.C.C.1. Edinburg, W.D.C.A. Boulder) ;
- les valeurs "minute" sur bande magnétique (Centre mondial : W.D.C.A. Boulder) ;
- les analyses morphologiques des principaux événements (Roquetas, Boulder).

II - OBSERVATIONS IONOSPHERIQUES

1 - Observations permanentes par sondages verticaux

Le tableau ci-dessous énumère les observatoires ionosphériques permanents, placés sous responsabilité française : il indique le nom de la station, le pays où elle est située et l'organisme dont elle dépend ainsi que la cadence des sondages.

Observatoires permanents :

GARCHY	FRANCE	C.R.G.	15 min (5 min les RWD)
POITIERS	FRANCE	LPHA	60 min (15 min ")
LANNION	FRANCE	CNET/MIR	15 min
DAKAR	SENEGAL	CNET/MIR	15 min
ARTA	DJIBOUTI	CNET/MIR	15 min
OUAGADOUGOU	HAUTE VOLTA	CNET/MIR	15 min
TARAVAO	TAHITI	CNET/MIR	15 min
PORT AUX FRANCAIS	KERGUELEN	TAAF (1)	15 min (5 min les RDW)
DUMONT D'URVILLE	TERRE ADELIE	TAAF (1)	5 min

Des liaisons-tests HF sont exploitées entre Dakar et Lannion d'une part, Dakar et Arta d'autre part.

Des riomètres fonctionnent aux stations de Port-aux-Français (30,1 25,0 20,5 et 15,5 MHz) et de Dumont d'Urville (75,0 30,1 20,5 et 13,7 MHz).

Des stations de télémessure-télécommande de satellites en bande VHF (TM : 136-138 MHz-TC : 148-150 MHz) permettent à Port-aux-Français et Dumont d'Urville d'exploiter, entre autres, les satellites géophysiques ISIS.

Les observations sont régulièrement transmises aux Centres Mondiaux.

 (1) Stations gérées par l'équipe Station du L.G.E., 4, avenue de Neptune, 91400 Saint-Maur.

2 - Sondages à diffusion incohérente

La fréquence des sondages systématiques effectués entre la station émettrice de Saint-Santin et les stations réceptrices de Nançay, Monpazier et Menole est maintenue à 3 jours par mois en fonction du Calendrier Géophysique International. Une ou deux fois par an des campagnes de 10 à 15 jours sont réalisées en liaison avec les radars météoriques en vue d'étudier la variabilité des marées atmosphériques.

Des expériences exceptionnelles sont également faites avec le L.G.E. pour l'étude de phénomènes de couplages non linéaires et d'autres avec le CEPHAG pour l'étude des fluctuations rapides du champ magnétique ou électrique.

3 - Radar météorique

L'étude de la dynamique de la basse thermosphère se poursuit au moyen de deux radars météoriques du CNET en France (Garchy et Monpazier) et sous diverses latitudes (Kiruna 1974-1975 et Porto Ricco 1977-1978).

Le radar météorique mobile a été installé à Monpazier en 1975 de manière à sonder la colonne d'atmosphère située au-dessus de Saint-Santin.

Les observations sont faites dans le cadre d'une collaboration internationale (Franco-soviétique, CTOP, CRMWSP) pendant des périodes de 1 semaine à 1 mois choisies selon le Calendrier Géophysique International.

III - OBSERVATIONS DES EMISSIONS LUMINEUSES

1 - Photométrie

Le Groupe Luminescence Atmosphérique de l'IAP poursuit les mesures systématiques des émissions nocturnes dans la gamme de longueur d'ondes 3600 à 7770 Å.

Les observations sont réalisées à l'Observatoire de Haute Provence et dans les trois stations australes de Kerguelen, Terre Adélie et Crozet gérées par les TAAF.

Les conditions météorologiques peu favorables aux mesures photométriques à Crozet ont conduit à leur arrêt à la fin de 1978.

Des mesures de haute résolution spatiale et temporelle de la raie verte ont été effectuées depuis 1972 à Odeillo (42,5°N, 2°E). La surface d'entrée de cet appareil est une lentille de 90 cm de diamètre et de 5,130 m de distance focale. Les observations sont faites dans 8 directions s'appuyant sur un cône de 2° d'angle au sommet, le balayage s'effectue en 9 s. Le champ est de 15'. Ces mesures ont permis d'étudier les fluctuations de courte durée de l'intensité de la raie verte (M. Petitdidier 1978).

La photométrie du ciel crépusculaire entreprise en 1972 à l'Observatoire du Pic du Midi, en vue de détecter la présence de poussières cosmiques dans la haute atmosphère se poursuit durant environ 1 semaine par mois. A ce même observatoire sont également réalisées des observations régulières de la lumière zodiacale.

2 - Stations Lidar

Le Service d'Aéronomie à Verrières-le-Buisson a actuellement 3 stations Lidar opérationnelles. L'une est implantée depuis 1972 à l'Observatoire de Haute Provence (lat. 44°N ; long. 6°E). Elle a permis l'observation du sodium, du potassium et plus récemment du Lithium dans la haute atmosphère. Une seconde station a été implantée en 1975 à l'Ile de Heyss-URSS

(lat. $80^{\circ}5$ N ; long. 50° E). Elle est limitée à l'observation du sodium, mais cet alcalin est un traceur des paramètres atmosphériques tels que : température, turbulence, mouvements à petite et grande échelle, et il est utilisé en tant que tel pour fournir des indications sur ces paramètres entre 80 et 100 km. Une troisième station Lidar installée à Verrières-le-Buisson ($48^{\circ}45$ N, $2^{\circ}17$ E) qui n'est pas destinée à être utilisée de façon continue, a permis d'étendre l'application du Lidar à la mesure d'autres constituants, notamment l'ozone du sol à 30 km.

IV – OBSERVATIONS DES ONDES RADIOELECTRIQUES NATURELLES

Dans le domaine des ondes TBF (300 Hz-10 KHz), l'enregistrement sur bande magnétique des sifflements et des émissions naturelles se poursuit régulièrement à raison de 2 mn/heure aux observatoires de Poitiers, Kerguelen et Belgrano (base antarctique dont le fonctionnement est assuré par l'Institut Antarctique Argentin de Buenos-Aires). Le bruit intégré dans 4, puis 6 canaux distincts a, de plus, été enregistré en permanence à Kerguelen.

V – CAMPAGNES DIVERSES

Dans le cadre du programme international d'étude de la dynamique de la plasmopause et de la plasmasphère (programme IPPDYP) développé pendant l'I.M.S., des campagnes d'enregistrements TBF simultanés ont été réalisées – sous la responsabilité du LPHA – à Kerguelen et à Belgrano. Elles se sont déroulées en juin et juillet durant les années 1975-1978 et comportaient des enregistrements continus ou de 1 mn/5 mn. En 1977 et 1978, ces observations ont été complétées, à Kerguelen, par des enregistrements simultanés sol-satellites ISIS lorsque ceux-ci se trouvaient dans la zone de visibilité couverte par la station de réception de satellites.

Station mobile

Cette station a déjà été implantée en zone aurorale au cours de deux campagnes :

- une première opération s'est déroulée en Norvège (Skibotn ; coordonnées géographiques : $69^{\circ}4$ N, 20° E) du 13 novembre au 27 décembre 1976 ;
- une deuxième campagne a eu lieu en Islande (Husafell : coordonnées géographiques : $64^{\circ}4$ N, $20^{\circ}8$ O), du 5 juillet au 22 septembre 1977. Cette seconde opération a été effectuée en coordination avec le satellite GEOS-1. En effet, à cette époque, l'orbite de ce satellite était telle que GEOS-1 était grossièrement conjugué de la station de Husafell durant 5 heures par jour autour de 14.00 TL. Des mesures étaient simultanément effectuées à la station conjuguée sol de l'hémisphère Sud (Syowa Base dans l'Antarctique, coordonnées géographiques : $69^{\circ}0$ S, $39^{\circ}6$ E).

Eclipse du Soleil du 23 octobre 1976

Cette éclipse a fait l'objet de mesures communes entre l'OHP (mesures photométriques) et le CRPE (sondeur de St Santin).

Une campagne d'observation commune à l'expérience de rétrodiffusion de Valensole-Tromsø et au sondeur a été organisée en décembre 1976 dans le but d'étudier les ondes de gravité de grande échelle se propageant entre les régions aurorales et les régions de moyennes latitudes.

Plusieurs campagnes de lancer de ballons stratosphériques ont été faites par le groupe de l'IAP tant aux moyennes latitudes que dans la zone de l'anomalie équatoriale (Brésil).

VI – INSTRUMENTS

1 – Magnétisme

La série des capteurs magnétométriques mis au point au CRG a été complétée pour couvrir la gamme de fréquences depuis le continu jusqu'à 200 KHz :

- variomètres optiques ou capacitifs à aimant du continu à 0,1 Hz
- capteurs inductifs à contre-réaction de flux de 1 MHz à 200 KHz.

Plusieurs modèles sont utilisés couramment par des sociétés de prospection (sondages magnéto-telluriques ou électromagnétiques). La base d'étalonnage magnétique du CRG a été développée avec l'aide de l'INAG, de façon à assurer des étalonnages précis en amplitude, phase et densité spectrale de bruit.

Le laboratoire de l'ORSTOM à Bondy étudie actuellement un dispositif permettant l'enregistrement numérique des trois composantes du champ magnétique.

La version définitive du dispositif d'enregistrement numérique des variations magnétiques lentes développé par le Service des Observatoires Magnétiques Austraux entre 1971 et 1974, est opérationnelle depuis 1975 dans les stations de Kerguelen, Terre Adélie et Crozet. Depuis 1975 ce même service étudie un appareillage permettant de réaliser commodément les mesures absolues utilisées pour le calcul des valeurs des composantes du champ magnétique terrestre. Le prototype, réalisé en 1978, comporte une sonde à noyau saturé, fixée sur un théodolite amagnétique (résolution ± 1 seconde d'angle) ; un coffret électronique, dont la consommation n'excède pas 6 watts, complète cet appareillage. Les principaux critères pris en compte pour la construction de ce matériel sont : une résolution et une précision meilleures que 5 secondes d'angle pour les mesures angulaires de la déclinaison et de l'inclinaison du champ magnétique, la possibilité de mesurer directement les composantes horizontales et verticales à ± 1 nanotesla et la simplicité d'utilisation du matériel pour les mesures de terrain. Les résultats obtenus avec le prototype testé en 1978 répondent à ces spécifications en ce qui concerne les mesures de la déclinaison et de l'inclinaison.

2 – Laboratoire de Géophysique de Kerguelen

Après une période transitoire d'un an (1975) l'ensemble des disciplines géophysiques est regroupé à Port-aux-Français dans un laboratoire unique construit en 1973-74. De nombreux moyens communs facilitent le travail des équipes :

- un faisceau hertzien permet d'exploiter une station automatique située à 18 km de Port-aux-Français et groupant les capteurs les plus sensibles aux nuisances optiques et radioélectriques (photomètres, fluxmètres UBF et TBF). Son énergie provient de deux éoliennes ;
- un ensemble d'enregistrement et de traitement analogique (analyse spectrale) ;
- un minicentre de calcul ;
- une station de télémessure-télécommande de satellites.

Ce laboratoire administré par les T.A.A.F. concerne :

- l'I.P.G. de Paris pour le magnétisme
- le C.R.P.E. pour les fluxmètres UBF
- le L.P.H.A. pour les E.B.F. et T.B.F.
- le L.G.E. pour l'ionosphère
- le Service de Luminescence Atmosphérique de l'I.A.P. pour la photométrie.

3 - Station Mobile de l'INAG

Réalisée grâce à l'aide financière de l'INAG, la Station Mobile de réception de signaux naturels est équipée de différents capteurs dont la liste est donnée ci-après.

Description des capteurs de la station mobile

<i>Expérience</i>	<i>Equipement</i>	<i>Bande passante</i>	<i>Fréquence échantillonnage</i>
AURORES	*Photomètre DC Photomètre rapide $\lambda = 5577 \text{ \AA}$	0-11 Hz	$1/22 \text{ s}^{-1}$ 23 s^{-1}
	{ Photomètre 8 couleurs $\lambda = 3915 \text{ \AA}$ à 7400 \AA	0-2 s	$1/1.38 \text{ s}^{-1}$
IONOSPHERE	Riomètre (30.1 MHz)	0-5 s	$1/9.6 \text{ s}^{-1}$
CHAMP MAGNETIQUE	Fluxgate (3 composantes)	0-120 s	$1/11 \text{ s}^{-1}$
ONDES U.B.F.	Fluxmètres Pc2-Pc4 (2 composantes)	0.5-600 s	$1/1.38 \text{ s}^{-1}$
	*Fluxmètres Pc1 (3 composantes)	0-2-10 s	23 s^{-1}
ONDES E.B.F.	*Bruits intégrés (3 canaux centrés à 60, 150, 300 Hz)		5.8 s^{-1}
	Forme d'onde	30-450 Hz	enregistrement analogique (FM)
ONDES T.B.F.	*Bruits intégrés (5 canaux centrés à 0.5, 0.9, 1.8, 3.6 et 7.2 kHz)		5.8 s^{-1}
	Forme d'onde	0.3-10 kHz	enregistrement analogique (FM)

Les capteurs marqués d'une * sont éloignés de la station centrale d'enregistrement afin de ne pas être parasités par les interférences électriques et lumineuses. Ces signaux sont transmis par une télémesure.

Un ordinateur gère l'ensemble des expériences et permet de faire l'acquisition des données à des cadences différentes suivant la bande passante des appareils, mais qui restent dans des rapports simples, ce qui rend aisé toute corrélation des signaux entre eux. Un pré-traitement est également effectué à l'aide de ce calculateur, en particulier des transformées de Fourier sont calculées et visualisées sur une table traçante. Pour l'acquisition des données, on dispose de deux enregistreurs numériques fonctionnant en flip-flap et d'un enregistreur analogique 14 pistes.

Cette station a déjà été implantée deux fois en zone aurorale (voir paragraphe V).

4 - Caméra télévision

Réalisée par l'équipe OHP-IAP, après une période d'essai à l'OHP cette caméra sera installée à Kerguelen. La caméra de prise de vue est du style télévision, équipée d'un tube

NOCTICON. L'objectif a un champ de 180°. L'image télévision du ciel est envoyée sur un moniteur à côté duquel sont placés des affichages permettant d'identifier l'usage. Le tout est filmé par une caméra type Eclair.

5 - Divers

Un spectrographe à haute résolution est en voie d'achèvement à l'Observatoire du Pic du Midi, il devrait permettre d'obtenir le spectre nocturne des raies de Fraunhofer.

VII - INDICES D'ACTIVITE MAGNETIQUES

Le calcul des indices d'activité magnétiques am, as et an dont la série commence en 1959 et des indices aa dont la série commence en 1868 a été poursuivi régulièrement à l'Institut de Physique du Globe de Paris par P.N. MAYAUD. Les premiers sont diffusés mensuellement (indices provisoires) soit par l'IPGP soit par J.V. LINCOLN dans le *J. Geophys. Res.* Les seconds sont diffusés mensuellement par le Service International des Indices Géomagnétiques de De Bilt. La publication des valeurs définitives pour les deux types d'indices est effectuée dans les *Bulletins Annuels 32 de l'AIGA*.

BIBLIOGRAPHIE

- COURTILLOT V., LE MOUËL J.L. and MAYAUD P.N. (1977) - Maximum entropy spectral analysis of the geomagnetic activity index aa over a 107-year interval. *J. Geophys. Res.*, 82, 2641
- CORNILLEAU-WEHRLIN N., GENDRIN R. et TIXIER M. (1978) - VLF waves : conjugated ground-satellite relationships, *Space Sci. Rev.*, à paraître.
- DELOUIS H. et MAYAUD P.N. (1975) - Spectral analysis of the geomagnetic activity index aa over a 103-year interval, *Journ. Geophys. Res.*, 80, 4681.
- FAMBITAKOYE O. and MAYAUD P.N. (1976) - Equatorial electrojet and regular daily variation S_R - I.A. determination of the equatorial electrojet parameters. *J. Atm. Terr. Phys.*, 38, 1.
- FAMBITAKOYE O. and MAYAUD P.N. (1976) - Equatorial electrojet and regular daily variation S_R - II. The centre of the equatorial electrojet. *J. Atm. Terr. Phys.*, 38, 19.
- FAMBITAKOYE O., MAYAUD P.N. and RICHMOND A.D. (1976) - Equatorial electrojet and regular daily variation S_R - III. Comparison of observations with a physical model. *J. Atm. Terr. Phys.*, 38, 111.
- FAMBITAKOYE O. and MAYAUD P.N. (1976) - Equatorial electrojet and regular daily variation S_R - IV. Special features in particular days. *J. Atm. Terr. Phys.*, 38, 123.
- GENDRIN R., PERRAUT S., FARGETTON H., GLANGEAUD F. et LACOUME J.L. (1978) - ULF waves : conjugated ground-satellite relationships, *Space Sci. Rev.*, à paraître.
- GLANGEAUD F., LACOUME J.L. and KOFMAN W. (1976) - Preliminary results on the theory and practice of the measurement of ULF waves in the time-frequency domain. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 12, 135-141
- LACOUME J.L. - Recherche et caractérisation de dépendances linéaires entre signaux par analyse interspectrale. Applications Aspects of Signal Processing with Emphasis on Underwater Acoustics, Part 2, Proceedings of NATO Advanced Study Institute, La Spezia 1976, G. TACCONI, éditeur - D. Reidel Publishing Co, Dordrecht, Holland, p. 659-666.
- LEJEUNE G., BAUER P. and COLE K.D. (1976) - Field-aligned Electric Currents and their Measurement by the Incoherent Backscatter Technique. *Planet. Space Sci.*, 24, p. 479-485.
- MAYAUD P.N. (1975) - Analysis of storm sudden commencements (S.S.C.) for the years 1868-1967, *Journ. Geoph. Res.*, 80, 111.
- MAYAUD P.N. (1975) - Analyse d'une série centenaire d'indices d'activité magnétique - I. Recherche d'effets lunaires et récurrences de 27 jours, *Ann. Géophys.*, 31, 419.
- MAYAUD P.N. (1976) - Analyse d'une série centenaire d'indices d'activité magnétique, II - Conservation positive et estimation des valeurs moyennes, *Ann. Géoph.*, 32, 283.
- MAYAUD P.N. (1976) - Analyse d'une série centenaire d'indices d'activité magnétique, III - la distribution de fréquences est-elle logarithmo-normale ? *Ann. Géoph.*, 32, 443.
- MAYAUD P.N. (1976) - Magnetospheric and night-time induced effects in the regular daily variation. *Plan. Space Science* 24, 1049.

- MAYAUD P.N. (1977) – The Boller-Stolov mechanism and the semi-annual and daily Mc Intosh effects in geomagnetic activity. *J. Geoph. Res.*, 82, 1266.
- MAYAUD P.N. (1977) – On the reliability of the Wolf-number series for estimating longterm periodicities. *J. Geoph. Res.*, 82, 1271.
- MAYAUD P.N. (1977) – The equatorial counter-electrojet (geomagnetic aspects), *J. Atm. Terr. Phys.*, 39, 1955.
- MAYAUD P.N. (1977) – Analyse d'une série centenaire d'indices d'activité magnétique, IV - Les diverses composantes de l'onde annuelle aux latitudes subaurores. *Ann. Géophys.*, 33, 479.
- MAYAUD P.N. (1978) – The annual and daily variation of the Dst index, *Geophys. Journal Roy. Ast. Soc.*, 55, 193.
- MAYAUD P.N. – Abnormal features of the regular daily variation S_R , *J. Geomagn. Geoelect.*, à l'impression.
- MAYAUD P.N. and SVALGAARD L. (1978) – Comment on "Evidence for strong artificial components in the equivalent linear amplitude geomagnetic indices" by D.M. Bubenick and A.C. Fraser-Smith. *J. Geophys. Res.*, 83, 2723.
- MAYAUD P.N. (1978) – Morphology of the transient irregular variations of the terrestrial magnetic field, and their main statistical laws, *Ann. Geoph.*, 34, 243.
- MOSNIER et YVETOT (1977) – Nouveau type de variomètres horizontaux à asservissement de champ et capteur capacitif. *Ann. Géoph.*, 33.
- MOSNIER et DURAND (1977) – Magnétomètre sous-marin pour l'étude des composantes horizontales du champ transitoire. *Ann. Géoph.*, 33.
- SCHLICH R., BITTERLY J., VANNIER G. et DUPAS B. (1975) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Port-aux-Français (Kerguelen) 1973. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., OLLIVIER B. et PETIT J.R. (1975) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Dumont d'Urville (Terre Adélie), 1973. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., GEHANT D. et LASSERRE J.L. (1975) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Port-aux-Français (Kerguelen), 1974. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., DEININGER R. et DENIER P. (1975) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Dumont d'Urville (Terre Adélie), 1974. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., CHOMAT C. et DESMAS M. (1976) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Dumont d'Urville (Terre Adélie), 1969. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., BLOND B. et KRINICKI J.C. (1976) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Port-Alfred (Crozet), 1974. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., BOULANGER D. et BRUN J.C. (1976) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Port-aux-Français (Kerguelen), 1970. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., REGNAT F. et VIOT P. (1976) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Port-Alfred (Crozet), 1975. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., FORGET P. et AUBERT Y. (1976) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Port-aux-Français (Kerguelen), 1975. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., LEFEBVRE P. et LAURENT T. (1976) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Dumont d'Urville (Terre Adélie), 1975. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., DUQUESNOIS L. et PAJON G. (1977) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Dumont d'Urville (Terre Adélie), 1976. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., LIMON B. et AUGNACS A. (1977) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Port-aux-Français (Kerguelen), 1976. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., WOLESJZO J. et VALETTE J. (1977) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Port-Alfred (Crozet), 1976. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., SORTON G. et LESCHALLIER DE L'ISLE J. (1977) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Dumont d'Urville (Terre Adélie), 1970. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., BAINIER M. et GOMEZ G. (1978) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Port-aux-Français (Kerguelen), 1971. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., JEANNE A. et BONNET J. (1978) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Dumont d'Urville (Terre Adélie), 1977. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., OSANZ J. et HACHETTE O. (1978) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Port-Alfred (Crozet), 1977. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- SCHLICH R., BITTERLY J., MARTIN Y. et VIOT P. (1978) – Observations magnétiques faites à l'Observatoire de Port-aux-Français (Kerguelen), 1977. *Ann. de l'I.P.G. de Paris*, p. 1-53.
- TIXIER M. (1976) – Contribution à l'étude de la propagation des ondes radioélectriques de très basse fréquence rayonnées par l'éclair. Thèse d'Etat, Poitiers.
- TIXIER M. et CHARCOSSET G. (1978) – Partly ducted whistlers over Europe, *J. Atm. Terr. Phys.*, 40, 601.
- TURCAT C. (1977) – Problèmes liés à l'estimation d'une matrice de densité spectrale. 6^e Colloque sur le Traitement du Signal et ses applications (GRETSI), Nice, p. 70/1 - 70/7.

SECTION V
MÉTÉOROLOGIE ET PHYSIQUE
DE L'ATMOSPHERE

TABLE DES MATIERES

	Pages
I – Modélisation à grande échelle D. ROUSSEAU (Météorologie Nationale – PARIS)	225
II – Modélisation à petite et à moyenne échelle M. BENISTON (Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS – PARIS) .	227
III – Rayonnement Atmosphérique J. LENOBLE (Laboratoire d'optique Atmosphérique – LILLE)	234
IV – Couche limite terrestre et marine J. SAISSAC (Observatoire du Pic du Midi et de TOULOUSE)	241
V – Météorologie Synoptique A. BERROIR (Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS – PARIS) ..	249
VI – Physique des nuages R. ROSSET (Laboratoire Associé de Météorologie Physique – CLERMONT-FERRAND)	251
VII – Convection profonde D. RAMOND (Laboratoire Associé de Météorologie Physique – CLERMONT-FERRAND)	255
VIII – Météorologie Tropicale P. de FELICE (I.U.T. DAKAR)	260
IX – Physico-chimie de l'Atmosphère J. MORELLI (Ministère de l'Environnement et du cadre de vie – PARIS)	262
X – Modification du temps P. ADMIRAT (Laboratoire de glaciologie du CNRS – GRENOBLE)	273

I – MODELISATION A GRANDE ECHELLE

D. ROUSSEAU
Météorologie Nationale

INTRODUCTION

La période 1975-1978 a vu un approfondissement des travaux entrepris par les deux organismes s'occupant en France de modélisation à grande échelle : le laboratoire de Météorologie Dynamique et la Direction de la Météorologie. Les aspects abordés par ces deux organismes ont été notamment : l'analyse, les méthodes numériques d'intégrations, les paramétrisations dans les modèles de grande échelle. Nous noterons ici également des travaux plus théoriques sur la représentation des phénomènes turbulents capables d'influencer la modélisations à grande échelle.

ANALYSE

Dans ce domaine on notera la réalisation effective d'un schéma d'analyse de type "optimal" (c'est-à-dire exploitant les propriétés statistiques des champs météorologiques), par la méthode de cokrigage (CHAUVET et alii 1975). La multiplication de données non synchrones rend nécessaire l'étude du problème de l'assimilation quadridimensionnelle. Dans ce domaine un travail théorique important a été fait qui explique pourquoi certaines techniques d'assimilation réussissent et qui donne des indications pour l'amélioration de l'efficacité de ces méthodes (TALAGRAND 1977). Signalons également un travail qui intéresse à la fois l'analyse et la simulation faite par représentation spectrale (SINOLECKA 1977).

MODELES D'EVOLUTION

Plusieurs études ont été faites concernant les problèmes numériques liés à l'intégration des équations d'évolution. L'importance de la conservation de l'énstrophie potentielle dans l'intégration numérique a été mise en évidence et des schémas numériques assurant cette conservation ont été développés (SADOURNY 1975). L'étude de modèles numériques utilisant la représentation spectrale a progressé et les algorithmes ont été testés avec succès sur une solution particulière exacte des équations d'évolution (ROCHAS 1975).

Les modèles de prévision numérique ont pris une importance grandissante dans l'exploitation météorologique. Les prévisions sont faites actuellement jusqu'à 72 heures en utilisant des modèles dont les plus fins ont des mailles de calcul de 180 km de côté et qui comportent une représentation simplifiée des différents processus physiques. Des éléments statistiques sur les performances obtenues ont été publiés et les possibilités d'utilisation de modèles numériques pour des prévisions très fines ont été étudiées (ROUSSEAU 1976).

Les études sur les paramétrisations physiques se sont développées et des algorithmes originaux ont été mis au point pour la représentation du rayonnement dans les modèles (GELEYN 1975, 1977).

TURBULENCE

L'état des recherches dans ce domaine et la complexité du problème ne permettent pas encore de tenir compte correctement du caractère turbulent de l'atmosphère dans la modélisation à grande échelle. Signalons cependant que des études fondamentales ont été entreprises dans ce domaine. Une méthode de mise en forme du problème par des considérations physiques a été proposée (BLANCHET 1975). Des premiers résultats ont d'autre part été obtenus récemment pour la paramétrisation des transferts d'énergie et d'entrophie à la limite de résolution des modèles, dans le cas d'un fluide bidimensionnel (BASDEVANT et alii 1978).

- BASDEVANT C., LESIEUR M. et SADOURNY R. (1978) – Subgrid-Scale Modeling of Entrophy Transfer in Two Dimensional Turbulence. *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 35, p. 1028-1042.
- BLANCHET J. (1975) – Concepts nouveaux sur la mécanique de la turbulence. *La Météorologie*, VI Série, n° 1, p. 63-73 ; *La Météorologie*, VI Série, n° 2, p. 47-56 ; *La Météorologie*, VI Série, n° 3, p. 83-95.
- CHAUVET P., PAILLEUX J. et CHILES J.P. (1975) – Analyse objective des champs météorologiques par cokrigage. *La Météorologie*, VI Série, n° 4, p. 37-56.
- GELEYN J.F. (1975) – Un modèle unidimensionnel et son application à l'étude du cycle diurne. *La Météorologie*, VI Série, n° 2, p. 17-34.
- GELEYN J.F. (1977) – Parametrization of radiative transfer at ECMWF - *Proceeding from ECMWF Seminar 1977*. Bracknell U.K., p. 276-345.
- ROCHAS M. et MITTELBERGER J.P. (1975) – Intégration numérique d'un modèle barotrope spectral en équations primitives. *La Météorologie*, VI Série, n° 3, p. 71-82.
- ROUSSEAU D. (1976) – "Prévision Météorologique par un modèle d'écoulement à maille fine". Lecture notes in physics - Computing methods in applied sciences Springer Verlag, p. 339-346.
- ROUSSEAU D. (1976) – Les modèles en prévision numérique. *La Météorologie*, VI Série, n° 7, p. 109-134.
- SADOURNY R. (1975) – The dynamics of finite - Difference models of the shallow water equations. *Journal of atmospheric Sciences*, Vol. 32, p. 680-689.
- SADOURNY R. (1975) – Compressible model flows on the sphere. *Journal of Atmospheric Sciences*, Vol. 32, p. 2103-2110.
- SINOLECKA C. (1977) – Sur certains aspects de la représentation spectrale des champs météorologiques. *La Météorologie*, VI Série, n° 10, p. 93-112.
- TALAGRAND O. (1977) – "Contribution à l'assimilation quadridimensionnelle d'observations météorologiques". Thèse de Doctorat d'Etat, Université P. et M. Curie, p. 295.

II – MODELISATION A PETITE ECHELLE ET A MOYENNE ECHELLE

M. BENISTON

Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS

INTRODUCTION

La modélisation à petite échelle a connu une importante évolution en France depuis la publication du dernier rapport de l'UGGI en 1974. Des équipes, dans divers centres de recherche, se sont penchées sur le problème de la simulation de la couche limite planétaire (L.M.D, Météorologie Nationale, E.D.F) ; la modélisation de phénomènes tels que l'advection à l'échelle locale (INRA), le régime thermique et hydrique du sol (Institut de Mécanique de Grenoble), le relief (E.D.F et L.P.D.A) ; et le développement de modèles de nuages "chauds" avec une microphysique détaillée (LAMP).

Ce rapport sera donc divisé en quatre parties principales, en commençant par la modélisation à l'échelle locale, suivie de l'effort de recherche dans la simulation de la couche limite planétaire, les modèles à méso-échelle, et finalement les modèles de nuages/convection.

MODELISATION DE LA COUCHE LIMITE DE SURFACE

Trois équipes ont travaillé sur les problèmes que pose la couche limite de surface (les premiers 50 à 100 m de l'atmosphère).

LE DIMET et ROSSET (1978 a) du LAMP ont développé un schéma lagrangien de diffusion turbulente afin d'étudier la dispersion d'embruns marins dans la Couche Limite de Surface (CLS). L'importance de cette étude réside dans l'influence de cette diffusion sur les flux de chaleurs sensible et latente, ainsi que sur la concentration de noyaux de condensation qui sont injectés dans l'atmosphère. Ce modèle, à la différence d'autres modèles de CLS, est compliqué par le fait que le "polluant" étudié n'est pas passif mais est composé de particules de taille et de masse non négligeables ; les particules, étant hygroscopiques, ont une taille variable en fonction de la température et de l'humidité ambiantes. La concentration du "polluant" est calculée à partir de statistiques sur les trajectoires d'un grand nombre de particules. LE DIMET et ROSSET (1978 b) ont développé l'algorithme qui permet de construire la trajectoire de chaque particule. L'intérêt de cette recherche est de pouvoir adapter ce schéma à un modèle numérique, tel qu'un modèle de convection avec précipitations.

VAUCLIN (1978) a développé un modèle qui décrit l'évolution du régime thermique et hydrique du sol en considérant des équations couplées de transfert de masse, de chaleur, et de quantité de mouvement entre la nappe phréatique et la CLS. Le fait que ce modèle soit

CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
E.D.F. : Electricité de France
INRA : Institut National de Recherches Agronomiques
LAMP : Laboratoire Associé de Météorologie Physique – Université de Clermont-Ferrand
L.M.D : Laboratoire de Météorologie Dynamique, C.N.R.S.
L.P.D.A : Laboratoire de Physique et Dynamique de l'Atmosphère de l'Université Pierre et Marie Curie

basé sur des processus physiques permet d'utiliser ce modèle en prédicteur. Les données climatiques sont indépendantes de la solution recherchée ; les données phénoménologiques dont a besoin le modèle pour son initialisation, peuvent être évaluées indépendamment de la solution. Dans sa publication, VAUCLIN (1978) exploite le modèle pour montrer la sensibilité de la température de surface et du flux de chaleur latente à des variations de l'albedo, de l'émissivité, et de la rugosité du sol en l'absence de végétation. Un modèle analytique d'advection locale a été étudié par TIER et PERRIER (1978) à l'INRA de Versailles. Ce modèle bidimensionnel est simplifié par des hypothèses restrictives, telles que l'analogie à la diffusion, le régime permanent, et le fait que la chaleur soit traitée comme contaminant passif. Malgré ces restrictions, le modèle permet d'estimer les changements à l'échelle microclimatique en fonction de la distance dans le sens du vent pour différentes conditions à la surface du sol. Ce modèle permet également de relier les différences de flux aux contrastes surfaciques et aux distances rapportées au paramètre de rugosité. Les résultats du modèle INRA ont été confrontés à des données numériques de Taylor et également à des données expérimentales, avec des résultats encourageants. Les applications des études de CLS sont orientées vers l'incorporation de résultats à des modèles numériques de plus grande taille, mais surtout comportent un caractère agrométéorologique.

MODELISATION DE LA COUCHE LIMITE PLANETAIRE

L'effort français dans le domaine de la modélisation de la Couche Limite Planétaire (CLP) s'est poursuivi à la Météorologie Nationale et au L.M.D.

En 1976, ANDRE et al. (1976 a) ont développé une approximation de la turbulence pour des écoulements non-homogènes. La méthode utilisée ("clipping approximation") est basée sur l'inégalité de SCHWARTZ, qui limite la croissance des triples corrélations par une troncature de ces corrélations lorsque celles-ci n'obéissent pas aux lois des inégalités. En imposant les lois des inégalités de SCHWARTZ, les auteurs prennent en compte l'effet d'atténuation des corrélations du quatrième ordre.

Cette approximation a été utilisée pour construire un modèle numérique de turbulence dans un fluide type Boussinesq. Le modèle est appliqué à une expérience de convection restreinte, et les résultats sont comparés à des données expérimentales obtenues en laboratoire. Le modèle reproduit bien les phénomènes observés, tels que la température moyenne, le flux de chaleur turbulent, l'énergie cinétique, la variance de la température, et certaines corrélations de troisième ordre (ANDRE et al., 1976 b).

Le problème de l'évolution nocturne de la CLP est un sujet qui, jusqu'ici, n'a pas fait l'objet d'études approfondies, mais qui mérite néanmoins une attention particulière. L'équipe de ANDRE et al. (1978) a développé un modèle d'évolution nocturne de la CLP, dérivé du précédent, qui prend en compte la divergence du flux radiatif infrarouge moyen et, de manière simplifiée, les termes d'interaction turbulence/rayonnement. Dans le domaine de la CLP nocturne, les processus turbulents et radiatifs jouent des rôles comparables et aucun ne peut être négligé. Il se trouve que la simulation de la CLP nocturne nécessite une complexité d'équations de turbulence plus élevée que celle des modèles tridimensionnels tels que celui de DEARDORFF ; celui-ci ne prend pas en compte de façon satisfaisante l'atténuation de la turbulence causée par la stabilité de la stratification thermique. ANDRE et al. (1978) insistent sur le fait que la description de l'interaction entre la turbulence et le transfert radiatif est essentielle pour une simulation satisfaisante de la CLP nocturne.

Une des originalités du modèle tri-dimensionnel de SOMMERIA (1976) est le traitement de la turbulence à l'échelle inférieure à la maille. Une série d'hypothèses qui permettent la troncature des équations de moments d'ordre 2, aboutit à une paramétrisation correcte, et efficace sur le plan du temps de calcul. Les conditions aux limites latérales du modèle sont cycliques, et les erreurs de troncature sont minimisées par le fait que le domaine d'in-

tégration évolue en suivant le vent moyen. L'intégration des six principales équations d'évolution se fait pour un pas de temps de 5 secondes. L'évolution des 7 variables indépendantes est calculée à chacun des 64000 points de maille.

Depuis la publication de cet article, une amélioration sensible a été apportée au modèle SOMMERIA par une nouvelle présentation de la condensation à l'échelle inférieure à la maille. Dans la grande majorité des modèles, une maille est supposée être soit entièrement saturée, soit entièrement non-saturée ; cette hypothèse peut être erronée même pour une maille très fine, telle que les 59 m de SOMMERIA, car il se peut qu'une fraction de certaines mailles soit saturée. C'est le cas notamment aux bords des nuages, où l'écoulement turbulent leur donne une forme très irrégulière. SOMMERIA et DEARDORFF (1977) ont proposé un schéma de paramétrisation où le concept d'une distribution statistique des points de la maille où la condensation a lieu est introduit.

La comparaison des résultats de simulation numérique avec des observations sur le terrain est un point délicat souvent laissé de côté par les modélistes. SOMMERIA a confronté son modèle à des données atmosphériques représentatives d'un cas de convection restreinte, en l'occurrence l'expérience Porto Rico du NCAR (qui s'est déroulée en 1972). Une simulation numérique à partir des profils verticaux mesurés par avion lors de cette expérience a donné des résultats très satisfaisants (SOMMERIA et LE MONE, 1978).

Afin d'essayer d'aller au-delà de la simple comparaison modèle/atmosphère, les résultats du modèle SOMMERIA ont été étudiés dans le but d'analyser l'effet d'une population de cumulus des alizés sur le champ turbulent de la CLP, et de tester certaines des paramétrisations relatives à l'interaction nuages/atmosphère à grande échelle (BENISTON, 1978 a). La morphologie des nuages est examinée afin de tester la validité de certaines hypothèses utilisées dans la paramétrisation de la convection ; des tests de paramétrisation de type BETTS et de FRAEDRICH aboutissent à des résultats intéressants. Des relations empiriques ont été formulées pour lier les flux turbulents à des quantités représentant la population de nuages. Ce genre de relations empiriques peut entraîner des simplifications de paramétrisations de la convection, et les estimations raisonnables des transports turbulents ainsi obtenues peuvent suppléer aux données atmosphériques obtenues par les techniques actuelles limitées de mesures et d'observations (BENISTON, 1978 b).

L'incorporation de la pluie dans les modèles de convection est une étape importante vers la simulation de la convection profonde. Il s'agit de développer une méthode qui ne détaille pas les processus microphysiques mais qui permette cependant de représenter les caractéristiques du phénomène de précipitation. Trois variables indépendantes ont été choisies pour représenter le cycle de l'eau : l'humidité spécifique et les teneurs spécifiques en gouttelettes de nuages et de pluie. L'incorporation des équations tient compte des interactions turbulentes à l'échelle inférieure à la maille, entre les trois quantités représentant le cycle de l'eau et les autres variables indépendantes du modèle de SOMMERIA. Pour cela, il est nécessaire de généraliser le système d'équations aux moments de second ordre pour la convection sans précipitation. Ce travail est en voie d'achèvement (REDELSERGER, 1978).

Un autre modèle de CLP est en cours de développement à la Direction des Etudes et Recherches de l'EDF, afin d'étudier la dispersion des effluents gazeux dans l'atmosphère. Ce genre d'études demande un traitement sensiblement plus complexe que les modèles utilisant les coefficients de diffusion K ; ces derniers types de modèles peuvent être justifiés seulement lorsqu'ils se situent loin de la source de la pollution, lorsque le polluant a eu le temps de se diffuser dans toute la couche de mélange, afin que les échelles associées au transfert turbulent soient petites en comparaison de celles associées à la source. Le modèle de SAAB (1978) considère l'évolution des moments de deuxième ordre et utilise une fermeture à ce niveau. Ce modèle servira entre autres à traiter des problèmes de la dispersion atmosphérique de polluants industriels gazeux.

MODELISATION A MESO-ECHELLE.

La modélisation à méso-échelle est un sujet qui retient l'attention de nombreux chercheurs dans le monde depuis cinq ans environ. La recherche en France dans ce domaine n'est qu'à ses débuts ; il existe cependant trois équipes chargées d'étudier ce genre de modèle pour divers types d'exploitations : BENQUE et DEWAGENAERE à l'EDF ; BLONDIN et PETTRE à la Météorologie Nationale ; et SOMMERIA et BENISTON au L.M.D. Il faut noter qu'à présent le terme "méso-météorologique" est utilisé pour décrire des domaines d'intégration tridimensionnels ayant une maille allant de 1 à 10 Km horizontalement, et de 50 à 500 m d'extension verticale.

Le modèle étudié et développé par l'EDF porte sur la résolution tridimensionnelle des équations de Navier-Stokes qui sont couplées à une équation de température ; le modèle prend en compte le relief et la structure thermique de l'atmosphère ; l'approximation anélastique est utilisée. Les échanges turbulents sont simulés par un modèle de fermeture au second ordre. Le modèle a été appliqué à la Plaine d'Alsace, situation intéressante vue l'importance du relief des Vosges. Les résultats sont comparés aux mesures effectuées en veine hydraulique et sont jugés très satisfaisants (BENQUE et DEWAGANAERE, 1978).

BLONDIN et PETTRE (1978) se sont penchés sur les problèmes de la conception et l'analyse des résultats de modèles à méso-échelle, en comparant le modèle de PIELKE (Université de Virginie, U.S.A.), et celui développé par la Météorologie Nationale. Les deux modèles sont confrontés à des résultats atmosphériques dans la plaine d'Alsace.

Au L.M.D, SOMMERIA et BENISTON ont commencé à développer un modèle à méso-échelle, se situant dans les premiers 2000 à 4000 m de la troposphère, et ayant une maille de l'ordre du kilomètre horizontalement. La première phase du projet consiste en une représentation correcte de la turbulence à l'échelle inférieure à la maille ; par la suite les échanges radiatifs entre le sol solide et l'atmosphère seront abordés ; enfin, il est envisagé que ce nouveau modèle puisse être suffisamment généralisé pour être appliqué à la simulation de la convection profonde.

A la modélisation des phénomènes de moyenne échelle, se rattachent — bien que les méthodes de calcul utilisées diffèrent de celles des études précédentes — les travaux théoriques menés, au LPDA, dans le domaine de l'action du relief sur l'écoulement de l'air. Le Professeur P. QUENEY a, jusqu'à son décès, survécu en février 1978, continué ses recherches sur les perturbations de relief. Tout en travaillant à une synthèse de ses travaux [P. QUENEY, 1977] il a étudié, en collaboration avec D. CRUETTE, des modèles d'ondes de relief de grande extension horizontale, suggérés par les résultats de la thèse de Doctorat d'Etat soutenue en 1973, par celle-ci [D. CRUETTE, 1976]. Il s'agit de modèles linéarisés d'onde de gravité dans une atmosphère constituée de plusieurs couches de stabilité uniforme. Les modèles, dont on a la solution analytique, vont maintenant être exploités de façon plus complète par voie numérique. En effet, l'étude de l'influence du relief sur l'écoulement de l'air, influence dont P. QUENEY avait, dès 1933, pressenti toute l'importance, se trouve au centre des préoccupations actuelles des chercheurs qui préparent l'expérience "Mountex", (sous Programme de GARP), à la définition de laquelle le LPDA a pris une part active.

MODELES DE NUAGES ET MODELES DE CONVECTION

Outre les catégories de modèles numériques que nous avons passées en revue dans les trois précédentes sections, il est utile de mentionner ici les efforts accomplis dans le domaine de la modélisation de la convection (autre que celle associée avec les modèles de CLP ou à méso-échelle), en particulier la modélisation qui comprend une microphysique de nuages détaillée. Le but de la recherche actuelle semble être orientée vers les problèmes d'ordre industriel, en particulier les problèmes qui interviennent à l'échelle locale lorsqu'il y a rejet

d'énergie et d'humidité en provenance de sources industrielles, telles que des centrales électriques.

Le modèle développé par BRENGUIER (1978) a pour but d'étudier les changements qui interviennent lorsqu'un panache réfrigérant provenant d'une source industrielle se joint aux mécanismes convectifs naturels. BRENGUIER (1978) considère deux cas de simulation : le premier simule un panache thermique isolé ; le deuxième simule plusieurs panaches thermiques simultanés qui agissent les uns sur les autres. L'intérêt de ce genre de simulation, outre la simplicité du modèle unidimensionnel, réside dans la possibilité de simuler des phénomènes non stationnaires, tels que la formation de petits cumulus ou les changements apportés aux panaches par les variations à grande échelle du vent moyen. Il permet également la prévision des perturbations causées en altitude par un rejet d'énergie au niveau du sol ; cette prévision est particulièrement intéressante pour l'initialisation de modèles d'interaction panaches/nuages.

L'équipe de PASTRE et ROSSET du LAMP a travaillé sur des modèles de convection qui comprennent une microphysique détaillée. Le modèle de PASTRE et ROSSET (1978 a) prend en compte les phénomènes turbulents et les problèmes énergétiques posés par la convection ; le modèle peut être exploité pour la simulation de divers phénomènes, tels que le développement de nuages isolés, l'interaction entre cellules naturelles et celles provenant de tours de réfrigération. Le modèle peut aussi être étendu à l'étude des fronts et même, avec un traitement de la micro-physique amélioré, l'étude de la représentation spectrale de la glace précipitante.

PASTRE et ROSSET (1978 b) ont d'autre part mis au point un modèle microphysique complet qui donne l'évolution du spectre de gouttelettes d'un nuage chaud. Le modèle a été appliqué à un cas d'interaction entre un panache humide émis par la tour de réfrigération d'une centrale électrique et des nuages stratiformes. Le modèle, qui comprend les processus de condensation, de coalescence, de rupture hydrodynamique des plus grosses gouttes, la rupture due aux collisions, et la formation de précipitations, est suffisamment général pour que diverses applications puissent être envisagées, tels que l'étude des cumulus tropicaux, et l'in-sémination de nuages chauds.

Une étude originale de la convection dans son contexte méso-échelle est proposée par POINTIN au LAMP : la convection profonde à l'échelle de 200 à 400 km est modélisée par un ensemble de tours convectives interagissant à tous les niveaux de l'atmosphère en modifiant la stratification thermique et d'humidité de l'environnement. L'environnement réagit de façon immédiate (40 à 60 s) à la présence, au déplacement et au développement de chaque cellule convective par l'intermédiaire des flux convectifs d'énergie, d'humidité et de quantité de mouvement calculés de façon explicite à partir de la schématisation de la convection profonde par ces tours convectives. L'évolution des cellules est déterminée en fonction des valeurs des paramètres de l'atmosphère environnant en utilisant un modèle unidimensionnel de cumulo-nimbus comportant 3 cylindres concentriques de rayon variable et qui incorpore la thermodynamique de la vapeur d'eau, une microphysique paramétrée et la dynamique.

Au Laboratoire de Physique de l'Atmosphère de Toulouse, l'étude de la simulation de nuages convectifs s'est poursuivie avec l'équipe de SARTHOU. SARTHOU (1977) a construit deux modèles de nuages, l'un monodimensionnel, l'autre bidimensionnel. Le modèle monodimensionnel est utile comme instrument de prédiction dans les expériences de modification du temps. Les paramètres concernant la morphologie des nuages doivent être évalués expérimentalement. Malgré ses avantages, le modèle monodimensionnel est trop simpliste en ce qui concerne une représentation détaillée de la microphysique des nuages, d'où l'intérêt d'une simulation bidimensionnelle de ces phénomènes. Le deuxième modèle de SARTHOU est donc plus complexe et permet de mettre en évidence le rôle important de la coalescence dans le processus de formation des précipitations. SARTHOU indique également l'importance qu'il faut accorder à la discrétisation de la répartition en taille des individus de la population du nuage.

A partir de cette étude, RASOAMANANA et SARTHOU (1977) ont utilisé le modèle bidimensionnel pour étudier la turbulence, à l'aide d'un coefficient de diffusion K variable. Les auteurs proposent également une étude comparative d'un nuage alimenté à la base par un courant ascendant et d'un nuage non-alimenté.

- ANDRE J.C. et LACARRERE P. (1975) – Les ondes de gravité internes et leur traitement numérique dans les modèles de couche limite atmosphérique. *La Météorologie*, V, 33, 1-19.
- ANDRE J.C., de MOOR G., LACARRERE P. et du VACHAT R. (1976 a) – Turbulence Approximation for Inhomogeneous Flows : Part I The Clipping Approximation. *J. Atmos. Sci.*, 33, 476-481.
- ANDRE J.C., de MOOR G., LACARRERE P., du VACHAT R. (1976 b) – Turbulence Approximation for Inhomogeneous Flows. Part II. The numerical simulation of a Penetrative Convective Experiment. *J. Atmos. Sci.*, 33, 482-491.
- ANDRE J.C., de MOOR G., LACARRERE P., THERRY G., du VACHAT R. (1978) – The Clipping Approximation on Inhomogeneous Turbulence Simulations. Proceedings of Symposium on turbulent shear Flows. *Springer Verlag* (à paraître).
- ANDRE J.C., de MOOR G., LACARRERE P., THERRY G., du VACHAT R. (1978) – Modeling the 24-hour Evolution of the mean and turbulent Structure of the Planetary Boundary Layer. Paraîtra dans *J. Atmos. Sci.*, Vol. 35, n° 10.
- BENISTON M. (1978 a) – “Aspects of non-precipitating cumulus convection in a Planetary Boundary Layer Model of the Tropical Atmosphere”. Proceedings of the Technical Conference on Hurricanes and Tropical Meteorology, 591-597.
- BENISTON M. (1978 b) – “Utilisation d'un modèle tridimensionnel pour étudier les cumulus des alizés et la paramétrisation de leurs effets sur le champ turbulent de la couche limite tropicale”. Thèse de 3^e cycle, Université de P. et M. Curie.
- BENQUE J.P. et DEWAGENAERE P. (1978) – Modèles météorologiques à moyenne et petite échelle. Paraîtra dans le *J. Rech. Atmos.*
- BRENGUIER J.L. (1978) – Modèle de convection unidimensionnel Lagrangien ; Application à la simulation d'un panache de réfrigérant atmosphérique. Paraîtra dans *J. Rech. Atmos.*
- CRUETTE D. (1976). – Experimental Study of mountain lee-waves by means of satellite photographs and aircraft measurements. *TELLUS* 28 (1976) 6.
- ITIER B. et PERRIER A. (1976 a) – Présentation d'une étude analytique de l'advection. I., *Annales Agronomiques*, Vol. 27, 111-140.
- ITIER B. et PERRIER A. (1976 b) – Présentation d'une étude analytique de l'advection. II, *Annales Agronomiques*, Vol. 27, 417-433.
- ITIER B. et PERRIER A. (1978) – Présentation d'une étude analytique de l'advection. III, Paraîtra dans *Annales Agronomiques*.
- LE DIMET F.X. et ROSSET R. (1978) – Un schéma Lagrangien de diffusion turbulente : Quelques applications. Paraîtra dans *J. Rech. Atmos.*
- PASTRE J.R. et ROSSET R. (1978 a) – Interaction entre un panache humide et un nuage : Etude préliminaire. A paraître dans *J. Rech. Atmos.*
- PASTRE J.R. et ROSSET R. (1978 b) – Un modèle microphysique de nuage stratiforme bas : Application préliminaire à un problème d'environnement. A paraître dans *J. Rech. Atmos.*
- PASTRE J.R. et ROSSET R. (1978 c) – Considérations énergétiques dans un modèle bidimensionnel de convection profonde. A paraître dans *J. Rech. Atmos.*
- PETTRE P. et BLONDIN C. (1978) – Modèles de méso-échelle. Conception, Utilisation. A paraître dans *J. Rech. Atmos.*
- QUENEY P. (1977) – “Synthèse des travaux théoriques sur les perturbations de relief”. *La Météorologie* Mars et Juin 1977.
- RASOAMANANA R. et SARTHOU P. (1977) – Un procédé de simulation numérique des cumulus à faible développement. *J. Atmos. Sci.*, 11, 255-267.
- REDELSPERGER J.L. (1979) – Thèse the Troisième Cycle, Université de Pierre et Marie Curie.
- SAAB (1978) – “Contributions à l'étude du transport turbulent de masse dans l'atmosphère”. Thèse d'Etat, Université Pierre et Marie Curie.
- SARTHOU P. (1977) – “Contributions à l'étude des modèles mono et bidimensionnels de nuages convectifs”. Thèse d'Etat, Université Paul Sabatier. Toulouse.
- SOMMERIA G. (1974) – “Modèle tridimensionnel pour la simulation numérique de la couche limite planétaire. Application à la couche limite tropicale”. Thèse de Doctorat d'Etat à l'Université de Paris VI.
- SOMMERIA G. (1976) – Three dimensional simulation of turbulent processes in an undisturbed trade-wind boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 33, 216-241.

- SOMMERIA G. et DEARDORFF J.W. (1977) – Subgrid-scale condensation in cloud models. *J. Atmos. Sci.*, Vol. 34, p. 344-355.
- SOMMERIA G. et LE MONE M. (1978) – Direct testing of a three-dimensional Model of the Planetary boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, Vol 35, 25-39.
- VAUCLIN M. – Modélisation des transferts de masse et de chaleur entre le sol et l'atmosphère. A paraître dans *J. Rech. Atmos.*

III – RAYONNEMENT ATMOSPHERIQUE

J. LENOBLE

Université des Sciences et Techniques de Lille
Laboratoire d'Optique Atmosphérique – B.P. 36 – 59650 VILLENEUVE D'ASCO

Pendant la période 1975-1978 les équipes françaises ont développé le réseau de mesures au sol, tandis que se précisait l'importance des échanges radiatifs dans les basses couches et leur interaction avec les échanges turbulents.

Par ailleurs deux grands axes de recherche se sont développés rapidement, concernant d'une part les interactions rayonnement-dynamique-thermodynamique avec une finalité climatologique, d'autre part les problèmes de télédétection incluant l'étude directe des paramètres atmosphériques et la correction des effets atmosphériques en télédétection terrestre.

MESURES AU SOL ET ECHANGES RADIATIFS DANS LES BASSES COUCHES

1 – Flux et bilan radiatif au sol

La Météorologie Nationale [11-60-61] effectue la collecte et l'étude statistique des données horaires de 22 stations de mesure du rayonnement solaire global (surface horizontale) et de 2 stations de mesures des rayonnements solaires direct et diffus. Elle a mis en place 5 nouvelles stations de mesure du rayonnement diffus (surface horizontale) et 2 stations complètes destinées à l'étude des composantes (directe et diffuse) du rayonnement solaire incident sur des surfaces inclinées à fine échelle de temps (6 minutes). Enfin elle a étudié et réalisé un pyrromètre et débuté la mise en place d'un réseau de stations de mesure du rayonnement terrestre provenant de l'atmosphère. La mesure des différents éléments du bilan radiatif (rayonnement global, réfléchi, diffus, et durée d'insolation) est en routine depuis plusieurs années à la station de Bioclimatologie de l'Institut National de Recherches Agronomiques (INRA) à Montfavet [53-54]. Ce bilan est mesuré également en permanence à la station de Bioclimatologie de l'INRA à Versailles [55].

2 – Turbidité atmosphérique

La turbidité atmosphérique est mesurée par transmission du rayonnement direct en 4 stations de la Météorologie Nationale. Un programme de mesure systématique du trouble atmosphérique (facteurs de LINKE et d'ANSTROM) est en cours également à la station INRA de Montfavet depuis deux ans en relation avec les problèmes de pollution atmosphérique ; des programmes de calcul ont été développés dans le cadre des études d'impact des tours de réfrigération atmosphérique des centrales nucléaires [1-2-3-4]. Des mesures de turbidité sont également effectuées par le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille (LOA) et l'Université d'Abidjan en liaison avec les études de climatologie et de télédétection [16].

3 – Interface atmosphère-océan

L'étude des interactions entre les transferts turbulents et radiatifs de chaleur dans la basse atmosphère et dans la couche mélangée marine, au niveau des flux moyens d'une part,

et au niveau des structures turbulentes elles-mêmes, a été poursuivie à l'Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence de Marseille [19-20-21]. Le LOA a également étudié ce problème des bilans radiatifs à l'interface océan-atmosphère et les conditions d'établissement d'une couche froide superficielle [26].

INTERACTIONS RAYONNEMENT DYNAMIQUE DANS L'ATMOSPHERE CLIMATOLOGIE

1 – Modélisation des nuages et des flux radiatifs

Le LOA a développé des méthodes rapides pour le calcul des flux radiatifs solaires et infrarouges dans les nuages (Double-Delta Eddington, Noyau Exponentiel) [15-32-35-36-56] et les a testées en comparaison avec des méthodes précises (Harmoniques Sphériques) [29-30-45-47-49]. L'absorption gazeuse en présence de diffusion est traitée en utilisant soit la distribution du chemin optique des photons diffusés, soit la distribution de la quantité d'absorbant ; cette distribution est obtenue par une méthode originale utilisant les approximations de Padé [33-34-37].

Ces calculs de flux ont été introduits dans un modèle intégral de la couche limite planétaire développé par le Laboratoire Associé de Météorologie Physique de Clermont-Ferrand (LAMP) et le Laboratoire de Physique des Aérosols et de Radioactivité Atmosphérique de Brest [38-39].

2 – Paramétrisation des nuages stratiformes et calcul des flux radiatifs dans un GCM

Le programme de calcul des flux solaires développé par le LOA a été introduit comme sub-routine dans le modèle de circulation générale (GCM) du Laboratoire de Météorologie Dynamique de Paris (LMD) ; l'introduction des flux infrarouges est en cours. Les études faites sur la modélisation des nuages préparent la paramétrisation de ceux-ci dans le GCM.

D'autre part le LMD et le Laboratoire d'Energétique Solaire d'Odeillo ont proposé une approche statistique du problème de la paramétrisation des flux radiatifs de grande longueur d'onde [69]. En comparant des mesures in situ de la divergence des flux radiatifs infrarouges aux caractéristiques des situations synoptiques, on cherche à mettre en évidence l'influence de la vapeur d'eau et des nuages stratiformes de grande étendue. Les dispositifs expérimentaux ont été mis au point au cours des deux dernières années et une première expérience a eu lieu en septembre 1978 à Biscarosse.

3 – Expérience Nephos

Cette campagne, organisée conjointement par le LAMP, le LOA et le LMD, a eu lieu en septembre 1977 sur la Manche [38]. Elle avait pour but de mesurer simultanément et aussi complètement que possible sur une zone bien délimitée, les champs dynamiques et thermodynamiques, la nébulosité et les caractéristiques radiatives des nuages (c'est-à-dire essentiellement la teneur en eau qui commande leur épaisseur optique et leur température de surface) et enfin les flux radiatifs visibles et infrarouges. Les résultats sont en cours de traitement et seront analysés à l'aide du modèle de couche limite.

4 – Rôle climatique des aérosols

Cette étude menée conjointement par le LOA et l'Université d'Abidjan utilise les programmes de calculs radiatifs décrits ci-dessus. La partie expérimentale de ce travail consiste en la mesure des albedos de sol et de la divergence des flux radiatifs dans les brumes sèches au-dessus de l'Afrique de l'Ouest, le long d'une ligne Abidjan-Gao et d'une surveillance en continu à partir de stations météorologiques réparties sur le territoire Africain de la turbidité de l'atmosphère et des flux au sol.

TELEDETECTION DES RAYONNEMENTS ATMOSPHERIQUES

1 - Télédétection des paramètres atmosphériques

L'office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales (ONERA) participe à l'expérience LIMS (Limb Infrared Monitor of the Stratosphere) [14-50] embarqué sur Nimbus G et qui a pour but la détermination des profils verticaux de température et de concentration de O_3 , H_2O , NO_2 et HNO_3 ; des expériences de validation à bord de ballons stratosphériques par spectrométrie d'absorption sont prévues en synchronisme avec le passage du satellite ; une expérience préliminaire a été effectuée.

L'étude du rayonnement infrarouge des nuages est effectuée par le LMD au cours d'expériences aéroportées utilisant la radiomètre ARIES [23-57-74-75]. La campagne la plus importante a eu lieu en mars-avril 1977 en collaboration avec la NASA. Les résultats obtenus doivent d'une part aider au développement d'algorithmes à introduire dans les études satellitaires de la couverture nuageuse et d'autre part, grâce à la haute résolution thermique et spatiale des mesures, à améliorer notre connaissance du bilan radiatif des nuages.

Au LMD pour tenter de relier l'altitude des phénomènes observés sur une image du satellite Nimbus-5 dans le canal $6-7 \mu m$ au contenu en vapeur d'eau, on a effectué des calculs synthétiques des radiances et on a montré que l'altitude du pic de contribution de la fonction poids dépend essentiellement du profil de vapeur d'eau [63]. Ce travail est actuellement poursuivi en utilisant les images du satellite Météosat, pour obtenir une paramétrisation de la radiance en fonction de l'altitude des phénomènes.

Un spectroradiomètre à réseau a été construit au laboratoire d'énergie solaire d'Odeillo et le spectre d'émission de l'atmosphère a été comparé aux valeurs calculées [65].

Au LOA on a montré que la mesure de la différence des deux composantes polarisées du rayonnement infrarouge émis par la surface de la mer est sensible à la présence d'absorbants sur le trajet atmosphérique [25]. Théoriquement, en choisissant les bandes spectrales on peut ainsi accéder à une mesure du contenu en vapeur d'eau indépendamment de la présence de nuages dans le champ de l'appareil. Un prototype aéroporté utilisant plusieurs canaux entre 8 et $14 \mu m$ est actuellement testé.

2 - Spectroscopie atmosphérique

Les recherches poursuivies au LMD par l'équipe de Spectroscopie Théorique Atmosphérique ont porté sur les problèmes directs et inverses posés par l'étude des phénomènes de transfert radiatif dans une atmosphère, ainsi que sur le calcul et l'amélioration des données spectroscopiques concernant les molécules actives dans l'infrarouge [17-18-70]. Ces thèmes sont développés en vue du traitement des données des expériences TVOS (Satellite TIROS-N), VOYAGER (mission vers Jupiter et Saturne), VENERA-83 (radiométrie submillimétrique ; mission vers Vénus), ARIES (radiométrie différentielle pour l'étude des températures de surface).

A l'ONERA des calculs à haute résolution (10^{-3} cm^{-1}) de la transparence atmosphérique et de la radiance énergétique observable au Limbe terrestre ont été effectués sur les deux canaux spectraux NO_2 et O_3 des radiomètres LIMS. Ces calculs sont basés sur l'emploi de données spectrales établies en laboratoire à l'ONERA pour NO_2 , à l'Université de Reims pour O_3 . Les calculs effectués doivent servir de base au dépouillement opérationnel du canal NO_2 du radiomètre LIMS.

A l'observatoire de Meudon le groupe d'Infrarouge Spatiale a développé une méthode de simulation numérique des spectres de transmission et d'émission de la basse atmosphère dans la gamme $10 \mu m-1 \text{ mm}$. Le calcul est effectué raie par raie et inclue H_2O , CO_2 , O_3 , N_2O , CO , O_2 . Des observations du spectre d'émission ont été effectuées au Pic du Midi dans la bande $17,5-20 \mu m$ et en avion volant à 13 km dans la bande $70-100 \mu m$ [5-6-52].

3 – Méthodes d'inversion

Au Groupe Planètes de l'Observatoire de Meudon et au Centre National d'Études de Télécommunications, on a étudié le contenu d'information dans une télédétection du profil thermique par analyse de FOURIER et procédure d'échantillonnage de SHANNON [41].

Au LOA, une étude a été consacrée à l'information contenue dans le rayonnement de diffusion multiple pour la télédétection des aérosols [31].

Enfin le Centre de Météorologie Spatiale de Lannion (CMS) a entrepris une étude systématique des diverses méthodes d'obtention du profil thermique [42-56-67-68].

4 – Correction des effets atmosphériques en télédétection des sols ou de l'océan

Dans le domaine de l'infrarouge thermique, l'effet atmosphérique qui peut être de plusieurs degrés a été étudié par le Groupe de Recherche en Télédétection Radiométrique de Strasbourg (GTS) et le LOA.

Le GTS a mis au point en collaboration avec le LMD [7-8-9-10] un modèle de correction pour atmosphères claires fondé sur la linéarisation des équations de transfert et de la fonction de PLANCK et sur l'hypothèse que l'essentiel de l'absorption variable est dû à la vapeur d'eau. Dans le cas d'une mesure faite dans 2 canaux la température T_s de surface est reliée aux mesures T_1 et T_2 faite dans chacun des canaux par une relation linéaire qui a été vérifiée avec succès sur la mer Méditerranéenne et sur le Rhin. La précision obtenue a toujours été dans les cas étudiés meilleure que $\pm 0,3^\circ\text{C}$.

Le LOA [24-26-28-62] a étudié la correction statistique sur le Proche-Atlantique en utilisant les données du navire météorologique stationnaire au point K pour la bande spectrale 10,5-12,5 μm couramment utilisée par l'expérience VHRR des satellites NOAA. Une méthode multispectrale utilisant plusieurs bandes spectrales dans l'infrarouge permet également d'effectuer cette correction ; l'optimisation de la méthode multispectrale a été étudiée, et son application à l'expérience AVHRR sur les satellites TIROS-N envisagés.

Une méthode d'histogrammes permettant une discrimination des nuages et de la mer a été mise au point au CMS [22-58-79-80].

Le LOA a également étudié le problème d'élimination de l'effet atmosphérique en télédétection du rayonnement visible [27-76-77-78]. Des algorithmes de correction sont mis au point pour l'étude de la couleur de l'océan par l'expérience CZCS (Coastal Zone Color Scanner) sur le satellite NIMBUS-G. L'effet des aérosols sur la réduction des contrastes a été étudié pour le satellite SPOT.

- [1] BAILLE A., MERMIER M., REICH P. (1976) – Mise au point d'un programme de dépouillement et d'exploitation de mesures de rayonnement (bilan radiatif, facteur de trouble). Note technique INRA, 76/5.
- [2] BAILLE A., REICH P., SEGUIN B. (1978) – Calcul des réductions d'insolation dues aux panaches des réfrigérants atmosphériques, (à paraître).
- [3] BAILLE A., MERMIER M. – Etude du trouble atmosphérique en zone semi-rurale (Montfavet). I – Evolution du trouble pendant le 1er semestre 1976. *Ann. Agron.*, 28, (5), 543-560.
- [4] BAILLE A., GUICHERD R., MERMIER M. (1978) – Le pyranomètre sélectif : étude de ses possibilités d'utilisation dans le domaine agronomique et dans celui de la pollution atmosphérique. *Ann. Agron.*, 29, (1), 59-78.
- [5] BALUTEAU J.P., MARTEN A., BUSSOLETTI E., ANDEREGG M., BECKMAN J.E., MOORWOOD A.F.M., CORON N. (1977) – High Resolution Infrared Spectra of the Earth's Atmosphere. - II - Ground based observations in the 500-570 cm^{-1} range. *Infrared Physics*, 17, 211-224.
- [6] BALUTEAU J.P., MARTEN A., BUSSOLETTI E., ANDEREGG M., BECKMAN J.E., MOORWOOD A.F.M., CORON N. (1977) – High Resolution Infrared Spectra of the Earth's Atmosphere. - III - Airborne observations in the 100-140 cm^{-1} range. *Infrared Physics*, 17, 283-291.

- [7] BECKER F., IMBAULT D., PONTIER A. (1977) – Sea surface temperature and atmospheric transmission. Measurements by differential radiometry. Proceedings of the First General Assembly EARSEL, Strasbourg.
- [8] BECKER F. (1978) – Température superficielle de la mer et la transmission atmosphérique par radiométrie différentielle. - Pub. *C.N.E.X.O. Actes Colloq. n° 5*, Brest.
- [9] BECKER F., PONTIER L. (1978) – Mise en oeuvre d'un radiomètre embarquable et mesure superficielle de la mer. *Rapport DRME*.
- [10] BECKER F., BLUMENROEDER D., DESCHAMBENOY C., HECHINGER E., HOURANI A., PELLEGRIN A., RAMEY B., TRAUTMANN J. – Thermographie de la surface du Rhin par télédétection radiométrique infrarouge. GTS 78/4.
- [11] BEDEL, CERON, JAN (oct. 1977) – Le rayonnement solaire à Trappes. - *Météorologie Nationale*. Le rayonnement solaire à Carpentras. – *Météorologie Nationale* (oct. 1977).
- [12] BENSIMON. DEHOVE B. (avril 1977) – Modèle thermique uni-dimensionnel. - COVOS Rapport n° 6B - *Aerospatiale, A/DT/P n° 37*.
- [13] BENSIMON J., DEHOVE B. (February 1978) – One-dimensional radiative-convective model. - 2nd meeting of study groupe II, Brussels.
- [14] BOUCHARDY A.M. (novembre 1978) – Calcul d'échanges radiatifs dans la stratosphère. Application aux canaux NO₂ et O₃ du radiomètre LIMS. - Communication réunion CNES-DGRST, 28-29.
- [15] BIGOURG-BROGNIEZ C. (1975) – Calcul approché des flux radiatifs en milieu diffusant. Application aux mesures de Venera 8 - Thèse de 3^e cycle, Université de Lille I.
- [16] CERF A. (août 1976) – Atmospheric Turbidity Measurements in West-Africa. - *Int. Symposium on Radiation in the Atmosphere*, Garmisch-Partenkirchen, RFA, p. 16.
- [17] CHEDIN A. (novembre 1977) – Importance des mesures de laboratoire à haute précision pour l'étude des phénomènes de transfert radiatif atmosphérique. (Opération GEISA : Gestion et Etude des Informations Spectroscopiques Atmosphériques). Rencontre "Spectroscopie Moléculaire de Fourier à Haute Résolvançe", RCP 453, Orsay.
- [18] CHEDIN A., HUSSON N., SCOTT N.A., GAUTIER D. (1978) – V₄ band of methane (¹²CH₄ and ¹³CH₄) Line parameters and evaluation of Jovian atmospheric transmission at 7.7 μm. *J. Mol. Spectros. 71*, 343.
- [19] COANTIC M. (1976) – La turbulence dans la couche de surface atmosphérique, partie VI, p. 300-362. Problèmes divers, partie VII, p. 364-369. "La turbulence en mécanique des fluides" par FAVRE A., KOVASZNY L.S.G., DUMAS R., GAVIGLIO J., COANTIC M. Dunod Editeur.
- [20] COANTIC M. (July 1978) – An introduction to turbulence in geophysics and air-sea interactions. *AGARDograph n° 232*.
- [21] COANTIC M. (1978) – Les mécanismes couplés de transfert et transformation d'énergie à travers l'interface océan-atmosphère ("Coupled energy transfer and transformation mechanisms across the ocean-atmosphere interface"). *Proceedings Sixth International Heat Transfer Conference*, Toronto, Canada, August 7-11, vol. 6 and 7.
- [22] DAGO D., LEBARF C.D. (juin 1977) – Définition de la température de la mer en surface par des méthodes statistiques à l'aide des mesures de radiançe VHR et VTPR. *Mémoire de fin d'études. Ecole Météo*.
- [23] DESBOIS M., SZEJWACH G. (août 1976) – Analysis of meteorological satellite data on the DIVISET interactive system. *Int. Symposium on Radiation in the Atmosphere*, Garmisch-Partenkirchen, RFA.
- [24] DESCHAMPS P.Y., PHULPIN T. (6/11 mars 1978) – Elimination de l'effet de l'atmosphère et optimisation des bandes spectrales d'un radiomètre infra-rouge à un ou deux canaux pour la mesure de la température de surface des sols. *Int. Conference on Earth Observation from Space and Management of Planetary Resources*. Toulouse. (ESA SP 134) p. 347-353.
- [25] DESCHAMPS P.Y., PHULPIN T. (août 1976) – Remote sensing from space of the infrared transmission of the atmosphere using polarization radiometry. *Int. Symposium on Radiation in the Atmosphere*, Garmisch-Partenkirchen, RFA.
- [26] DESCHAMPS P.Y. (mai 1977) – Télédétection de la température de surface de la mer par radiométrie infrarouge. Technique de mesure, corrections et applications. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Lille I.
- [27] DESCHAMPS P.Y., TANRE D. (1978) – Corrections atmosphériques pour la télédétection de la couleur de l'océan. *Pub. C.N.E.X.O., Actes Colloq. n° 5*, 133-140, Brest.
- [28] DESCHAMPS P.Y., PHULPIN T. (1978) – Correction des données obtenues par télédétection dans l'infrarouge. *Pub. C.N.E.X.O., Actes Colloq. n° 5*, 123-131. Brest.
- [29] DEUZE J.L., DEVAUX C., HERMAN M. (1975) – Adaptation de la méthode des harmoniques sphériques au calcul de la lumière diffusée polarisée. Remarques sur la formation du rayonnement rediffusé par une atmosphère optiquement dense. *Nouv. Rev. Opt.* 6, 103-111.
- [30] DEVAUX C. (mai 1977) – Contribution à l'étude de la couverture nuageuse de Vénus, par l'analyse des mesures photométriques et des profils de flux solaire transmis. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Lille I.
- [31] DEVAUX C., HERMAN M., LENOBLE J., SIEWERT C.E. (juin 1978) – Remote sounding of aerosols from multiple scattering measurements. *XXI Plenary Meeting on COSPAR*. Symposium on Remote Sounding of the Atmosphere Paper C-6-4, Innsbruck, Autriche.

- [32] FOUQUART Y. (1974) – Accurate Computations of Fluxes and Heating Rates in Case of Cloudy Atmospheres. *1st IAMAP-LAPSO Conjugued Assembly, Melbourne Australia.*
- [33] FOUQUART Y., BURIEZ J.C. (octobre 1975) – Transfert du rayonnement dans un milieu absorbant et diffusant. *AGARD Symposium "Optical Propagation in the Atmosphere", Lyngby Danemark.*
- [34] FOUQUART Y. (mai 1975) – Utilisation des Approximants de Padé pour l'inversion de la Transformée de Laplace. *Congrès EUROMECH 58.*
- [35] FOUQUART Y., PRUVOST P., LENOBLE J. (1975) – A Check for the Computation of Fluxes and Heating Rates in Cloudy Atmospheres. Second Conference on Atmospheric Radiation-American Meteorological Society, *Arlington, Virginia.*
- [36] FOUQUART Y., BONNEL B., MORCRETTE J.J. (août 1976) – Parameterization of Fluxes and Heating Rates in Cloudy Atmospheres. *International Symposium on Radiation in the Atmosphere, Garmish-Partenkirchen R.F.A.*
- [37] FOUQUART Y. (mars 1975) – Contribution à l'étude des spectres réfléchis par les atmosphères planétaires diffusantes. Application à Vénus. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Lille I.
- [38] FOUQUART Y. (août 1977) – Radiation Budgets Computations in Cloudy Atmospheres for Climate Modelling. IAGA-IAMAP Joint Assembly, Seattle, USA.
- [39] FOUQUART Y., MORCRETTE J.J., FRAVALO C., ROSSET R. (June 1978) – Computations of Radiative Fluxes in Clouds. Application to Cloud Modelling. *This of Conference on Atmospheric Radiation American Meteorology Society, Davis California.*
- [40] FYMAT A.L., LENOBLE J. – Inverse Multiple Scattering Problems. III - Inadequacy of Certain Limb Darkening and Phase curves for Retrieving Atmospheric Information and Limitations of Approximate Scattering Models. *J. Quant. Spect. and Rad. Transfer* (sous presse).
- [41] GAUTIER D., RIVAH I. (1975) – Sounding of Planetary Atmospheres : A Fourier Analysis of the Radiative Transfer Equation. *J. Atm. Sc. , 32, 881-892.*
- [42] HELARY J.M. (octobre 1978) – Restitution du profil vertical des températures. - II - Equation du transfert radiatif linéarisée. Etude de différentes méthodes numériques d'estimation linéaire et de stabilisation pour une équation intégrale de Fredholm de 1ère espèce avec second membre bruité. *Note technique EERM - Nouvelle Série n° 6.*
- [43] IMBAULT D., SCOTT N., CHEDIN A. (1978) – Détermination de la température de surface de la mer à partir de mesures radiométriques dans deux fenêtres atmosphériques. Colloque "Observation Spatiale de la Terre et la Gestion des Ressources Planétaires" (ESA-SP 134) Toulouse.
- [44] JULLIEN J.P., PASTRE C. (février 1977) – Etude de la télémétrie VTPR. *Note interne EERM n° 383.*
- [45] LENOBLE J. (1975) – Méthodes pour résoudre l'équation de transfert radiatif dans des couches d'épaisseur finie. *AGARD Symposium "Optical Propagation in the Atmosphere", Lyngby Danemark, 13-1, 13-9.*
- [46] LENOBLE J. (1976) – Influence de l'aérosol stratosphérique sur l'équilibre radiatif de la planète. *COVOS, Monographie n° 8. Aérosols - Edit. P. ZETWOG.*
- [47] LENOBLE J. (août 1976) – Comparison of Computation Techniques in Scattering Problems. *Int. Symposium on Radiation in the Atmosphere, Garmisch-Partenkirchen.*
- [48] LENOBLE J. (septembre 1976) – La modification du bilan radiatif par les aérosols et poussières. *XIV Journées de l'Hydraulique, Paris.*
- [49] LENOBLE J. (1977) – Review of Radiative Transfer Methods in Scattering Atmospheres. Interactive Workshop on Inversion Methods in Atmospheric Remote Sounding. Williamsburg, Virginia, décembre 1976, Edit. by A. DEEPAK, NASA CP 004.
- [50] LOUISNARD N., EICHEN G., GIRAUDET R., GIRARD A. (juillet 1978) – Preliminary Results of the Spectrometric Balloonborne Experiment Performed on May 15th 1978, *Rapport ONERA.*
- [51] MARTEN A., CHAUVEL Y. (1975) – Mesures des concentrations de constituants minoritaires dans la stratosphère. *C.R.Ac. Sc., 280, série B, 199-202.*
- [52] MARTEN A., BALUTEAU J.P., BUSSOLETTI E. (1977) – High Resolution Infrared Spectra of the Earth's Atmosphere. I Numerical Simulation of Atmospheric Data. *Infrared Physics 17, 197-209.*
- [53] MERMIER M., SEGUIN B. (1975) – Mesure et estimation du rayonnement net à Avignon-Montfavet. *Note technique INRA 76/4.*
- [54] MERMIER M., SEGUIN B. (décembre 1976) – Comment on "On a Derivable Formula for Longwave Radiation from Clear Skies" by W. BRUTSAERT. *Water Resources Research, 12, n° 6.*
- [55] MONTENY B., GOSSE G. (1976) – Analyse et estimation du rayonnement net d'une culture de panicum maximum en zone tropicale humide. *Ecologie Plantarum, 11, (2), 173-191.*
- [56] MORCRETTE J.J., FOUQUART Y. – Long Wave Radiative Budget of Cloud Layers. *J. Atm. Sc.* (sous presse).
- [57] MOREL P., DESBOIS M., SZEJWACH G. (June 1978) – A New Insight Into the Troposphere with the Water Vapor Channel of Meteosat. *Bull. Atm. Met. Soc., 59, 6.*
- [58] PASTRE C. (avril 1975) – Comparaison entre mesures satellitaires VHRR et analyse classique des températures de surface. Campagne européenne 16-28 septembre 1974. *Note interne EERM n° 360.*

- [59] PERRIN de BRICHAMBAUT C. (juillet 1975) – Estimations des ressources énergétiques solaires en France. *Cahiers AFEDES*, supplément au n° 1.
- [60] PERRIN de BRICHAMBAUT C. (mai 1976) – Evaluation du gisement solaire. *La Météorologie VI. 5*.
- [61] PERRIN de BRICHAMBAUT C. (janvier 1978) – Estimation du rayonnement solaire : les irradiances quotidiennes. *Météorologie Nationale*.
- [62] PHULPIN T. (novembre 1978) – Utilisation de la radiométrie infrarouge multispectrale pour la détermination de la température de surface. Thèse de 3^e cycle, Université de Lille I.
- [63] POC M.M., ROULLEAU M., SCOTT N., CHEDIN A. (juin 1978) – The Influence of the Vertical Distribution of Water Vapor on the Altitude of the Phenomena from a Nimbus-5 THIR 6-7 μm Picture. *XXI Plenary Meeting of COSPAR. Symposium on Remote Sounding of the Atmosphere, Paper C.3.5*, Innsbruck, Autriche.
- [64] PRUVOST P. (1975) – Etude du flux solaire et de l'échauffement radiatif dans la mer par temps clair. *Annales Hydrographiques*, 5^e série, 3, n° 1.
- [65] ROBERT C. (juillet 1976) – Contribution à l'étude du rayonnement infrarouge de l'atmosphère. Thèse de 3^e cycle, Paris VII.
- [66] ROCHARD G. (1975) – Introduction du VHRR dans l'exploitation du VTPR. *Rapport DGRST*.
- [67] ROCHARD G. (septembre 1978) – Restitution du profil vertical des températures. I - Principes et difficultés - Classification des méthodes. - *Notes technique EERM - Nouvelle Série n° 4*.
- [68] ROCHARD G. (1976) – Inversion du profil vertical des températures. - Equations de Fredholm de 1^{ère} espèce. *Rapport (Analyse numérique) DEA*, Université de Rennes.
- [69] ROULLEAU M. – Mesure des flux infrarouges dans la troposphère. A paraître dans la *Revue de Physique Appliquée* (numéro Spécial Energie Solaire).
- [70] SCOTT N., WORK D.Q. (mars 1975) – Computation of spectral transmittances in the 15 μm band of carbon dioxide for application to remote sounding of the atmosphere. Optical Society of America, Anaheim, Californie.
- [71] SCOTT N., CHEDIN A. (décembre 1977) – Problèmes en méthodes inverses pour la géophysique extérieure. *Rencontre Interdisciplinaire Problèmes Inverses RCP 264*, Montpellier.
- [72] SIEWERT C.E. (1975) – On a problem of uniqueness regarding H - function calculations. *J. Quant. Spect. Rad. Transfer* 15, 385-387.
- [73] SIEWERT C.E., DEVAUX C. (1978) – The effect of forward and backward scattering on the law of darkening for the Milne problem and the spherical albedo. *J. Quant. Spect. Rad. Transfer* 20, 29-33.
- [74] SZEJWACH G., DESBOIS M. (août 1976) – Airborne radiation measurements over clouds in the 8-9.5 μm and 10.5-12.5 μm regions. *Int. Symposium on Radiation in the Atmosphere*, Garmisch-Partenkirchen, RFA.
- [75] SZEJWACH G. (June 1978) – Infrared measurements over cirrus clouds in the 10.5-12.5 μm and 6-7 μm regions. *Third Conference on Atmospheric Radiation of the A.M.S.*, Davis, California.
- [76] TANRE D. (juin 1977) – Etude de l'influence des aérosols sur le rayonnement terrestre rétrodiffusé. Thèse de 3^e cycle, Université de Lille I.
- [77] TANRE D., HERMAN M. (août 1976) – Polarization of the Sunlight reflected by the terrestrial atmosphere with aerosols and a reflecting ground. *Int. Symposium on Radiation in the Atmosphere*, Garmisch-Partenkirchen, RFA.
- [78] TANRE D., HERMAN M. (mars 1978) – Correction de l'effet de diffusion atmosphérique pour les données de télédétection. Colloque "L'Observatoire Spatial de la Terre et la Gestion des Ressources Planétaires, (ESA-SP-134), p. 355-360, Toulouse.
- [79] TOURNIER B. (1976) – Influence de l'atmosphère sur une mesure satellitaire de température de surface dans la bande 10,5-12,5 μm - *Note interne EERM n° 376*.
- [80] TOURNIER B. (juin 1977) – Détermination des températures de surface de la mer à partir des mesures radiométriques satellitaires. *Note interne de l'E.E.R.M.*, n° 397, 1977. Thèse de 3^e cycle, Université de Brest.

IV – COUCHE LIMITE

J. SAISSAC

Terrestre et Marine

L'intérêt pour les problèmes de la couche limite atmosphérique qui s'était déjà manifesté au cours des périodes précédentes, s'est trouvé confirmé de 1975 à 1978 avec la participation aux travaux de recherche scientifique d'une quinzaine de laboratoires ou équipes, et avec des aides financières spéciales de la Délégation à la Recherche Scientifique et Technique, de l'Institut National d'Astronomie et Géophysique, de la Direction des Recherches et Etudes Techniques et de la Direction des Etudes et Recherches de l'Electricité de France.

I – THEORIE ET MODELISATION DE LA COUCHE LIMITE PLANETAIRE

Les progrès dans la théorie de la couche limite planétaire et dans la modélisation numérique apparaissent de plus en plus comme dépendants de recherches fondamentales en mécanique de la turbulence, et n'en sont guère dissociables.

J. BLANCHET (Ecole Nationale de la Météorologie) a poursuivi ses travaux dans ce domaine, qui ont abouti à une forme quasi définitive de la théorie basée sur l'hypothèse des équilibres relaxatifs. A l'Etablissement d'Etudes et de Recherches Météorologiques J-C. ANDRE et une importante équipe de chercheurs se sont consacrés à l'amélioration et à l'application d'une approche statistique de la turbulence inhomogène, dite approximation d'écrêtage. La dynamique des paramètres moyens et des corrélations doubles et triples y est décrite explicitement grâce aux équations d'évolution qu'il est possible de déduire de celles de la mécanique des fluides ; l'approximation quasi-normale y est utilisée pour la fermeture du système et la vraisemblance de l'écoulement préservée par l'application de l'inégalité de SCHARTZ. Des modèles numériques ont été construits sur ces bases pour rendre compte de deux types d'écoulement, l'un, sans effet thermique, dans un canal asymétrique, l'autre purement convectif. La validité des modèles, vérifiée sur des expériences de laboratoire, a permis d'aborder le cas, plus complexe, de la couche limite planétaire. Le régime convectif diurne a été ainsi étudié, les efforts actuels portant sur le régime nocturne, plus particulièrement sur les jets de basse couche et les effets radiatifs.

Au Laboratoire de Météorologie Dynamique (CNRS), G. SOMMERIA a continué ses recherches sur la simulation numérique de la couche limite planétaire et s'est attaché à étendre son modèle initial au cas d'une atmosphère comportant des nuages convectifs non précipitants. Ainsi était posée la question de la représentation des phénomènes de condensation aux échelles inférieures à la maille ; ce type de recherche a été entrepris avec l'introduction généralisée de variables conservatives et l'adjonction d'une équation d'évolution de l'énergie cinétique turbulente aux mêmes échelles. Un égal intérêt est porté actuellement à la représentation des précipitations en essayant de tenir compte au maximum des interactions turbulentes entre des caractéristiques du cycle de l'eau et les autres variables. Par ailleurs il était procédé à la comparaison des résultats de la simulation numérique avec les observations, plus précisément celles fournies par l'avion expérimental du NCAR, et les résultats sont considérés comme encourageants. Dans le même esprit, mais adoptant la simulation tridimension-

nelle comme base de comparaison, l'on a cherché à vérifier les hypothèses émises par certains spécialistes de la paramétrisation de la couche limite (généralement considérée à une dimension) et de la convection.

THESES

- ANDRE J.C. (1976) – "Une approche statistique de la turbulence inhomogène". Thèse de Doctorat ès-Sciences, Université Pierre et Marie Curie.
- SOMMERIA G. (déc. 1974) – "Modèle tridimensionnel pour la simulation numérique de la couche limite planétaire". Thèse de Doctorat ès-Sciences, Université Pierre et Marie Curie.
- BENISTON M. (juin 1978) – "Utilisation d'un modèle tridimensionnel pour étudier les cumulus des alizés et la paramétrisation de leurs effets sur le champ turbulent de la couche limite tropicale". Thèse 3^e cycle, Université Paris. P. et M. Curie.

PUBLICATIONS

- BLANCHET J. (1975) – "Concepts nouveaux sur la mécanique de la turbulence". *La Météorologie VI*, n° 1, n° 2, n° 3.
- BLANCHET J. (1977) – "Extension de la méthode des équilibres turbulents aux écoulements fortement contraints". *La Météorologie VI*, n° 8.
- DEMOOR G. (1975) – "La turbulence dans la couche limite atmosphérique. 1ère partie : paramétrisation des flux turbulents". *La Météorologie VI*, n° 1.
- DEMOOR G., ANDRE J.C. (1975) – "La turbulence dans la couche limite atmosphérique. 2ème partie : modélisation de la couche limite". *La Météorologie VI*, n° 3.
- POUQUET A., LESIEUR M., ANDRE J.C., BASDEVANT C. (1975) – "Evolution of high REYNOLDS number two-dimensional turbulence". *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 72, part. 2.
- ANDRE J.C., LACARRERE P. (1975) – "Les ondes de gravité internes et leur traitement numérique dans les modèles de couche limite atmosphérique". *La Météorologie V*, n° 33.
- ANDRE J.C. (1976) – "A third-order-closure model for the evolution of a convective planetary boundary layer". Seminars on the treatment of the boundary layer in numerical weather predictions. Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme.
- ANDRE J.C., DEMOOR G., LACARRERE P., du VACHAT R. (1976) – "Modélisation des flux turbulents dans la couche convective". *Lecture Notes in Physics*, Vol. 58.
- ANDRE J.C., DEMOOR G., LACARRERE P., du VACHAT R. (1976) – "Turbulence approximation for inhomogeneous flows". *Journal Atmospheric Sciences*, vol. 33, n° 3.
- ANDRE J.C., LESIEUR M. (1977) – "Influence of helicity on the evolution of isotropic turbulence at high REYNOLDS number". *Journal Fluid Mechanics*, Vol. 81, part 1.
- du VACHAT R. (1977) – "Realizability inequalities in turbulent flows". *Physics Fluids*, vol. 20, n° 4.
- SOMMERIA G. (1976) – "Three-dimensional simulation of turbulence processes in an undisturbed trade wind boundary layer". *Journal Atmospheric Sciences*, vol. 33, p. 216-241.
- SOMMERIA G., DEARDORFF J.W. (1977) – "Sub-grid scale condensation in cloud models". *Journal Atmospheric Sciences*, vol. 34, p. 344-355.
- SOMMERIA G., LE MONE M.A. (1978) – "Direct testing of a three-dimensional model of the planetary boundary layer against experimental data". *Journal Atmospheric Sciences*, Vol. 35, p. 25-39.

II – PHYSIQUE DE LA COUCHE LIMITE PLANETAIRE

L'étude physique de la couche limite planétaire a pris une nouvelle ampleur avec 1) au plan des moyens, l'emploi courant de l'avion expérimental et du sondeur acoustique, et l'équipement d'un site commun dans la plaine de Beauce, 2) au plan thématique, un intérêt plus marqué pour le caractère évolutif de la couche (notamment en régime convectif), et sa variation diurne, ainsi que pour les mécanismes qui, à sa partie supérieure, définissent le rôle de l'inversion thermique fréquemment présente. Cette orientation, partiellement dérivée des besoins de la modélisation, s'exprime encore par de nombreux travaux sur la "paramétrisation" des moments statistiques.

On peut considérer que l'ensemble de ces thèmes a été abordé au Laboratoire Associé

de Météorologie Physique (Université de Clermont II, CNRS). A partir de mesures acquises sur avion, B. GUILLEMET et S. JOUVENEUX ont comparé les moments statistiques normalisés des second et troisième ordre avec ceux obtenus par DEARDORFF. Il en résulte un bon accord pour les paramètres liés à la convection ; par contre la structure de la turbulence intervenant dans les transferts de quantité de mouvement s'avère ne pas dépendre seulement des échelles caractéristiques internes. L'étude du transfert de la quantité de mouvement fut également entreprise par l'analyse du vent géostrophique et du vent réel au cours du cycle diurne. La conclusion en est actuellement que, pour être significative, une telle variation diurne devrait être considérée à une échelle d'espace nettement supérieure à celle qui est habituellement adoptée.

A l'aide d'un sondeur acoustique associé à un dispositif de mesures directes, G. DUBOS-CLARD a observé l'évolution matinale de la couche et a montré que l'entraînement sommital en régime peu convectif est piloté par le cisaillement avant que le flux de chaleur au sol ne soit devenu prépondérant par rapport à celui, négatif, qui est évalué à la base de l'inversion thermique. Cette dernière n'est d'ailleurs plus regardée comme une simple barrière pour les échanges verticaux. C'est ainsi que P. MASCART, étudiant également l'entraînement sommital, s'est particulièrement intéressé aux fluctuations des variables dynamiques (mesurées par avion) près de l'inversion. Après avoir identifié des ondes par une méthode spectrale, il a analysé les conditions de leur développement ; il en résulte notamment que l'évolution de l'instabilité présente un caractère cyclique jusqu'à l'établissement de profils d'équilibre.

Compte tenu de la possibilité de connaître les moments statistiques de la turbulence, R. ROSSET et F.X. LE DIMET ont développé un modèle de diffusion, fondé sur un processus gaussien-markovien, qui puisse se greffer aussi bien sur un modèle numérique de couche limite que sur des données expérimentales ; il est actuellement "calibré" avec celles de R.W. STEWART et G.T. CSANADY.

Au Laboratoire de Physique des Aérosols et des Echanges Atmosphériques (Université de Toulouse III), l'équipe de A. DRUILHET s'est consacrée à l'étude des transferts turbulents. Des campagnes de mesures par avion ont été effectuées qui devaient permettre de déterminer les paramètres d'échange et leurs caractères spectraux pour l'ensemble de la couche sur des sites et par des états atmosphériques nettement différenciés. Parmi les processus de transfert une importance nouvelle a été portée aux "thermiques", qui ont été étudiés individuellement, en collaboration avec des scientifiques de la République Fédérale Allemande, à l'aide de motoplaneurs équipés pour les mesures atmosphériques.

La détermination de la diffusion matérielle sur les traceurs radioactifs naturel (radon et thorium B), méthode assez sensible, dont l'emploi est une des premières vocations de ce laboratoire, avait déjà apporté une information détaillée sur la distribution des coefficients d'échange dans l'ensemble de la couche et D. GUEDALIA avait établi la relation de ceux-ci avec la stabilité verticale. Ces données ayant été appliquées à l'évaluation des flux de vapeur d'eau, il est apparu qu'au sein de l'inversion thermique supérieure les grandeurs ainsi obtenues étaient nettement plus élevées que celles fournies par les mesures d'avion et la méthode corrélationnelle. Pour lever cette contradiction de nouvelles expériences ont été entreprises consistant à mesurer directement la diffusion matérielle par l'observation de "floccons" visibles produits au sein même de la couche d'inversion. Par ailleurs une étude statistique à partir des données de radio-sondages du réseau météorologique a fait ressortir la forte occurrence de ce type d'inversion et sa persistance nocturne.

A l'établissement d'Etudes et de Recherches Météorologiques, J-P. GOUTORBE, utilisant des mesures recueillies au cours de deux campagnes où étaient associés divers moyens (sondages par ballon, avion, sondeur acoustique) a établi des profils verticaux de flux de chaleur et de vapeur d'eau, ainsi que les principaux termes du bilan d'énergie cinétique, cela en phase convection marquée. Ses travaux sont axés actuellement sur des situations peu convectives, et sur la formation et l'évolution des inversions de "sol" avec prise en compte des effets radiatifs.

Au Centre de Recherches en Physique de l'Environnement (CNET, CNRS), A. WEILL a développé l'emploi du sondeur acoustique Doppler pour l'étude de la dynamique des inversions de température, des ondes de gravité à la limite supérieure de la couche, de la turbulence et de sa paramétrisation, des cellules convectives, des transitions matinales et nocturnes. L'étude de la mesure et de l'évolution des profils de vitesse par système à trois antennes a été également entreprise. Parmi les principaux résultats obtenus, il est à signaler la détermination du profil vertical du flux de chaleur dans la couche bien mélangée et une formulation de la fonction de structure de température par rapport à l'altitude.

Dans le cadre plus général d'une analyse de la mousson d'été sur l'Océan Indien, D. CADET et ses collaborateurs ont apporté des premières informations sur le comportement de la couche limite tropicale par le relevé, sur de vastes étendues, de trajectoires à 500, 1000 et 1500 m. Ce résultat a pu être obtenu grâce à la mise au point au même Laboratoire de Météorologie Dynamique (CNRS) d'une technique de ballons à niveau constant ayant une durée de vie moyenne de 4 à 5 jours.

Hors les cas de convection pénétrante, qui peuvent y être assimilés, certaines "déformations" de la couche limite planétaire font l'objet d'une attention particulière. Ainsi, H. SAUVAGEOT (Observatoire du Puy de Dôme), utilisant un couple de radars Doppler de 5 cm a entrepris d'observer les changements intervenant sur le champ de vitesse horizontale lors d'une perturbation dépressionnaire ; J-P. PAGES et J. SAISSAC (Observatoires du Pic du Midi et de Toulouse) ont poursuivi l'étude des effets de la discontinuité terre-mer.

THESES

- JOUVENEUX S. (avril 1978) - "Etude expérimentale de la structure turbulente de la couche de mélange convective". Thèse 3^e cycle, Université Clermont II.
- GUEDALIA D. (1975) - "Détermination des échanges verticaux de matière dans la couche limite planétaire". Thèse Doctorat ès-Sciences, Université de Toulouse III.
- N'TSILA A. (1977) - "Surveillance de la stabilité verticale de l'atmosphère à l'aide du radon et du SODAR". Thèse 3^e cycle, Université de Toulouse III.
- MASCART P. (mars 1977) - "Etude des ondes de gravité, des instabilités dynamiques et des microstructures dans la couche stable claire de la couche limite planétaire convective". Thèse de Doctorat ès-Sciences, Université de Clermont II.
- OLORY-TOGBE P. (1977) - "Contribution à l'étude de la mousson d'été au-dessus de l'Océan Indien à l'aide de trajectoires de ballons plafonnants". Thèse 3^e cycle, Université de Pierre et Marie Curie.

PUBLICATIONS

- GUILLEMET B., MASCART P., RAVAUT M., ISAKA H. (1977) - "Calibrage autonome et correction d'un système aéroporté pour la mesure du vent horizontal". *Journal de Recherches Atmosphériques*, XI, p. 9.
- MASCART P., GUILLEMET B., ISAKA H. (1978) - "Ondes de gravité interfaciales marginalement instables dans la couche limite planétaire". *Boundary Layer Meteorology*, 14, p. 283.
- MASCART P., GUILLEMET B., ISAKA H. - "An experimental study of unstable waves within a low-level inversion capping a convective boundary layer". *Boundary Layer Meteorology* (à paraître).
- LE DIMET F.X., ROSSET R. (1978) - "Un schéma lagrangien de diffusion turbulente". *Journal de Recherches Atmosphériques*, XII, n° 1.
- GUEDALIA D., DRUILHET A., FONTAN J. (1975) - "Détermination des échanges verticaux moyens dans la couche limite planétaire à partir des données statistiques obtenues par les radio-sondages de température". *Boundary Layer Meteorology*, 7, p. 457.
- GUEDALIA D., DRUILHET A., FONTAN J. (1975) - "Détermination des flux verticaux de vapeur d'eau entre la couche limite planétaire et l'atmosphère libre". *Tellus*, XXVII, 6, p. 552.
- BARDEAU H., COSTECALDE A., BOUCHARDY A.M., FONTAN J. (1976) - "Monitoring de la pollution atmosphérique au-dessus d'un site urbain par mesures Lidar". *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 114.
- AUBRY M. (1975) - "Etudes de l'atmosphère par SODAR". *La Météorologie* VI, 3.
- WEILL A., AUBRY M., BAUDIN F., HEISSAT J. (1976) - "A study of temperature fluctuation in the atmospheric boundary layer". *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 10, n° 3.
- SPIZZICHINO A., VAN GRUNDEBEEK P. (1977) - "Etude des plumes convectives de la basse atmosphère par sondage acoustique". *Annales de Géophysique*, Vol. 33, n° 4.

- WEILL A., BANDIN F., GOUTORBE J.P., VAN GRUNDERBEEK P., LEBERRE - "Structure de la turbulence dans les inversions de température et les champs convectifs". *Boundary Layer Meteorology* (à paraître).
- CADET D., OVARLEZ H., OVARLEZ J. (1975) - "Superpressure balloon flights in the tropical boundary layer". *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 14, p. 1478.
- CADET D., OVARLEZ H., OVARLEZ J. (1975) - "Superpressure balloon flights in the tropical boundary layer". *Journal of deduced from satellite-tracked superpressure balloons. Part I : Balloon trajectories*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 102, n° 434.

III - COUCHE LIMITE DE SURFACE

Bien que la couche de surface ne soit pas physiquement isolée du reste de la couche limite planétaire elle suscite toujours des recherches bien distinctes, ne serait-ce qu'en raison des échanges interfaciaux qu'elle comporte.

C. BOUTIN, P.P. ALBIGNAT, P. BOULLERY et H. ISAKA (Laboratoire Associé de Météorologie Physique) ont étudié les transferts énergétiques entre un lac de faibles dimensions et l'air sus-jacent. Un coefficient de traînée a été défini par rapport à des caractéristiques des fluctuations de vitesse et l'estimation indépendante de chaque terme du bilan énergétique de surface a permis de déterminer les paramètres d'échange correspondants. Ce travail, qui comporte également la détermination des conditions de l'approfondissement de la thermocline du lac, s'étend donc à l'évolution énergétique de la masse d'eau ; par le fait que certaines formulations globales des transferts entre air et eau y ont été vérifiées en dépit de la dimension du plan d'eau il constitue également une contribution à l'étude de la couche limite marine.

A l'Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence (Université d'Aix-Marseille II) qui est doté d'une soufflerie à veines aérienne et hydraulique superposées, le groupe de M. COANTIC s'était déjà axé sur les problèmes d'évaporation. Son activité, qui fait dans ce domaine une part importante à la préparation instrumentale et méthodologique (visualisation, mesure de l'évaporation par une méthode isotopique, anémothermométrie) comporte comme points d'intérêt majeurs en ce qui concerne les phénomènes atmosphériques et d'interface : la théorie et la modélisation des échanges air-mer, les transferts de chaleur latente et sensible, les mécanismes hydro et aérodynamiques des transferts de masse air-mer, la microstructure dynamique et thermique de la couche limite atmosphérique. Pour ce qui a trait à ce dernier point P. MESTAYER a étudié les structures fines des champs turbulents à grand nombre de REYNOLDS, la dissipation de l'énergie cinétique de la turbulence et la destruction de la variance des scalaires ; les résultats obtenus par simulation en soufflerie ont fait l'objet de comparaison avec ceux de mesures effectuées in situ notamment à la station du GRAU de VENDRES (Hérault)(*).

Les stations de Bioclimatologie de l'Institut National de Recherches Agronomiques ont poursuivi leurs travaux relatifs aux divers aspects des échanges entre surfaces naturelles et atmosphère. A Montfavet la mesure directe des flux de chaleur par la méthode corrélationnelle a été essayée au cours de deux campagnes d'été et l'évapotranspiration potentielle a fait l'objet de la part de B. SEGUIN d'estimations suivant différents procédés ; celle-ci paraît pouvoir être appréciée en réseau avec une précision de 10 %. Une recherche sur l'utilisation de la thermographie infrarouge est en cours de développement. A Versailles, où les études concernent le frottement et le flux de chaleur aussi bien que le flux de vapeur d'eau, A. PERRIER et ses collaborateurs se sont intéressés particulièrement au bilan d'énergie, pour lequel a été mis au point un système de détermination horaire des flux, ainsi qu'au perfectionnement de la méthode aérodynamique utilisée jusqu'à présent en priorité, au déve-

(*) Le lecteur pourra trouver une information plus détaillée sur l'ensemble de ces travaux dans le rapport "Transferts et transformations d'énergie au voisinage de l'interface air-mer" de la section Océanographie Physique.

loppement de modèles théoriques concernant l'évaporation, et à l'importante question du rôle de l'advection horizontale.

Les phénomènes à l'interface air-glace et leurs effets sur la couche atmosphérique de surface constituent le thème principal des recherches de A. POGGI qui a poursuivi au Laboratoire de Glaciologie de Grenoble (CNRS) ses travaux sur le bilan thermique du glacier Amère aux Iles Kerguelen et de la banquise en Antarctique de l'Est, où a été entreprise l'étude du vent catabatique.

Le Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Ecole Centrale de Lyon, où J. MATHIEU et ses collaborateurs continuent de développer les recherches de caractère fondamental sur la mécanique de la turbulence, porte un intérêt croissant aux problèmes de couche limite atmosphérique avec la prise en compte des gradients cinématiques et thermiques, de la gravité et des forces de CORIOLIS. Divers modèles numériques bidimensionnels comportant des fermetures au premier ou deuxième ordre ont été mis au point et appliqués avec succès à plusieurs types d'écoulement. Un deuxième thème important abordé est la structure d'une couche limite turbulente présentant une discontinuité de flux de chaleur à la paroi, ce qui constitue une condition de la brise côtière. Le Laboratoire consacre d'ailleurs une partie importante de son activité à la simulation en soufflerie de la couche limite atmosphérique dans le but essentiel de décrire en une première approximation la diffusion d'effluents sous l'effet conjugué de la gravité et de la rugosité.

A.E. SAAB, du Département Environnement Atmosphérique et Aquatique (Direction des Recherches de l'EDF), utilisant un important dispositif expérimental où les mesures de concentration d'un traceur passif étaient associées à celles des variables dynamiques (profils moyens et fluctuations) a étudié la diffusion matérielle dans la couche 0-100 m à partir d'une source ponctuelle, et en a proposé un modèle qui tient compte des récentes formulations de couche limite et dont la validité s'étend aux cas de cisaillement et de convection développée.

J-P. PAGES (Observatoire du Pic du Midi et de Toulouse) a poursuivi ses recherches expérimentales à la station du GRAU de VENDRES (Hérault) à l'aide d'un anémomètre-thermomètre ultrasonique, mettant en évidence la variabilité des flux verticaux de chaleur et de quantité de mouvement et les reliant aux caractéristiques macroscopiques de la couche 0-50 m, dont les propriétés intrinsèques sont examinées séparément. La réalisation d'un programme d'étude de la diffusion matérielle dans cette même couche a été également entreprise.

THESES

- ALBIGNAT J.P. (avril 1978) - "Estimation du bilan thermique d'un lac profond à l'aide de données météorologiques de routine". Thèse 3^e cycle, Université Clermont II.
- MESTAYER P. (1975) - "Etude de certaines caractéristiques statistiques locales d'une couche limite turbulente à grand nombre de REYNOLDS". Thèse Docteur-Ingénieur, Université Aix-Marseille II.
- DIESS J. (1975) - "Etudes d'après la théorie de LUMLEY de la pénétration de la turbulence dans un milieu stratifié". Thèse Docteur-Ingénieur, Université Aix-Marseille II.
- PERI G. (1975) - "Application de méthodes hygrométriques à l'étude du mécanisme de l'évaporation lors de la simulation des échanges océans-atmosphère". Thèse Docteur-Ingénieur, Université Aix-Marseille II.
- BALDY S. (1977) - "Etude statistique de mécanismes de transfert dynamique à une interface air-eau". Thèse Docteur-Ingénieur, Université Aix-Marseille II.
- SELVA J.P. (1978) - "Etude de l'influence de la stratification sur l'évaporation". Thèse Doctorat de Spécialité, Université Aix-Marseille II.
- PERRIER A. (1976) - "Etude et essai de modélisation des échanges de masse et d'énergie au niveau des couverts végétaux : profils microclimatiques, évapotranspiration et photosynthèse nette". Thèse de Doctorat ès-Sciences, Université P. et M. Curie.
- JEANDEL D. (1976) - "Une approche phénoménologique des écoulements turbulents inhomogènes". Thèse Doctorat ès-Sciences, Université Lyon I.
- REY C. (1977) - "Effets du nombre de PRANDTL, de la gravité et de la rugosité sur les spectres de turbulence cinématique et scalaire". Thèse Doctorat ès-Sciences, Université Lyon I.

- SERRES E. (1978) – "Etude de la simulation en soufflerie des basses couches de l'atmosphère. Application à la prévision de l'impact d'un site industriel sur l'environnement". Thèse Docteur Ingénieur, Université Lyon I.
- SAAB A.E. (1978) – "Contribution à l'étude du transport turbulent de masse dans l'atmosphère. Etude théorique et expérimentale". Thèse Doctorat ès-Sciences, Université Pierre et Marie Curie.

PUBLICATIONS

- BOUTIN C., BOULLERY B., ISAKA H. (1976) – "Une méthode globale de correction de la réponse non-cosinoïdale pour un anémomètre tridimensionnel GILL UVW à hélices". *Journal de Recherches Atmosphériques*, X, p. 211.
- BOUTIN C., BOULLERY B., ALBIGNAT J.P., ISAKA H. (1977) – "Etude expérimentale d'une relation entre le coefficient de frottement et le facteur de rafales en régime de vent faible au-dessus d'une surface d'eau". *Boundary Layer Meteorology*, Vol. 12, p. 391.
- BOUTIN C., ALBIGNAT J.P., ISAKA H. (1977) – "Bilan thermique et paramétrisation à l'interface eau-atmosphère des échanges de chaleur sensible et latente par la méthode aérodynamique globale". *Tellus*.
- COANTIC M., BONMARIN P. (1975) – "The air-sea interaction facility at the Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence". *Atmospheric Technology*, n° 7, p. 72.
- MERLIVAT L., COANTIC M. (1975) – "Study of mass transfer at air-water interface by an isotopic method". *Journal of Geophysical Research*, Vol. 8, n° 24,
- MESTAYER P., GIBSON C., COANTIC M., PATEL A. (1976) – "Local anisotropy in heated and cooled turbulent boundary layer". *The Physics of Fluids*, Vol. 19, n° 9.
- BONMARIN P. (1978) – "Visualisation d'un écoulement aérodynamique au voisinage d'une interface air-eau". Actes du 6^e Colloque National de Cinématographie rapide". Collection A.N.R.T., p. 41.
- SEGUIN B. (1975) – "Etude comparée des méthodes d'estimation d'ETP en climat méditerranéen du Sud de la France". *Ann. Agron.*, Vol. 26, n° 6.
- FORTIN J.P., SEGUIN B. (1975) – "Estimation de l'ETP régionale à l'ETP locale : utilisation de la relation de BOUCHET à différentes échelles de temps". *Ann. Agron.*, Vol. 26, n° 5.
- PERRIER A., ITIER B., BERTOLINI J.M., BLANCO DE PABLOS A. (1975) – "Mesure automatique du bilan d'énergie d'une culture. Exemples d'application". *Ann. Agron.*, V. 26, n° 1.
- PERRIER A. (1975) – "Etude physique de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles". *Ann. Agron.*, Vol. 26, n° 1, 2 et 3.
- ITIER B., PERRIER A. (1976) – "Présentation d'une étude analytique de l'advection". *Ann. Agron.*, Vol. 27, n° 2 et 4.
- SIFAOU M.S., PERRIER A. (1978) – "Caractérisation de l'évaporation profonde". *Int. J. Heat Mass Transfer*, 21, p. 629.
- POGGI A. (1976) – "Contribution à l'étude de la couche limite au voisinage immédiat de la surface du glacier Ampère". *Annales de Géophysique*, fasc. IV, t. 32, p. 351.
- POGGI A. (1977) – "Heat balance in the Ablation area of the Ampere Glacier". *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 16, n° 1.
- GENCE J.N., JEANDEL D., MATHIEU J. (1975) – "Corrélations vitesse-température pour une turbulence isotrope soumise à un cisaillement et un gradient thermique moyens constants". *C.R. Acad. Sc. Paris*, série B, t. 280, p. 117.
- REY C., CLAUDE R., SCHON J.P., MATHIEU J. (1976) – "Modèle de transfert spectral pour les petites structures de champ turbulents scalaires et cinématiques". *C.R. Acad. Sc. Paris*, série B, t. 282.
- GENCE J.N., ANGEL Y., MATHIEU J. (1977) – "Evolution des parties linéaires des corrélations mettant en jeu la pression dans une turbulence homogène associée à un cisaillement et un effet de gravité". *C.R. Acad. Sc. Paris*, série B, t. 285.
- CHARNAY G., SCHON J.P., ALCARAZ E., MATHIEU J. (1977) – "Thermal characteristics of a turbulent boundary layer with inversion of wall heat flow". Congrès de Pennstate University.
- SCHON J.P., SERRES E., KREISS J., REY C., RIBON M. (1978) – "Feasibility of the simulation of the atmospheric boundary layer. Application to the study of diffusion on complex terrain". Euromech 109. Mechanics of dispersion in natural flow systems Delft.
- PONS J.C. et PAGES J.P. (1977) – "Utilisation d'un anémomètre sonique pour la mesure des flux turbulents dans l'atmosphère". *La Météorologie*, VI, n° 7, p. 5.

VI – COUCHE LIMITE MARINE

Sont mentionnés sous ce titre les travaux relatifs à des données recueillies en site océanique.

Au Laboratoire d'Océanographie Physique (Muséum National d'Histoire Naturelle) une telle activité a été menée de 1975 à 1978 dans le cadre d'une Action Thématique Pro-

grammée en Océanographie Physique, avec, comme base principale, la bouée-laboratoire BOHRA II, qui, moyennant quelques précautions essentielles quant au positionnement des appareils, permet des mesures aériennes jusqu'à 26 m au-dessus du plan d'eau. Ainsi ont été observés des écarts non négligeables à l'image classique de la microturbulence dans la couche à flux constant ; en particulier, dans la gamme inertielle tridimensionnelle, des critères d'isotropie ne peuvent être vérifiés qu'en généralisant l'hypothèse de TAYLOR par l'adoption d'une vitesse d'entraînement qui soit fonction de l'échelle. L'Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence a apporté sa contribution à l'exploitation des expériences menées sur BOHRA II (*).

 (*) Pour une information plus détaillée sur ces travaux le lecteur pourra consulter le rapport "Transferts et transformations d'énergie au voisinage de l'interface air-mer", de la section Océanographie Physique.

THESES ET PUBLICATIONS

REVAULT D'ALLONNES M. (1978) - "Contribution à l'étude de la microturbulence naturelle au voisinage de l'interface air-mer". Thèse Doctorat ès-Sciences, Université de Pierre et Marie Curie.

LACOMBE H., REVAULT D'ALLONNES M., CREPON M., FIEUX M. (1977) - "Ocean-Atmosphere Energy Exchanges", CNRS Research, 6, New-York.

Le Laboratoire Associé de Météorologie Physique a également entrepris une étude qui a pour but de déterminer au-dessus de la mer la structure de la turbulence dans la couche limite stable ou peu convective et de préciser la différence d'une telle structure avec celle de la couche limite convective. Dans ce cadre B. GUILLEMET et D. ALBIGES ont mené deux campagnes de mesures par avion près de l'île d'Yeu.

V – METEOROLOGIE SYNOPTIQUE

A. BERROIR

Laboratoire de Météorologie Dynamique du CNRS

INTRODUCTION

Les thèmes principaux étudiés dans ce domaine ont été : l'étude de la cyclogénèse, l'étude des phénomènes ondulatoires de l'atmosphère tropicale et l'analyse du couplage entre phénomènes radiatifs et phénomènes dynamiques d'échelle synoptique.

On a utilisé, pour ces méthodes, les données météorologiques conventionnelles, mais on a fait une place croissante aux données fournies par les satellites et au développement de modèles mathématiques.

1. CYCLOGENESE

Le L.P.D.A. de l'Université Pierre et Marie Curie a donné une explication de la cyclogénèse hivernale sur la Méditerranée et a caractérisé la forme des systèmes nuageux associés. Un schéma a été proposé pour expliquer le rôle de la convection profonde dans la formation et l'entretien de ces perturbations [1], [2], [3].

On a fait des études analogues sur d'autres régions océaniques où circulent des courants chauds et où l'on constate des invasions d'air froid, et on a mis en évidence, en particulier, dans la région du Gulf Stream, le rôle de la convection profonde [4], [5].

2 – PHENOMENES ONDULATOIRES DE L'ATMOSPHERE TROPICALE

Lors de la campagne franco-ivoirienne d'étude de la mousson africaine (OUAGA, 1977), le L.D.A. de l'Université d'Abidjan a collecté des observations sur la pénétration de la mousson dans le Sahel et analysé certaines perturbations mésosynoptiques qui l'accompagnent [6].

Le L.P.D.A. de l'Université Pierre et Marie Curie a exploité les données de l'expérience ETGA sur l'Afrique de l'Ouest et estimé les vitesses de propagation des ondes entre Dakar et Bamako. Des différences sensibles ont été mises en évidence, entre les trois phases de l'expérience, dans la structure des ondes d'est et leur rapport avec la convection profonde [7], [8].

Le L.A.M.P. de l'Université de Clermont II a commencé une étude de la paramétrisation de la convection profonde pour l'inclure dans une compréhension du bilan énergétique des ondes d'est sur l'Afrique et a étudié une méthode d'interpolation pour l'analyse objective du champ météorologique [6 bis].

3 – COUPLAGE ENTRE PHENOMENES RADIATIFS ET DYNAMIQUES

Le L.P.D.A. de l'Université Pierre et Marie Curie a étudié l'évolution des perturbations

synoptiques sahariennes associées à des soulèvements de sable, et relié l'entretien de ces perturbations aux effets radiatifs du sable en suspension [9].

Le L.M.D. du C.N.R.S. à Palaiseau a interprété les données du canal vapeur d'eau du THIR de Nimbus-5, puis celles du canal vapeur d'eau de Météosat, et a mis en évidence une relation entre données radiométriques et données météorologiques conventionnelles, pouvant permettre d'utiliser la vapeur d'eau comme traceur de mouvements atmosphériques, à l'échelle synoptique, dans les zones sans nuages [10].

Enfin, on doit signaler les travaux de modélisations mathématiques de perturbations de gravité-inertie d'échelle synoptique dans une atmosphère stratifiée, interrompus par le décès du Professeur QUENEY [11].

Abréviations :

L.M.D.	Laboratoire de Météorologie Dynamique
L.P.D.A.	Laboratoire de Physique et Dynamique de l'Atmosphère
L.A.M.P.	Laboratoire Associé de Météorologie Physique
L.D.A.	Laboratoire de Dynamique de l'Atmosphère (Abidjan)

- [1] THEPENIER R.M., CRUETTE D., QUENEY P. (19 janvier 1976) – Rôle de la convection orageuse dans l'évolution des tourbillons cycloniques sur l'Europe Occidentale. *C.R.A.S.*
- [2] THEPENIER R.M. (juin 1976) – "Rôle des cumulonimbus dans l'évolution des perturbations cycloniques. Cas particulier des perturbations dans les régions méditerranéennes". Thèse de Doctorat de 3^e cycle.
- [3] THEPENIER R.M., CRUETTE D. (juin 1977) – "Rôle des cumulonimbus dans l'évolution des perturbations cycloniques des régions méditerranéennes". - Acte des Journées d'Etudes sur la convection développée et les précipitations. Clermont-Ferrand (17-19 janvier 1977), édité par l'I.N.A.G. et l'Université Clermont II. - Revue "La Météorologie" VI^e série n° 9.
- [4] THEPENIER R.M. (10 octobre 1977) – Le rôle du Gulf Stream comme facteur de cyclogénèse. *C.R.A.S.*, Paris T 285.
- [5] THEPENIER R.M. (1978) – Les anomalies du Gulf Stream et du courant général d'Ouest. Leur rôle sur la sécheresse en France, au cours du 1^{er} trimestre 1976. *C.R.A.S.*
- [6] ASSAMOÏ P. (1978) – Rapport scientifique du Laboratoire de Physique Atmosphérique n° 1 - (Campagne de OUAGA 1977).
- [6bis] ASSAMOÏ P. (1976) – Etude des méthodes d'interpolation pour l'analyse objective de champs météorologiques, Thèse université de Clermont II.
- [7] VILTARD A. (juin 1976) – Modèle de grandes ondes horizontales d'Est à 200 mb sur l'Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, numéro spécial "Météorologie Tropicale".
- [8] VILTARD A. – "Statistical Study of Eastely waves", à paraître dans Monthly Weather Study.
- [9] BEJJANI M.C. (1975) – "Etude des perturbations synoptiques sahariennes associées à un soulèvement de sable ; mise en évidence du rôle radiatif de ce sable". Thèse de Doctorat d'Etat, Paris.
- [10] ROULLEAU M. (August 1977) – "An analysis of Nimbus-V THIR 6-7 μm observations over the Mediterranean Sea". Proc. of the IAGA/IAMAP Assembly, Seattle, USA.
- [11] QUENEY P. (mars et juin 1977) – Synthèse des Travaux Théoriques sur les perturbations de relief. *La Météorologie*.

VI – RAPPORT QUADRIENNAL SUR LA PHYSIQUE DES NUAGES

R. ROSSET

Laboratoire de dynamique de l'atmosphère

Nous nous limiterons ici pour l'essentiel à traiter de la micro-physique des nuages naturels (nuages convectifs et stratiformes) et artificiels (panaches émis par les tours de réfrigération des centrales électriques). Pour la période 1975-1978, ce domaine a été marqué en France par la mise en œuvre et la maîtrise technique d'un ensemble logistique lourd (senseurs aéroportés de Knollenberg et de Ruskin, radars Ronsard) susceptible de fournir une description à la fois globale et fine des phénomènes nuageux. Parallèlement à ce gros effort technologique, un travail de modélisation a été entrepris, portant sur la structure et l'évolution des nuages afin de servir de cadre d'interprétation aux mesures effectuées ou en projet. La plupart des organismes nationaux intéressés ont soutenu cet effort : la D.R.E.T., l'Université, la D.G.R.S.T., le C.N.E.T., le C.N.R.S., l'I.N.A.G., l'E.D.F., la Météorologie Nationale.

On peut distinguer plusieurs volets étroitement imbriqués à l'activité nationale dans le domaine de la physique des nuages.

TRAVAUX PLUS SPECIFIQUEMENT TECHNOLOGIQUES

Sur le plan des senseurs microphysiques aéroportés, le LAMP/GDMA s'est doté de plusieurs types d'appareils :

- appareils de Knollenberg (ASASP 300, ASSP, FSSP-100, CDP, PSP) permettant d'appréhender le spectre dimensionnel des particules et gouttes entre 0,5 et 4500 μm ;
- appareil de Ruskin, donnant accès à la teneur en eau totale (vapeur, liquide et solide) ;
- appareil de Johnson-Williams pour déterminer la teneur en eau liquide des nuages.

La physique de la mesure de ces différents dispositifs (calibration, précision, comportement dans l'atmosphère, acquisition et traitement des données) a été réalisée en laboratoire, en soufflerie et in situ.

Par ailleurs, la mesure de l'humidité de l'air avec un très faible temps de réponse a fait l'objet de deux autres types d'approche :

- par mesure de l'absorption de la raie Lyman alpha (J.C. SEMIOND, M. RAVAUT, H. ISAKA) ;
- par mesure de la fréquence de résonance d'un interféromètre de Perot-Fabry (D. ROUSSET).

Egalement, le LAMP s'est attaché à la mesure des teneurs de l'air en noyaux de condensation, ainsi qu'à la détermination de leur nature chimique (R. SERPOLAY).

Toujours dans le domaine des mesures de granulométrie nuageuse par avion, signalons la mise au point d'une sonde largable, l'Aquasonde de la Météorologie Nationale (J.F. GAYET, M. CHAMPEAUX).

Il est clair que ces travaux sont à replacer dans le cadre plus général des techniques de mesure aéroportées, thème auquel des Journées d'Etude à Clermont-Ferrand (H. ISAKA et R. ROSSET) ont été consacrées. Pour toutes ces mesures, le DC7 du C.E.V. (Groupe AMOR) s'est révélé un auxiliaire indispensable.

En ce qui concerne la mesure du spectre de la pluie au sol, nous citerons le spectropluviomètre de la Météorologie Nationale/C.N.E.T. (KLAUS).

Dans le domaine de la télédétection des phénomènes nuageux, le système des deux radars Ronsard du C.N.E.T./C.R.P.E. est à mentionner tout particulièrement ici (voir par ailleurs pour plus de détails la partie "Convection profonde") pour ce qui est de la procédure "tir vertical", laquelle permet pour des hydrométéores de tailles suffisantes, de distinguer les phases liquide et solide de l'eau, d'en évaluer la vitesse de chute et d'estimer la vitesse verticale du vent (TESTUD, AMAYENC, CHONG, ROUX, AUUSER).

RESULTATS SCIENTIFIQUES ET PERSPECTIVES

Ces résultats ont été obtenus lors de plusieurs campagnes de mesures effectuées tant en France qu'à l'étranger. Au stade actuel, il peut être délicat de distinguer parmi ces résultats, issus de plusieurs thèmes de recherche (givrage, convection profonde, nephos, campagnes E.D.F., fronts, moussafrica, . . .), ce qui est proprement essais techniques, développement technologique ou mesures à finalité uniquement scientifique : cette phase foisonnante est inhérente au test dans des conditions réelles sur le terrain des nouvelles techniques à maîtriser et ce, d'autant plus que celles-ci tendent à nous fournir des représentations de plus en plus fines, à la fois dans l'espace et dans le temps, des manifestations nuageuses.

Pour nous limiter à la microphysique de la convection profonde, les campagnes givrages de 1976, 1977 et 1978 et moussafrica 1977 ont fourni de nombreuses données expérimentales tant sur les nuages convectifs à nos latitudes que sur ceux des régions tropicales et équatoriales (J.F. GAYET, M. JARMUZYNSKI et R.G. SOULAGE ; J.F. GAYET ; Rapports moussafrica n° 1, 2, 3) : localement, des teneurs en eau très élevées ont été décelées, nettement suradiabatiques qu'il s'agit de confirmer par de nouvelles mesures et d'interpréter dans un cadre cinématique. Sur le plan pratique, ces mesures amènent à réviser les normes actuelles de givrage des aéronefs (J.F. GAYET).

La microphysique constituant un élément important qui règle l'intensité et la durée de vie de la convection, plusieurs modèles de simulation numérique ont été élaborés et testés sur des données expérimentales, modèles uni et bi-dimensionnels (P. SARTHOU, S. ACHY, Jacqueline PASTRE et R. ROSSET), le travail au L.M.D. de G. SOMMERIA relevant d'une autre partie du présent rapport. Appliquant les données des radiosondages, de la photogrammétrie terrestre et des sondages avion, S. ACHY (Faculté des Sciences d'Abidjan ; rapports moussafrica et Journées d'Etude de Clermont et de Lannemezan) pour montrer l'intérêt qu'il y a de disposer, après ajustement des différentes constantes, de modèles uni-dimensionnels de convection profonde en zone tropicale afin de prévoir notamment les précipitations. Quant à eux, Jacqueline PASTRE et R. ROSSET se sont attachés à développer un modèle bi-dimensionnel de convection, avec microphysique, paramétrisée incluant la phase glace, afin d'une part, de préciser les transformations énergétiques liées à la convection et d'autre part, de disposer d'un cadre thermodynamique et cinématique réaliste dans lequel faire évoluer les particules microphysiques génératrices de précipitations.

On retrouvera exposés dans la partie "Modification du Temps", les travaux du groupe "Physique des Précipitations" du laboratoire de Glaciologie de Grenoble (P. ADMIRAT) et du G.N.E.F.A. (J.F. MEZEIX) : ces groupes étudient la structure spatio-temporelle ("coeurs de grêle") des précipitations orageuses et ses relations avec les mouvements convectifs.

Pour ce qui est des nuages stratiformes, plusieurs approches distinctes ont été proposées.

H. SAUVAGEOT s'est orienté vers l'étude des traînées de précipitations générées dans les nuages stratiformes, à l'étage inférieur et en altitude. C. FRAVALO (LPARA Brest), R. ROSSET (LAMP Clermont), J.J. MORCRETTE et Y. FOUQUART (LOA Lille) étudient les interrelations entre dynamique, thermodynamique, microphysique et propriétés radiatives des nuages stratiformes bas en vue de leur paramétrisation dans des modèles numériques de la grande échelle. L'accent mis sur les caractéristiques radiatives de tels bancs nuageux, aux latitudes tempérées (campagne nephos) et tropicales (moussafrica) permet ainsi de combler une lacune en Physique des nuages.

Christian Asselin de Beauville a étudié, à l'aide de mesures en avion et de photographies de satellites, des traînées nuageuses créées par relief de Petites Antilles et qui peuvent, dans certaines conditions, s'étendre sur plusieurs centaines de kilomètres en aval de ces îles.

Jean PASTRE et R. ROSSET (LAMP) ont abordé la simulation de l'évolution du spectre granulométrique des nuages, incluant pour les nuages chauds les phénomènes et processus de condensation (avec activation progressive du spectre des noyaux de condensation), de coalescence, de rupture de gouttes et de leur précipitation. Ce modèle a été appliqué au problème de l'interaction entre un banc nuageux et le panache humide émis par une tour de réfrigération : le rôle catalytique de l'eau de primage a été mis en évidence quant à la probabilité de génération d'éléments précipitants. Ce travail se poursuit pour tenir compte de la phase glace.

Par ce travail numérique, nous touchons au domaine des nuages artificiels tels que les panaches industriels. Des mesures sur les caractéristiques microphysiques de ces panaches (senseurs embarqués sur hélicoptère) ont été effectuées (LDMA/EDF) sur les sites de Gardanne et de Meppen (Allemagne Fédérale), avec essais de développement d'une modélisation numérique associée (J.L. BRENGUIER, F.X. LE DIMET et R. ROSSET).

CONCLUSION

La période 1975-1978 ayant été marquée par la mise au point et la maîtrise de nouvelles techniques de mesure (in situ et par télédétection) des caractéristiques physiques des nuages tant naturels qu'artificiels, on peut s'attendre pour la période à venir à l'application de ces techniques pour une meilleure connaissance des mécanismes fondamentaux qui règlent la structure et l'évolution des nuages, dans un but de prévision et également, le cas échéant, de modification. A cet égard, les campagnes de mesures en France et à l'étranger (Afrique, Espagne) telles que givrage, WAMEX, PAP, COPT devraient fournir les éléments expérimentaux de référence.

D'autre part, seront poursuivis et étendus les travaux de simulation numérique propres à soutenir cet effort et de nature à faciliter la formulation d'interprétations physiques.

- ASSELIN de BEAUVILLE C. (1978) – Etude de traînées nuageuses d'origine orographique propre aux Petites Antilles - Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Pau et des Pays-de-l'Adour.
- AMAYENC P. et AUSER D. (septembre 1978) – Granulométrie des précipitations et mouvements verticaux de l'air. Premiers résultats et perspectives. *Journées franco-africaines de Physique de l'atmosphère*.
- Etude de la Convection atmosphérique équatoriale : résultats de la campagne moussafrica 1977 – *Rapport n° 1*, décembre 1977 ; *Rapport n° 2*, janvier 1978 ; *Rapport n° 3*, décembre 1978.
- FRAVALO C. et ROSSET R. (avril 1978) – Vers une formulation exhaustive de l'entraînement sommital pour une couche limite planétaire à stratocumulus, *J.R.A.*, 12 (1) – Aussi *Journées de Palaiseau*.
- FRAVALO C., ROSSET R., MORCRETTE J.J., FOUQUART Y. (juin 1978) – Computation of radiative fluxes in clouds. Applications in cloud modelling. *A.M.S. Conference*, DAVIS, CAL.
- GAYET J.F., SOULAGE R.G. et BRICARD J. (1978) – Caractéristiques microphysiques de stratocumulus produisant des anticouronnes. *J.R.A.*, 12 (1).

- GAYET J.F., FRIEDLANDER M., PINTY J.P. (mai 1977) – Sur la mesure de la teneur en eau totale des nuages au moyen du senseur de Ruskin. *Rapport scientifique LAMP*, n° 22.
- GAYET J.F. et SOULAGE R.G. (1978) – Structure microphysique des nuages givrants. 51st Specialists' Meeting in icing testing for aircraft engine (AGARD) Londres.
- GAYET J.F., JARMUZINSKI M. et SOULAGE R.G. (août 1978) – Microstructure of an accumulation zone in a tropical Cb cloud. *Conférence sur la Physique des Nuages et l'Electricité atmosphérique*, Issaquah (Washington D.C.).
- GAYET J.F. (août 1978) – Time evolution of the microstructure of a Cb cloud in middle latitudes. *Conférence sur la Physique des Nuages et l'Electricité atmosphérique*, Issaquah, (Washington D.C.).
- GAYET J.F. (janvier 1978) – Mesures microphysiques aéroportées. *Journées Convection*, Clermont.
- GAYET J.F. (novembre 1977) – Spectre dimensionnel et teneur en eau des nuages réalisés au C.E.Pr. de Saclay. *Rapport Technique LAMP*, n° 19.
- GAYET J.F., CHAMPEAUX J.L. (1978) – Comparaison des résultats de l'Aquasonde et des appareils de Knollenberg pour la mesure du spectre dimensionnel des gouttes des nuages. *Rapport LAMP*.
- GAYET J.F. (1978) – Analyse probabiliste des facteurs météorologiques gouvernant le givrage des aéronefs. Comparaisons avec les normes FAR 25". *Rapport LAMP*.
- GAYET J.F. (juillet 1976) – Microstructure of a CuCg cloud. *Internat. Conf. on Cloud Physics*, Boulder, Col.
- HENRION X. et SAUVAGEOT H.S. (1977) – Spectral analysis of stratiform cloud radar observations. *Geoph. Res. Letters*, 4 (9). 360-362.
- KLAUS V. (février 1976) – Etude d'un spectropluviomètre photoélectrique fournissant en temps réel des paramètres intégrés. Thèse de 3^e cycle, Université Pierre et Marie Curie.
- LE DIMET F.X. et ROSSET R. (avril 1978) – Un schéma lagrangien de diffusion turbulente. *J.R.A.*, 12 (1), Aussi *Journées de Palaiseau*.
- LE DIMET F.X. (juillet 1978) – Un modèle lagrangien de diffusion turbulente de particules non passives. Thèse de 3^e cycle, Université de Clermont II.
- PASTRE J. et ROSSET R. (avril 1978) – Interaction entre un panache humide et un nuage : étude préliminaire. *J.R.A.* 15, (4), aussi *Journées de Palaiseau*.
- PASTRE J. (Mme) (avril 1978) – Un modèle bidimensionnel de convection atmosphérique : considérations énergétiques. Thèse de 3^e cycle, Université de Clermont II, Juillet 1978 - Aussi *Journées de Palaiseau*.
- PASTRE J. (juillet 1978) – Description microphysique de l'évolution d'un nuage chaud. Application au problème de l'interaction entre un panache humide et un nuage. Thèse de 3^e cycle, Université de Clermont II.
- RASOAMANANA R. et SARTHOU P. (janvier 1977) – Un procédé de simulation numérique des Cu à faible développement. *J.R.A.*, 11 (4), P. 255-267. Aussi *Journées Convection de Clermont*.
- ROSSET R., GAYET J.F., LE DIMET F.X., PASTRE J & J. (juillet 1976) – Temperature and humidity signatures of some shallow fair weather Cu clouds and their related dynamics and microphysics. *Internat. Conf. on Cloud Physics*, Boulder, Co.
- SAUVAGEOT H. (1976) – Circulation de l'air et formation des précipitations dans les stratocumulus en rouleaux. *J.R.A.*, 10 (1), 17-24.
- SAUVAGEOT H. (1976) – Sur l'origine des traînées de grêle. *C.R.Ac. Sc.*, t. 283, Série B, 159-162.
- SAUVAGEOT H. (1976) – Observation directe d'une cellule génératrice de traînées de précipitation soumise à un cisaillement de vent. *J.R.A.*, 10 (2), 119-122.
- SERPOLAY R. (septembre 1977) – 9^e Conf. Internat. sur les aérosols atmosphériques, les noyaux de condensation et la nucléation de la glace. Galway (Irlande).
- SERPOLAY R. (1977) – La mesure de la concentration de l'air en noyaux de condensation nuageuse à Ouagadougou. Été 1977. *Bulletin de liaison du Comité Interafricain d'Etudes hydrauliques*.
- SERPOLAY R. (1977) – "La basse atmosphère". *Encyclopédie scientifique de l'Univers : la Terre, les Eaux, l'Atmosphère* (publication : Bureau des Longitudes).
- SERPOLAY R. et DESALMAND F. (avril 1978) – L'analyse de l'aptitude de l'Air à condenser l'eau considéré comme moyen de contrôle de la pollution de type urbain. *Colloque IRCHA*, Paris.

VII – CONVECTION PROFONDE

D. RAMOND

C.N.R.S.

LAMP 63000 CLERMONT-FERRAND

I – INTRODUCTION

De multiples aspects des études effectuées dans le domaine de la convection profonde figurent déjà dans le présent rapport au titre de la "Physique des Nuages" ou de la "Modification du Temps". Le lecteur est invité à se reporter aux paragraphes correspondants, dans la mesure où ne sont relatés ici que des compléments plus spécifiques à la convection profonde.

Les quatre dernières années ont été marquées par un renforcement sensible du potentiel de recherches dans le cadre de la convection profonde, renforcement qui tient à la mise en opération de nouveaux systèmes complexes de mesures et au développement de méthodologies adaptées, ainsi qu'à l'extension des recherches à la convection tropicale.

II – DEVELOPPEMENTS TECHNIQUES ET METHODOLOGIQUES

Le système RONSARD de deux radars Doppler jumelés a été rendu opérationnel en octobre 1977 (Les Radars RONSARD, WALDTEUFEL et al., 1975 ; WALDTEUFEL et al., 1977). Destiné à restitution des champs tridimensionnels de vitesse en atmosphère nuageuse, il a donné lieu à une importante étude méthodologique qui s'est étendue à l'utilisation d'un seul ou de trois radars Doppler (GILET, 1977 ; GILET et al., 1979 ; WALDTEUFEL, 1976 ; BREGER, 1977 ; AMAYENC et al., 1978 ; TESTUD et al., 1978 ; WALDTEUFEL et CORBIN, 1979). Les radars RONSARD ont été mis en œuvre en 1977 et 1978 pour l'analyse de situations de convection tant isolée que frontale dans le cadre de programmes coopératifs entre le Centre de Recherches en Physique de l'Environnement Terrestre et Planétaire, les Etablissements d'Etudes et de Recherches Météorologiques, et l'Institut et Observatoire de Physique du Globe du Puy de Dôme (GILET et al., 1978).

Dans le domaine de l'étude de l'électricité atmosphérique associée aux nuages orageux, le Groupe de Recherche de St-Privat d'Allier (*), dont les études sur la foudre ont débuté en 1973, a notablement accru son potentiel de mesure en 1977 et 1978, notamment par l'implantation sur le site expérimental d'un réseau terrestre de moulins à champ destiné à la localisation et la détermination des charges électriques neutralisées par une décharge de foudre, et d'un réseau VHF phasé pour la localisation et la caractérisation des "stepped leaders" associés à l'éclair. Grâce à ces deux réseaux mis en œuvre et exploités par l'O.N.E.R.A., les

(*) Participaient à ce groupe en 1978, les organismes suivants : Electricité de France (Clamart), Commissariat à l'Energie Atomique (Saclay, Grenoble, Bruyère le Chatel), Centre National d'Etude des Télécommunications (Lannion), Office National d'Etude des Télécommunications (Lannion), Office National d'Etudes et Recherches Aérospatiales (Paris), Institut et Observatoire de Physique du Globe (Clermont-Ferrand), Laboratoire de Physique de l'Atmosphère (Toulouse).

études initialement centrées sur les éclairs déclenchés artificiellement par des fusées tirant un fil métallique ont été étendues aux éclairs naturels.

De son côté, la Météorologie Nationale (E.E.R.M.) a développé une "aquasonde" sonde largable par avion et capable de transmettre les informations spectrogranulométriques relatives aux hydrométéores de 10 à 200 microns de diamètre rencontrés le long de sa trajectoire de chute (KLAUS et CHAMPEAUX, 1977 a et b). L'aquasonde a été testée en laboratoire par comparaison avec les spectrogranulomètres Knollenberg du Laboratoire Associé de Météorologie Physique - L.A.M.P. Clermont-Ferrand - (GAYET et CHAMPEAUX, 1978) et in situ (CHALON et al., 1979).

La mise sur orbite du satellite géostationnaire européen METEOSAT, à la fin de l'année 1977 a ouvert un champ important d'applications aux compétences développées par la Météorologie Nationale/E.E.R.M. et le Laboratoire de Météorologie Dynamique/C.N.R.S. (SZEJWACH et DESBOIS, 1978), dans le domaine de l'étude de l'activité convective à l'échelle intermédiaire et synoptique. La position de METEOSAT, à la verticale de l'intersection du Méridien de Greenwich et de l'Equateur, en font un instrument de première importance pour l'étude de la convection tropicale africaine et atlantique.

III - CONVECTION PROFONDE TROPICALE

Une opération concertée de recherche expérimentale sur la convection tropicale africaine a été menée en Côte d'Ivoire en octobre 1977. Elle réunissait le L.A.M.P., la Faculté des Sciences d'Abidjan (Côte d'Ivoire), la Faculté des Sciences de Lomé (Togo), la Météorologie Ivoirienne, le Laboratoire d'Optique Atmosphérique de Lille. Les premiers résultats de cette expérience, déduits principalement des mesures effectuées à l'aide de l'avion DC7/AMOR (GAYET et al., 1978) ont révélé l'existence dans certaines parties des cumulonimbus étudiés, de teneurs en eau liquide trois fois supérieures aux teneurs en eau liquide adiabatiques, avec des diamètres volumiques médians de plus de 1 mm. Les zones de forte teneur en eau se sont de plus avérées être de faible étendue horizontale par rapport au diamètre des cellules pénétrées, et correspondre à des zones de vitesse verticale sensiblement nulle situées entre des courants ascendants rapides.

Dans le sillage de cette opération, une participation à l'expérience WAMEX (1979) a été élaborée par le L.A.M.P., en coopération avec l'E.E.R.M., sur le thème de l'étude des ondes d'Est et principalement du rôle de la convection dans leur bilan énergétique. En plus des mesures provenant du réseau international et des mesures obtenues à l'aide du DC6/AMOR, cette participation bénéficiera du support théorique d'un modèle numérique à moyenne échelle développé par l'E.E.R.M. (LEPAS et ROUSSEAU, 1978) et d'un modèle unidimensionnel composite développé par le L.A.M.P. (POINTIN) et destiné à l'étude de l'interaction cellule-cellule et cellule-environnement.

Une autre expérience sur la convection isolée a été projetée pour mai-juin 1979 en Côte d'Ivoire, par le C.R.P.E. le L.M.D. et l'E.E.R.M., et l'Université d'Abidjan, en préparation d'une opération prévue pour 1980 dans laquelle seront notamment engagés les radars Doppler RONSARD et la station météorologique mobile "4M" de l'E.E.R.M. En support théorique de cette expérience, un modèle numérique à trois dimensions de convection profonde a été élaboré au L.M.D., modèle qui est une extension de celui de SOMMERIA (1976) basé sur l'intégration des équations primitives en approximation anélastique, et qui reprend des hypothèses similaires quant à la fermeture du système des équations de turbulence au deuxième ordre.

IV – CONVECTION PROFONDE EXTRATROPICALE

Un des thèmes de recherche les plus étudiés sur la convection extratropicale isolée, au cours des quatre dernières années, semble avoir été le développement discontinu et pulsatoire des nuages orageux ou gréligènes. Avec des approches différentes, RAMOND et TIXERONT (1976), ADMIRAT et al. (1977), RAMOND (1977), DESROZIERS et RENOUF (1978), GAYET (1978), ont clairement mis en évidence cet aspect à partir de données acquises dans le cadre de programmes tant nationaux ("orages sévères" D.G.R.S.T./I.N.A.G.) internationaux ("GROSSVERSUCH IV", cf. section "Modification du Temps" du présent rapport). RAMOND (1977, 1978 a et b) a proposé un élément théorique d'interprétation de ce caractère pulsatoire de la croissance des nuages développés à partir d'une étude expérimentale de l'interaction nuage-environnement en présence d'un cisaillement vertical du vent.

Les radars Doppler jumelés RONSARD, associés à trois stations de radiosondages lançant des ballons sondes à intervalles courts, ont permis en 1977 et 1978 des études fines de la structure dynamique d'évènements de convection profonde à caractère frontal. GILET, THOUVENIN et LAFAYSSSE (1978) présentent un des cas observés en cours d'analyse.

Les radars RONSARD ont été également mis en œuvre, au cours de l'été 1978, par l'I.O.P.G. de Clermont-Ferrand et le C.N.E.T. en conjonction avec le programme suisse-franco-italien GROSSVERSUCH IV relatif à la modification des orages à grêle. Plusieurs cas de convection isolée, modifiés ou non, font l'objet d'une étude qui devrait déboucher sur des résultats significatifs tant sur le plan de la dynamique de la convection que sur le contrôle de l'efficacité des méthodes de modification utilisées.

V – ELECTRICITE ATMOSPHERIQUE ASSOCIEE AUX NUAGES ORAGEUX

Le très grand nombre des mesures tant directes qu'indirectes effectuées par le Groupe de Recherches de St-Privat d'Allier, sur des éclairs déclenchés artificiellement a permis d'apporter des précisions importantes sur les caractéristiques d'une décharge de foudre (G.R.S.P.A., 1978 a et b). Parmi celles-ci figure la différence constatée entre les éclairs naturels et ceux déclenchés artificiellement par fusée tirant un fil métallique, ces derniers présentant une montée en courant plus rapide (200 nanosecondes) et une composante persistante plus longue assurant un écoulement de charge plus important. C'est ce qui a, au moins en partie, motivé l'augmentation du potentiel de mesure sur les éclairs naturels (voir plus haut).

Le Laboratoire de Physique de l'Atmosphère (Toulouse) a développé parallèlement, puis conjointement, des recherches sur les effets interactifs des champs électriques et des précipitations (CHAUZY, 1975 ; BANAT, 1975 ; DESPIAU, 1976 ; CHAUZY et DESPIAU, 1977).

Ces recherches fondamentales ont donné lieu à certaines applications dans le domaine de la protection contre la foudre au sol (G.R.S.P.A., 1978 a et b). L'O.N.E.R.A. a pour sa part étudié les critères de foudroiement d'un aéronef en altitude et les phénomènes d'origine tribo-électrique rencontrés en vol afin de proposer des solutions à finalité industrielle.

VI – CONCLUSION

Le potentiel de la communauté scientifique française, pour ce qui est de l'étude de la convection profonde atmosphérique s'est substantiellement modifié et renforcé au cours de la période couverte par le présent document. L'effet de ces changements, déjà notable en 1977 et 1978, se fera pleinement sentir les années qui viennent.

- ADMIRAT P., GOYER G. et BLIN P. (1977) – Un mécanisme pulsatoire des cellules orageuses à l'origine des coeurs de grêles observés au sol. *Actes des Journées d'Etudes sur la convection développée et les précipitations*. Clermont-Ferrand, Université de Clermont II.
- AMAYENC P., CHONG M., NUTTEN B., REVAH I., SAUVAGET A. et TESTUD J. (1978) – Etude de la convection nuageuse à l'aide du système de deux radars Doppler RONSARD. *Colloque International sur le Radar*, S.E.E., Paris.
- BANAT M. (1975) – Théorie de la déformation et de la stabilité des gouttes composant un nuage orageux soumises à des actions électriques intenses. Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- BREGER G. (1977) – Etude par radar Doppler des mouvements atmosphériques au voisinage d'un front froid. Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Université de Pierre et Marie Curie.
- CHALON J.P., MM. ANNE, CHAMPEAUX, DELAITRE, HENRION, ROUMIGUIERE, SAUVAGEOT, SENNEQUIER, (1979) – Etude de la physique des précipitations dans les nuages chauds : Campagne AQUASONDE, Captieux 1978. *Note Technique E.E.R.M., Météorologie Nationale*, à paraître.
- CHAUZY S. (1975) – Une méthode de mesure de la composante horizontale du champ électrique à l'intérieur des nuages. *J. Rech. Atmos.*, IX, n° 3, p. 127-133.
- CHAUZY S. et DESPIAU S. (1979) – Rainfall rate and electric charge of raindrops. Soumis pour publication au *J. of Appl. Meteor.*
- DESPIAU S. (1976) – Une étude expérimentale de la charge électrique des gouttes de pluie. Thèse de Doctorat de 3^e cycle, Université Paul Sabatier, Toulouse.
- DESROZIERS G. et RENOUF M. (1978) – Etude de quelques orages à grêle dans la région du Napf. *Publication n° 218*, Laboratoire de Glaciologie, C.N.R.S., Université de Grenoble.
- GAYET J.F. (1978) – Time evolution of the microstructure of a Cb cloud in middle latitudes. *A.M.S. Conf of Cloud Physics and Atm. Electricity*, Issaquah, Washington, U.S.A.
- GAYET J.F. et CHAMPEAUX J.L. (1978) – Comparaison des résultats de l'aquasonde et des appareils de Knollenberg pour la mesure du spectre dimensionnel des gouttes des nuages. *Rapport Technique du L.A.M.P.*, Université de Clermont II.
- GAYET J.F., JARMUZINSKI M., SOULAGE R.G. (1978) – Microstructure of an accumulation zone in a tropical Cb cloud. *A.M.S. Conf. on Cloud Physics and Atm. Electricity*, Issaquah, Washington, U.S.A.
- GILET M. (1977) – Mesure des champs de vent à l'intérieur des précipitations à l'aide de radars Doppler. *Actes des Journées d'Etudes sur la Convection Développée et les Précipitations*. Clermont-Ferrand, Université de Clermont II.
- GILET M., AMAT A., AMAYENC P., CAMPISTRON B., LEBERRE P., PASTRE C., TESTUD J., WALDTEUFEL P. (1978) – Campagne de mesures "FRONTS 77" ; compte rendu des opérations. *Note Technique n° 407*, Météorologie Nationale / E.E.R.M.
- GILET M., KLAUS V., GAYARD M. (1979) – Analyse des données du système de deux radars Doppler RONSARD : reconstitution des champs de vent. *Note Technique*, Météorologie Nationale / E.E.R.M. (à paraître).
- GILET M., MM. THOUVENIN et LAFAYSSE (1978) – Anatomie à moyenne échelle d'un front ondulant. *La Météorologie* (à paraître).
- Groupe de Recherches de Saint-Privat d'Allier, (1978 a) – Développement des Recherches sur la foudre en France. *XIVe Conférence Internationale pour la protection contre la foudre*, GDANSK, Pologne, *Rapport 1.03 et 1.10*.
- Groupe de Recherche de Saint-Privat d'Allier, (1978 b) – Développement des Recherches sur la foudre en France. *I.E.E.E. /PAS*, 97, n° 3, p. 725.
- KLAUS V. et CHAMPEAUX J.L. (1977 a) – L'aquasonde : sonde fournissant le spectre dimensionnel des gouttes de nuages suivant une coupe verticale. *Actes des Journées d'Etudes sur la Convection Développée et les Précipitations*. Clermont-Ferrand, janvier 1977, Université de Clermont II.
- KLAUS V. et CHAMPEAUX J.L. (1977 b) – L'aquasonde. *La Météorologie*, n° 10, série 6, p. 61-75.
- LEPAS et ROUSSEAU (1978) – Un modèle tropical à moyenne échelle. *Document G.A.R.P. "Modélisation pour l'Expérience du G.A.R.P."* (ex n° 4 remis à jour 1978).
- RAMOND D. (1977) – Rôle des perturbations de pression dans l'interaction d'un nuage convectif et de son environnement : étude expérimentale et paramétrisation. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Clermont II.
- RAMOND D. (1978 a) – Pressure perturbations in deep convection : an experimental study. *J. Atmos. Sci.*, vol. 35, n° 9, p. 1704-1711.
- RAMOND D. (1978 b) – On the periodicity of appearance of successive cells in multicellular storms. *A.M.S. Conf. on Cloud Physics and Atm. Electricity*, Issaquah, Washington, U.S.A.
- RAMOND D. et TIXERONT D. (1976) – Discontinuous aspects of the growth of a cloud from CuCg to Cb state. *Proceedings Intern. Cloud. Phys. Conf.*, Boulder, Colorado, U.S.A., p. 314-319.
- SOMMERIA G. (1976) – Three-dimensional simulation of turbulent processes in an undisturbed trade wind boundary layer. *J. Atmos. Sci.*, 33, p. 216-241.
- SZEJWACH G. et DESBOIS M. (1978) – Dynamic classification of Mesoscale Cloud Patterns. *J. Appl. Met.*, vol. 17, p. 1406-1411.

- TESTUD J., CHONG M. et ROUX F. (1978) – Les radars RONSARD pour l'étude des phénomènes convectifs : premiers résultats et perspectives. *Journées Franco-Africaines de Physique de l'Atmosphère*, Centre de Recherches Atmosphériques Henri Dessens, Lannemezan.
- WALDTEUFEL P. (1975) – An analysis of Doppler spectral variance. *N.O.A.A. Technical Memorandum*, E.R.L. N.S.S.L. 76, p. 90.
- WALDTEUFEL P. et CORBIN H. (1979) – On the analysis of single Doppler radar data. Accepté par *J. of Appl. Met.* (à paraître).
- WALDTEUFEL P., GILET M. et SAUVAGEOT H. (1976) – RONSARD : a french C-band dual Doppler radar system. *17th Conf. on Radar Meteorology, Amer. Met. Soc.*
- WALDTEUFEL P. et METZGER P. (1978) – Utilisation d'un radar météorologique pour l'étude du foudroiement. *Note I.O.P.G.*, n° 45.
- WALDTEUFEL P., NUTTEN B., SAUVAGET A. (1975) – Les radars RONSARD. *Note Technique C.N.E.T./C.R.P.E.*, 1003, Centre National d'Etudes des Télécommunications – 92131 Issy-les-Moulineaux.

VIII – MÉTÉOROLOGIE TROPICALE

Pierre DE FELICE

I.U.T. DAKAR

1 – INTRODUCTION

Depuis la parution, en 1945, d'un manuel de météorologie tropicale, édité par l'Armée de l'Air des Etats-Unis (traduit en français en 1950), l'intérêt pour les phénomènes météorologiques des basses latitudes est allé en croissant. Cependant, le petit nombre des stations d'observation a toujours été un frein au développement des recherches en Météorologie tropicale. L'Expérience Tropicale du GARP dans l'Atlantique (ETGA, en anglais GATE) durant l'été 1974 a permis de récolter une immense moisson de données sur l'Atlantique au Sud-Ouest de Dakar, ainsi que sur l'Afrique de l'Ouest. Malheureusement des retards dans la publication des observations ont limité le nombre des études.

2 – PARTICIPATION FRANCAISE

La participation française à l'effort international pour mieux comprendre les phénomènes météorologiques des régions tropicales, durant les quatre dernières années, peut se classer en trois chapitres : la mise au point d'appareils ou de méthodes de mesures ; des campagnes de mesures, des descriptions et des analyses de phénomènes propres aux régions tropicales ; des modèles pour la simulation de l'évolution de phénomènes météorologiques.

a – Des ballons plafonnants surpressurisés ont été mis au point pour faire des sondages horizontaux à basse altitude (environ 1 000 m), dans la couche de mousson. Ils ont donné de bons résultats au cours de plusieurs campagnes de mesure.

b – Dès 1975, ces ballons plafonnants ont été lancés pour étudier la mousson indienne durant l'été boréal. Des champs quotidiens de vent, de pression, de température de l'air et de surface de la mer ont été établis.

Des fichiers de la trajectoire des cyclones de l'Océan Indien, du Pacifique Ouest et de la région des Caraïbes ont été complétés ou entrepris.

Une campagne de mesure de la convection nuageuse s'est déroulée en Côte-d'Ivoire en automne 1977. Les premiers résultats analysés font apparaître des vitesses verticales du vent et des teneurs en eau liquide dans les cumulonimbus bien supérieures aux valeurs généralement admises jusque là.

L'étude des aérosols d'origine saharienne, entre le Niger et la Côte-d'Ivoire, se poursuit : zones source, trajectoires, rôle de la stabilité de l'air sur le maintien des poussières en suspension, granulométrie des nuages de poussières, composition chimique des particules et facteur d'enrichissement, influence des particules sur la transmission des rayonnements.

Diverses études des ondes d'Est ont été faites à l'aide des données du GATE : Structure d'une onde d'Est en juillet 1974, étude statistique de ces ondes entre Bamako et Dakar, situations à ondes d'Est sur l'Afrique Occidentale.

c – Un modèle de simulation de la convection pouvant s'élever jusqu'à la tropopause et donner lieu à précipitation a été développé et comparé aux données d'observation du GATE et de l'Expérience de Porto Rico de 1972.

Un modèle simulant la circulation atmosphérique, appliqué aux données de vent du GATE, a permis de trouver les conditions de la formation des ondes d'Est en été.

3 – CONCLUSION

Le lancement du satellite géosynchrone Météosat a ouvert de nouvelles possibilités pour la connaissance du temps en Afrique où les stations de mesure sont peu nombreuses, surtout au Sahara. Le projet WAMEX (West African Monsoon Experiment) greffé sur MONEX a été proposé pour améliorer la compréhension des phénomènes de la mousson en Afrique de l'Ouest.

Ce projet africain intéresse diverses équipes françaises de recherche. Nul doute que les observations qui seront recueillies entre mai et août 1979 ne soient le point de départ de nombreuses études de météorologie tropicale.

ASECNA (1978) – Calcul pratique de la divergence, du tourbillon et de la vitesse verticale à l'usage du prévisionniste. *Publication n° 43 du Bureau d'Etudes ASECNA.*

CAUCHARD G., et INCHAUSPE J. (1977) – Le temps dans l'Archipel des Iles Marquises, Aperçu climatologique. *Monographie n° 100 de la Météorologie Nationale*, 31 p.

CADET D. et OLORY-TOGBE P. (1977) – The propagation of tropical disturbances over the Indian Ocean during the summer monsoon. *Mon. Weath. Rev.* 105, p. 700-708.

FELICE de P. (1975) – Structure de l'aérojet (jet Stream) subtropical de l'hémisphère Nord sur l'Afrique. *C.R. Acad. Sc. Paris*, t. 280.

FELICE P. de et VILTARD A. (1977) – Aérojet subtropical et nuages associés. *Météorologie Tropicale*, n° spécial de la Météorologie p. 223-225.

GARNIER R. (1976) – Situations à ondes d'Est sur l'Afrique Occidentale. *Publication n° 38 du Bureau d'Etudes ASECNA.*

GAYET J.F., LANQUETTE A.M., ACHY S., JARMUZYSKI M., BARTHOUT J.L., PINTY J.P., PEJOUX R., BESSENE F., SOULAGE M. (1978) – Etude de la convection atmosphérique équatoriale. Résultats de la campagne Moussafrica 77. *Rapport n° 2. Description et résultats préliminaires.* Université de Clermont II, laboratoire associé de Météorologie physique. Université d'Abidjan, laboratoire de Physique de l'Atmosphère.

LE BORGNE J. (1977) – Les cyclones tropicaux dans l'ouest de l'Océan Indien. *Publication n° 40 du Bureau d'Etudes ASECNA.*

LE BORGNE J. (1977) – Les cyclones tropicaux à l'île Maurice. *Publication n° 41 du Bureau d'Etudes ESECNA.*

MORELLE J. – Types de temps à Nouadhibou. *Publication n° 42 du Bureau d'Etudes ASECNA.*

ROSSIGNOL D. et CHEDHOMME P. (1977) – Etude de l'intensité de la trajectoire du cyclone Barbara. *Publication n° 39 du Bureau d'Etudes ASECNA.*

VANHOUTTE J.C. et CERF A. (1977) – Etude de la convection équatoriale. Résultats de la campagne Moussafrica 77. *Rapport n° 1. Description de la campagne de mesures radiatives.* Université de Clermont II, laboratoire associé de météorologie physique. Université d'Abidjan, laboratoire de physique de l'atmosphère.

VILTARD A. et de FELICE P. (1977) – Modèle d'ondes d'Est à 200 mb. *Météorologie Tropicale*, n° Spécial de la *Météorologie*, p. 149-157.

IX – PHYSICO-CHIMIE DE L'ATMOSPHERE

Jacques MORELLI

Mission des Etudes et de la Recherche, Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie

On a assisté au cours des dernières années à un développement accéléré des études effectuées en France en matière de physico-chimie de l'atmosphère. Les travaux ont porté sur différents aspects de ce vaste domaine de recherche, qu'il s'agisse de mises au point techniques ou de réalisations instrumentales destinées à faciliter son exploration, d'investigations visant à améliorer nos connaissances des caractéristiques physiques du milieu atmosphérique et d'observations se rattachant à l'étude de la phase atmosphérique du cycle biogéochimique d'une multitude de constituants. On essaiera dans ce qui suit de dégager les grandes lignes des sujets traités et les principaux résultats obtenus sur ces différents points.

I – TRAVAUX TECHNIQUES

L'intérêt suscité par les problèmes de pollution atmosphérique est à l'origine de nombreux travaux relatifs à la métrologie des constituants de l'air, à l'état gazeux et particulaire [1]. Ce type de recherche a conduit à la réalisation d'appareils qui équipent aujourd'hui des réseaux de contrôle de la qualité de l'air : appareils de mesure automatique des oxydes d'azote par chimioluminescence, du SO_2 spécifique par photométrie de flamme, des poussières par jauge β , etc.

Un important effort a été fait en vue de l'adaptation de différentes techniques analytiques à la mesure à très bas niveau de constituants gazeux [2]. Il a notamment été fait appel à la chromatographie en phase gazeuse pour la détection de composés soufrés et carbonés (CO , chlorure de vinyle, halogénoalcanes, etc.) et pour la mesure in situ de gaz volcaniques à haute température. L'amélioration d'un appareil de conception originale dont le principe repose sur la dissociation des molécules des constituants à analyser par collision avec des jets moléculaires d'argon suivie d'une séparation des fragments obtenus par filtration électrostatique devrait par ailleurs permettre la mesure d'un grand nombre de gaz polluants à des concentrations de l'ordre de 50 ppb.

Des recherches se sont orientées aussi vers la mise au point de techniques de mesure à distance de constituants atmosphériques ou de paramètres physiques à prendre en compte dans les études de dispersion des polluants et dans la prévision des épisodes de pointe de pollution : hauteur d'inversion de température, composantes de la vitesse du vent [2]. Différentes méthodes ont été développées en vue de la télémessure optique de constituants tels que SO_2 , le fluor, le chlorure de vinyle, les oxydes d'azote, la vapeur d'eau et l'ozone : radiométrie à modulation sélective, absorption différentielle par laser, spectrométrie Raman, etc. [2]. L'une d'elle devenue maintenant opérationnelle permet notamment la détermination par lidar du profil vertical d'ozone du sol jusqu'à 30 km d'altitude [3] et celle du profil de vapeur d'eau dans les basses couches [4]. Ce dernier procédé a conduit à de premiers résultats en bon accord avec ceux d'observations faites simultanément par ballon sonde. Il a également été possible d'appliquer des techniques lidar à la télédétection des poussières dans la couche limite planétaire [5].

En ce qui concerne les techniques de mesure des aérosols, les recherches ont en grande partie été axées sur la détection des particules ultrafines. Un compteur de noyaux à flux continu a été élaboré et son rendement de détection en fonction de la taille des particules à dénombrer ($4 \cdot 10^{-3} \mu\text{m} < r < 0,1 \mu\text{m}$) a pu être précisé [6]. Ce compteur, dont un prototype industriel vient d'être réalisé, peut fonctionner dans des gammes de concentrations comprises entre 10^{-2} et 10^6 particules $\cdot \text{cm}^{-3}$. Une autre méthode utilisant des batteries de diffusion couplées à un compteur de noyaux a permis de suivre l'évolution de la granulométrie des aérosols pour des diamètres de 10 à 200 Å [7, 8]. Dans cette gamme de tailles, une étude comparative d'un même aérosol a récemment été effectuée au moyen de batteries de diffusion et d'un analyseur de Whitby ; elle a révélé de nets écarts entre les distributions granulométriques obtenues par les deux différents procédés, du fait de pertes de comptage, et une défektivité du fonctionnement de l'analyseur de Whitby en dessous de 100 Å [9]. Des techniques de prélèvement par impaction couplées avec la microscopie optique ou électronique ont d'autre part été développées pour préciser la granulométrie de l'aérosol marin dans le domaine 0,01 – 100 μm [10, 11, 12, 13].

II – ETUDES DANS LE DOMAINE DE LA PHYSIQUE DE L'ATMOSPHERE

On a regroupé sous cette rubrique un ensemble de résultats à caractère essentiellement physique. Comme on pourra le constater, les travaux mentionnés concernent le plus souvent la physique des aérosols.

Etude des noyaux de condensation et de leurs sources

De nombreuses mesures de noyaux de condensation ont été effectuées, tant en milieu urbain qu'en milieu naturel. Dans un site urbain (agglomération toulousaine), il a été établi que les noyaux d'Aitken proviennent essentiellement de la circulation automobile, la contribution des foyers domestiques étant relativement faible [14]. Une influence du trafic automobile a également été observée dans des villes d'Afrique Occidentale faiblement industrialisées [15, 16]. Dans des régions équatoriales (Côte d'Ivoire, Congo), les zones lagunaires, certaines plantations en période de floraison et surtout la forêt s'avèrent être aussi de très actives sources de noyaux d'Aitken [17]. Il a été constaté qu'en saison sèche, les noyaux résultant de la pratique des feux de brousse peuvent devenir largement prépondérants [17]. Une étude des conditions de formation de la brume sèche en Afrique de l'Ouest a montré que les poussières à l'origine de ce phénomène, produites en énorme quantité sous l'effet de l'érosion éolienne des sols de régions arides, contiennent des argiles dont l'important pouvoir glaçogène est accru lorsque ces particules entrent en contact avec des aérosols marins [18, 19]. Par ailleurs, un processus naturel de création de noyaux de condensation par des champs d'algues a été mis en évidence sur le littoral breton aux heures de basse marée diurne [20, 21]. Enfin, l'extension de nappes de brouillard dues à un panache de pollution industrielle a pu être suivie dans le Sud Ouest de la France, grâce à des images obtenues par satellite [22].

Etudes de réactions de conversion gaz-particules. Ionisation et électricité atmosphériques.

Les mécanismes de réactions de conversion gaz-particules ont fait l'objet de recherches approfondies, principalement dans le cas de l'oxydation de SO_2 en acide sulfurique et aérosol de sulfates. Cette transformation a été étudiée tant au laboratoire [23, 24, 25, 26] qu'in situ. Des expérimentations en enceinte de simulation ont montré qu'en phase gazeuse homogène, la nucléation est influencée par la présence de NO_2 et de vapeur d'eau et s'effectue par l'intermédiaire de radicaux tels que OH et OH_2 [23, 24]. Il apparaît également que l'oxydation du SO_2 , relativement peu importante en phase gazeuse homogène, devient beaucoup plus active au contact de particules solides telles que des oxydes métalliques, dont le rôle catalytique a été établi [26].

D'autres travaux ont porté sur l'ionisation atmosphérique : étude expérimentale des caractéristiques des ions créés artificiellement dans l'air et les gaz purs [27, 28, 29], production de noyaux de condensation dans l'air atmosphérique par rayonnement ionisant [30] ou par effluve électrique [31], détermination de l'état de charge de l'aérosol radioactif naturel [32]. Des recherches sur les réactions ioniques de la basse atmosphère ont été entreprises après mise au point d'une installation de mesure simultanée de la mobilité et de la masse des ions [33, 34, 35]. On doit aussi mentionner des mesures de charge d'espace ionique et du champ électrique atmosphérique en zone côtière peu polluée [36, 37] et autour du site industriel de Lacq où l'influence de la pollution sur ces paramètres a été précisée [38, 39].

Etude de la turbulence atmosphérique par ses effets optique au sol

Une équipe a cherché à localiser les turbulences par analyse des défauts aléatoires qu'elle produit sur les ondes lumineuses [40, 41, 42, 43]. L'étude des fluctuations du flux lumineux reçu des étoiles a conduit à la réalisation d'un instrument qui renseigne sur la vitesse moyenne des couches turbulentes, leur énergie et leur altitude. Grâce à cette technique, qui a notamment permis la mise en évidence de turbulence dans la stratosphère, on peut suivre en temps réel l'évolution temporelle des couches turbulentes par des profils obtenus toutes les dix secondes. Une autre méthode, basée sur l'analyse des déplacements du bord du soleil ou de la lune au foyer d'un instrument astronomique, s'est avérée bien adaptée à l'étude de la turbulence dans la couche limite planétaire, plus spécialement dans la couche de surface ($h < 50$ m).

Modélisation des effets de constituants atmosphériques sur la structure thermique de l'atmosphère

Un modèle thermique unidimensionnel a été développé afin de mieux comprendre le mécanisme de transfert radiatif et les processus à travers lesquels les polluants stratosphériques interagissent avec la structure thermique de l'atmosphère [44]. Ce modèle a été utilisé pour évaluer la sensibilité de l'équilibre thermique sol/atmosphère à diverses perturbations des concentrations atmosphériques en O_3 , H_2O , CO_2 , NO_2 et SO_4 , et à différentes caractéristiques optiques de la couverture nuageuse. D'après les calculs effectués, il apparaît en particulier que l'effet direct sur la température d'équilibre au sol d'une flotte de l'ordre de 200 avions supersoniques de type "Concorde" est insignifiant [45].

III - ETUDES DANS LE DOMAINE DE LA CHIMIE ET DE LA GEOCHIMIE ATMOSPHERIQUES.

Les nombreux travaux développés pour mieux connaître la composition chimique de l'atmosphère s'inscrivent dans deux directions principales :

- Observations dans des situations de forte pollution anthropogénique
- Etudes en atmosphères faiblement contaminées par l'homme.

A) Observations dans des situations de forte pollution anthropogénique

Ce type d'observations répond à des objectifs d'ordre essentiellement pratique : caractérisation des émissions polluantes, surveillance des niveaux de pollution auxquels se trouve exposée la majeure partie de la population du fait de sa concentration dans des agglomérations urbaines parfois industrialisées, aide à l'établissement de normes en vue de la réduction des nuisances atmosphériques [1, 2]. Parmi les principaux constituants pris en compte figurent des composés soufrés (SO_2 , particules de sulfates), des composés carbonés, des métaux lourds, les oxydes d'azote et l'ozone. Un des aspects des recherches mises en œuvre concerne les relations entre la pollution atmosphérique et ses effets sur le milieu, qu'il s'agisse d'effets sur les végétaux, sur les matériaux et surtout sur la santé humaine.

Dans le cas de la pollution soufrée, la France a contribué à une étude internationale du transport des dérivés soufrés au-dessus de l'Europe de l'Ouest lancée à l'initiative de l'OCDE [46]. L'utilisation de moyens aéroportés a notamment fourni des indications sur la distribution verticale du SO_2 et des sulfates au-dessus du Nord de la France [1]. D'autres observations ont fait apparaître qu'environ 50 % du soufre émis au niveau de l'agglomération parisienne se dépose à moins de 100 km de la zone source [47]. Une équipe française a par ailleurs participé au programme "Mesoscale Sulfur Balance Study" de l'U.S. Environmental Protection Agency. Ce programme a conduit à une modélisation de la propagation de la pollution atmosphérique du Nord Est au Centre des Etats Unis [48, 49].

Des recherches sur la formation des oxydes d'azote dans les panaches de centrales thermiques ont montré qu'à l'émission et à haute température, ces composés se trouvent essentiellement sous forme de monoxyde NO , lequel se transforme en NO_2 à mesure que s'effectue la dilution du panache [50]. Les flux du NO_2 ainsi introduit dans l'atmosphère ont pu être estimés grâce à des mesures par télédétection.

Quant à la pollution par des constituants carbonés, les observations ont notamment porté sur le monoxyde de carbone en atmosphère urbaine. Dans la région parisienne, on a constaté que sa concentration dans l'air tend à diminuer sensiblement depuis l'application d'une première réglementation européenne limitant les émissions des véhicules automobiles [2]. Des recherches utilisant la chromatographie en phase gazeuse couplée avec la spectrométrie de masse ont par ailleurs permis l'identification et l'étude des interactions de différents polluants organiques susceptibles d'être rencontrés dans les atmosphères industrielles : hydrocarbures, alcools, monochlorure de vinyle, etc. . . [51, 52].

D'autres mesures ont permis d'identifier par chromatographie en phase gazeuse la N-diméthylnitrosamine dans l'air de Paris et de préciser la gamme des concentrations de cette substance réputée cancérigène ainsi que les mécanismes responsables de sa formation et de sa destruction [2].

B) Etudes en atmosphères faiblement contaminées par l'homme

Dans un but de clarification, on essaiera de situer les travaux effectués par rapport aux étapes successives du maillon atmosphérique du cycle biogéochimique des familles de constituants étudiés : injection dans l'air à partir de différentes sources (surface des océans, surface des continents), distribution verticale dans le réservoir atmosphérique, élimination sous l'effet de divers processus.

Etudes de constituants atmosphériques au voisinage de la surface des océans

Des campagnes de navires sillonnant de vastes étendues océaniques ont permis de fournir des informations sur une multitude de composés présents dans l'atmosphère marine, dont les concentrations loin des côtes étaient encore pratiquement inconnues il y a une dizaine d'années.

En ce qui concerne les constituants métalliques de l'aérosol marin, les mesures ont d'abord porté sur ceux les plus abondants dans l'océan - Na, K, Ca, Mg - [53, 54], avant d'être étendues à une vingtaine d'autres métaux [55, 56, 57]. Des variations géographiques de leurs abondances relatives ont été mises en évidence, celles-ci s'écartant parfois beaucoup des rapports marins de référence, particulièrement dans le cas des métaux lourds. De tels écarts ont été attribués à la conjugaison de deux effets :

- influence de particules d'origine continentale entraînées au-dessus de l'océan
- éjection dans l'air de particules formées par éclatement de bulles à la surface des mers et dont les plus fines sont issues d'une microcouche superficielle enrichie en différents métaux par rapport à l'eau de mer sous-jacente.

Des expérimentations in situ ont fait apparaître une forte réduction du flux de particules

de sels produites par ce phénomène de pétilllement en présence d'un film d'acide oléique ajouté à l'interface air/mer [54, 58]. Les particules de sels marins ayant des propriétés hygroscopiques, il n'est dès lors pas exclu que la pollution de l'océan par des nappes d'huile puisse avoir au moins localement une incidence sur les processus de condensation atmosphérique.

D'autres observations en mer ont apporté des données sur le chlore atmosphérique à l'état gazeux et particulaire [59]. Les plus récents résultats montrent que le HCl produit dans l'atmosphère marine est en majeure partie rapidement réabsorbé par la surface de la mer [60]. Pour la première fois, les concentrations de composés gazeux organiques de Cl, Br et I ont pu être mesurées dans l'air marin ; il s'avère qu'elles sont voisines de celles des mêmes halogènes sous forme gazeuse inorganique [60].

Le fond continu du SO_2 et des sulfates au-dessus des océans a pu être précisé, en particulier dans l'hémisphère Sud [61, 62], ainsi que le temps de séjour du SO_2 dans l'atmosphère marine, estimé à environ 12 heures [63]. Une étude de l'aérosol collecté au-dessus de l'Atlantique Tropical Nord a révélé que par rapport au nombre total de particules, le sulfate d'ammonium est le constituant le plus abondant dans la gamme de taille 0,1 - 2 μm [64]. Il s'est d'autre part confirmé que des phénomènes biologiques sont à l'origine du dégagement à la surface des mers de gaz soufrés comme le sulfure de diméthyle (DMS), qui s'oxydent en SO_2 puis en aérosol de sulfates [65]. En bordure du littoral, les champs d'algues découverts aux heures de marée basse diurne sont aussi une source de gaz soufrés organiques du même type qui donnent naissance à des noyaux de condensation [20, 21]. A l'échelle de l'océan mondial, la production de sulfates à partir de composés soufrés gazeux d'origine marine pourrait être voisine de 10^8 T.an^{-1} [66], valeur du même ordre que la production mondiale de sulfates résultant des émissions de SO_2 anthropogénique.

Enfin, une étude a porté sur les hydrocarbures aliphatiques et aromatiques de l'aérosol filtré au-dessus de l'Atlantique Tropical Nord [67]. Leur origine en grande partie marine paraît très probable, compte tenu des similitudes de composition en hydrocarbures observées entre cet aérosol et la microcouche océanique superficielle.

Etudes de constituants atmosphériques au voisinage de la surface des continents

Une équipe franco-africaine s'est intéressée à l'aérosol produit par l'érosion éolienne des sols en Afrique de l'Ouest. Elle a noté un enrichissement de certains métaux par rapport à la composition de l'horizon superficiel du sol générateur [68]. En raison de la multiplicité des sources locales et des fluctuations de leur activité, il apparaît que la composition métallique de l'aérosol présent dans ces régions varie selon les saisons et les situations météorologiques et est très influencée par les feux de brousse [69, 70]. Dans le cas du potassium, les émissions de particules par la forêt équatoriale sont à l'origine de la mise en suspension dans l'air d'importantes quantités de cet élément [71]. Des mesures en SO_2 et sulfates ont été effectuées par ailleurs en Côte d'Ivoire. Les concentrations atmosphériques en SO_2 rencontrées sont élevées et plus fortes d'au moins un ordre de grandeur que celle observées au-dessus de l'océan [72]. Elles ont été attribuées à des processus très actifs de décomposition de la matière organique de la forêt équatoriale et des zones lagunaires, dont les effets sur le bilan du soufre atmosphérique devront être pris en compte.

Une attention particulière a été portée à l'étude de la composition chimique des émissions volcaniques sur le site de l'Etna. Des mesures par spectrométrie de corrélation U.V. ont conduit à une estimation du flux de SO_2 issu de ce volcan [73]. La valeur obtenue est du même ordre que celle correspondant aux rejets atmosphériques en SO_2 de l'ensemble des centrales thermiques françaises. Un tel résultat indique que l'on a jusqu'ici largement sous-estimé les émissions volcaniques de SO_2 . Des analyses d'une vingtaine de métaux dans l'aérosol prélevé dans le panache de l'Etna ont d'autre part fait apparaître de très forts enrichissements de certains d'entre eux (Cu, Zn, Sb, Pb, Cd, Hg, Se) par rapport à leur abondance moyenne dans la croûte terrestre [74]. Les flux de métaux émis par l'Etna ont pu être déduits à partir de l'estimation du débit de SO_2 , connaissant les proportions $\text{SO}_2/\text{métal}$ dans le panache. Pour

plusieurs de ces métaux (Cd, Hg, Cu, Zn), les flux trouvés sont voisins de ceux résultant des activités industrielles dans les pays méditerranéens environnants et même largement supérieurs dans le cas du sélénium.

Distribution verticale des constituants atmosphériques

La distribution à différents niveaux de la basse troposphère de quelques constituants de la matière saline en suspension dans l'air (Na, K, Ca, Mg) a pu être étudiée à partir d'analyses de l'aérosol filtré au cours de vols d'avions, principalement au-dessus de l'océan [54, 59, 75]. L'ordre de grandeur des ressources atmosphériques de ces éléments au-dessus du Sud de la France entre le sol et 35 km d'altitude a d'autre part fait l'objet d'une première estimation [54, 58].

Quant aux composés carbonés, des mesures faites en atmosphère libre (Pic du Midi et mesures en avion dans le Sud Ouest de la France) ont conduit à des valeurs de concentrations en CO plus faibles que celles généralement admises pour la troposphère de l'hémisphère Nord [76].

D'autres observations aéroportées utilisant des méthodes optiques ont permis de déterminer les quantités verticales intégrées de composés chlorés et azotés (HCl, NO, NO₂, HNO₃) au-dessus de la tropopause et d'obtenir des profils verticaux de concentration en NO₂ et en ozone dans la stratosphère. On se reportera pour plus de détails au dernier rapport d'activité de la section "Aéronomie" du Comité National Français de Géodésie et de Géophysique. En ce qui concerne l'ozone, une grande variabilité de sa concentration a été constatée dans la troposphère [77]. Un modèle photochimique bidimensionnel destiné à simuler la répartition et la circulation de l'ozone dans la stratosphère a par ailleurs été mis au point en collaboration avec l'Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique [78, 79]. On notera enfin que dans le cadre d'un réseau mondial de surveillance mésostratosphérique de l'ozone, des mesures régulières de ce constituant sont faites depuis une station de la Météorologie Nationale (Biscarosse).

Elimination de constituants atmosphériques

La majeure partie des résultats obtenus concerne l'étude de la composition chimique de la retombée atmosphérique continentale, principalement dans le cas d'éléments métalliques.

Quelques résultats d'observations faites au Sud-Ouest de Paris indiquent que la contribution du dépôt sec à l'apport total en Na, K, Ca, et Mg est comprise entre 30 et 50 % [54]. Des mesures des mêmes éléments dans les retombées collectées en Gascogne combinées à des études pédologiques ont fait apparaître que la fertilité du sol de cette région est essentiellement due à l'apport atmosphérique et que l'aérosol provenant de l'océan en est en grande partie responsable [80]. Dans le même ordre d'idée, l'importance agronomique de l'apport atmosphérique de potassium en Afrique Occidentale a été soulignée [81]. En région équatoriale, où l'émission naturelle de composés soufrés atmosphérique est intense, on a noté que la retombée en sulfates est sensiblement égale à celle observée dans des régions polluées du continent européen [72]. Dans le cas de la retombée en métaux lourds, le dépôt en plomb sur la France correspond approximativement en double des émissions de plomb résultant de la pollution automobile et il s'avère que l'élimination par dépôt sec sur la masse foliaire des végétaux contribue à environ 40 % du dépôt total [82]. Des mesures de l'argent des précipitations provenant de nuages ensemencés en Ag I ont d'autre part apporté des informations sur le temps de séjour de cet élément dans l'atmosphère [83].

Un important travail a été consacré à l'étude des impuretés de la neige. Il ressort d'un grand nombre de mesures effectuées en Antarctique qu'il existe une relation directe entre leurs concentrations dans les dépôts de neige et dans l'aérosol atmosphérique [84]. Le problème des origines des multiples éléments métalliques analysés a été examiné ; il a été établi que certains d'entre eux (Pb, Cd, Cu, Zn, et Ag) sont enrichis par rapport à la composition de leur source. A partir d'analyses d'échantillons prélevés à différentes profondeurs par techniques de carottage, des variations temporelles marquées du "bruit de fond" atmosphé-

rique de ces éléments ainsi que des sulfates ont été mises en évidence pour la période de 60 dernières années, sans toutefois que se manifeste une influence décisive de la pollution atmosphérique [85, 86]. Quant aux fluctuations en sulfates, il ne paraît pas exclu qu'elles soient en partie dues à des arrivées sporadiques d'une composante résultant d'événements volcaniques majeurs, après transit stratosphérique [87]. Dans le cas de la neige déposée au Groenland et dans le Massif du Mont Blanc, une nette prédominance de l'influence de la source continentale est apparue et pour cette dernière région, on a constaté à l'issue des 25 années écoulées un doublement des teneurs en Pb, Cd et V [88] et une augmentation significative de l'acidité [89].

Des analyses systématiques de la composition chimique des précipitations recueillies en différents points du territoire français sont poursuivies, notamment dans un réseau récemment mis en place dans le cadre d'un programme de l'OMM - WMO background air pollution monitoring network (BAPMON) -. Les principaux constituants mesurés sont les cations majeurs, le chlore, les sulfates, NO_3^- et NH_4^+ .

Parmi les rares données sur la composition de la retombée océanique, on peut mentionner quelques mesures en Na, K, Ca et Mg dans la retombée collectée en un point fixe de la Méditerranée Occidentale ; une évaluation du flux de matière saline injectée dans l'atmosphère sous l'effet du pétilllement de la surface des mers en a été déduite - 10^{11}T.an^{-1} - [54, 58]. D'autres mesures des mêmes éléments dans la pluie recueillie en Atlantique Equatorial ont révélé l'existence de forts enrichissements en potassium et calcium [54].

Enfin, certaines réactions conduisant à l'élimination de l'ozone atmosphérique ont fait l'objet d'études au laboratoire. Il a ainsi été possible de préciser la cinétique de réactions faisant intervenir des radicaux Cl et ClO avec des espèces hydrogénées susceptibles de piéger du chlore et des réactions de Cl et O avec des dérivés chlorofluorés du méthane (fréons) et de l'éthane [90, 91, 92, 93, 94].

CONCLUSION

L'abondance des résultats cités dans ce rapport souligne l'essor qu'ont connu au cours des années récentes les recherches effectuées en France en matière de physico-chimie de l'atmosphère et confirme la place importante qu'occupe désormais ce secteur scientifique. Les problèmes que soulève la pollution de l'environnement atmosphérique ont été au centre de nombreux travaux dans le domaine de la métrologie des constituants de l'air et ont entraîné une multitude de mesures dans les atmosphères contaminées ainsi que des études sur les mécanismes physiques et chimiques responsables de l'évolution des polluants. Un effort a été fait en vue de la mise au point de méthodes de mesure à distance des composés à l'état gazeux et sur le plan de la détection des fines particules. Les processus de nucléation ont fait l'objet de recherches approfondies tant au laboratoire qu'in situ. Plusieurs études ont été consacrées à la caractérisation du "bruit de fond" naturel des constituants atmosphériques, référence dont on ne peut se passer pour évaluer le degré de contamination à grande échelle de l'atmosphère terrestre, suivre son évolution et prévoir les effets plus ou moins à long terme de la "pollution de fond". Il est apparu que celle-ci ne pouvait être précisée sans une bonne connaissance des différents processus associés au maillon atmosphérique du cycle des constituants considérés. La prise en compte de cette notion de cycle dans les orientations des futurs programmes de recherche atmosphérique, devrait contribuer au développement d'une fructueuse interpénétration des idées entre différentes disciplines scientifiques : physique, chimie et dynamique de l'atmosphère, climatologie, géochimie, océnographie, pédologie, agronomie, vulcanologie.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] CHOVIN P. et OPPENEAU J.C., (1976). – Résultats des recherches sur la pollution atmosphérique (1972-1975), *Collection Recherche-Environnement* n° 4. La documentation française, Paris.
- [2] Recueil des communications présentées au 3^e Symposium sur la recherche en matière de pollution atmosphérique (Bordeaux, 1978).
- [3] MEGIE G., ALLAIN J.Y., CHANIN M.L. et BLAMONT J.E., (1977). – Vertical profile of stratospheric ozone by lidar sounding from the ground, *Nature*, 270, 5635, 329-331.
- [4] TESSIER du GROS F., RENANT D. et POURNY J.C., (1977). – Le lidar en météorologie, *La Météorologie*, VI, 9, 29.
- [5] BARDEAU H., COSTECALDE A., BOUCHARDY A.M., FONTAN J., (1976). – Monitoring de la pollution atmosphérique au-dessus d'un site urbain par mesures lidar *Pure and Applied Geophysics*, vol 114.
- [6] BRICARD J., DELATTRE P., MADELAINE G. and POURPRIX M., (1976). – Detection of ultrafine particles by means of a continuous flux condensation nuclei counter, in *Fine Particles – Aerosol Generation, Measurement, Sampling and Analysis*, B.Y. Liu, Academic Press, 565-580.
- [7] MAIGNE J.P., (1977). – Détermination de la granulométrie d'un aérosol au moyen d'une batterie de diffusion, Thèse d'Etat, Paris VI.
- [8] PERRIN M.L., MAIGNE J.P. et MADELAINE G., (1978). – Etude expérimentale et théorique de l'évolution d'un aérosol inférieur à 0,02 μm , *J. of Aerosol Science*, vol. 9, n° 5, 429.
- [9] BRICARD J., MADELAINE G. et PERRIN M.L., (1977). – Comparison of the size distribution of a submicronic aerosol obtained by the diffusion battery method and electrical aerosol analysis, *Proc. 9th Int. Conf. on Atmospheric Aerosols, Condensation and Ice Nuclei*, Galway, Ireland (sous presse).
- [10] RENOUX A., TYMEN G., BUTOR J.F. and MADELAINE G., (1977) Granulometric spectrum of aerosol particles in slightly-polluted seaside atmosphere, *Atmos. Environm.*, vol 11, 1127-1132.
- [11] TYMEN G., (1978). – Répartition granulométrique de l'aérosol naturel et des particules radioactives issues du Radon, en atmosphère maritime et urbaine peu polluée, Thèse d'Etat, Brest.
- [12] BUTOR J.F., LE GAC J., RENOUX A. and MADELAINE G., (1978). – Size distribution of marine aerosols (Romancap and Thermoclyne expeditions), *Chemosphere* n° 8, 687-690.
- [13] MESZAROS E. et RENOUX A., (1978). – Un constituant fondamental de la pollution de fond : l'aérosol marin, *Poll. Atmos.*, n° 79, 177-181.
- [14] BOULARD P., (1978). – Contribution à l'étude des sources de l'aérosol atmosphérique, Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VII.
- [15] SERPOLAY R. et DESALMAND F., (1978). – L'analyse de l'aptitude de l'air à condenser l'eau considérée comme un moyen de contrôle de la pollution de type urbain, *13^e Symp. Int. sur la pollution atmosphérique*, Paris, 1978.
- [16] CROS B., (1976). – Daily variation in the concentration of Aitken nuclei in Brazzaville, Congo, *Atmos. Environ.* n° 10, 527.
- [17] CROS B., (1977). – Contribution à l'étude des noyaux d'Aitken en Afrique Equatoriale, Thèse d'Etat, Toulouse.
- [18] BERTRAND J., (1976). – Visibilité et brume sèche en Afrique, *La Météorologie*, VI (6), 201-211.
- [19] BERTRAND J. et BAUDET J., (1976). – Concentration et propriétés des noyaux glaciogènes naturels en Afrique de l'Ouest, *J. Rech. Atmosph.*, vol. X, n° 1, 25-43.
- [20] BONSANG B., NGUYEN B.C. et PAUGAM J.Y., (1976). – Sur la formation de gaz sulfurés et de noyaux d'Aitken dans l'atmosphère, le long du littoral, *C.R. Acad. Sc. Paris*, Sér. D. T. 283, 1285-1289.
- [21] PAUGAM J.Y., NGUYEN B.C., BONSANG B., FONGANG S., (1977). – Production de noyaux d'Aitken et de composés soufrés dans l'air au-dessus d'une zone littorale, *Chemosphere* n° 6, pp. 333-339.
- [22] SERPOLAY R., (1977). – Contrôle par satellite d'un panache de pollution ayant entraîné la formation de brouillard, *J. Rech. Atmos.*, 11, n° 3, pp. 197-201.
- [23] BRICARD J., BOULAUD D., MADELAINE G. and VIGLA D., (1975). – SO₂ transformation in controlled atmosphere leading to production of aerosol particles, *Water, Air and Soil Pol.*, 4, 435-445.
- [24] BOULAUD D., BRICARD J. et MADELAINE G., (1978). – Aerosol growth kinetics during SO₂ oxidation, *Atmos. Environm.*, vol 12, 171.
- [25] CONTOUR J.P. et MOUVIER G., (1975). – X-Ray photoelectron spectrometry of nitrogen oxides absorbed on iron oxides, *J. Catalysis*, 40, 342.
- [26] BARBARAY B., CONTOUR J.P. et MOUVIER G., (1977). – Sulfur dioxide oxidation over atmospheric aerosols. X-ray photoelectron spectra of sulfur dioxide absorbed on V₂O₅ and carbon *Atmos. Environm.* 11, 351.

- [27] CABANE M., KRIEN P., MADELAINE G. and BRICARD J., (1976). – Mobility spectra of ions created in gases at atmospheric pressure, *J. of Colloid and Interface Sci.*, vol 57, 289.
- [28] KRIEN P., (1977). – Nature et évolution des ions positifs créés par voie radiochimique à pression atmosphérique, Thèse d'Etat, Univ. Paris VI.
- [29] CABANE M., MADELAINE G. et BRICARD J., (1977). – Rôle des impuretés gazeuses de l'air dans la formation des particules atmosphériques ultrafines et des petits ions. *La Météorologie*, Tome 8, 11.
- [30] CABANE M., GIBONI N., MADELAINE G. et OLLION P., (1978). – Formation of condensation nuclei by ions of given polarity and age, *J. of Aerosol Sciences*, Tome 9, 423.
- [31] BARICOS J., DUPUY J., PEYROUS R. and SCHREIBER G., (1978). – Corona discharge and energy transfer, *J. of Physics, Série D, Applied Physics*, Vol 11, L 187.
- [32] TYMEN G. et RENOUX A., (1977). – Calcul des coefficients de fixation des petits ions positifs en atmosphère bipolaire symétrique, *Chemosphere*, n° 7, 393-400.
- [33] HUERTAS M.L., FONTAN J., (1975). – Evolution times of tropospheric positive ions, *Atmos. Environn.*, vol 9, 1018-1026.
- [34] GONZALES J., (1977). – Contribution à l'étude des ions négatifs de la troposphère, Thèse 3^e cycle, n° 1991, Toulouse.
- [35] HUERTAS M.L., FONTAN J., GONZALEZ J., (1978). – Evolution times of tropospheric negative ions, *Atmosph. Environn.*, vol 12, 238.
- [36] PAUGAM J.Y., (1978). – Etude des principaux paramètres électriques de l'air sur un site côtier, en atmosphère peu polluée, Thèse d'Etat, Brest.
- [37] PAUGAM J.Y. et RENOUX A., (1977). – Caractéristiques des paramètres électriques de l'atmosphère en bord de mer en période estivale, *J. Environ. Sci Health*, A 12, 272-290.
- [38] SCHREIBER G. et BARICOS J., (1977). – Etude de la concentration des ions dans l'air atmosphérique, *Revue Générale d'Electricité*, Tome 86, n° 10, 745-748.
- [39] LAURENT D., DUPLANTIER M. et PEYROUS R., (1978). – Influence de la pollution sur divers paramètres électriques de l'atmosphère et notamment sur le champ électrique terrestre, *Chemosphere*, n° 8, 681-686.
- [40] VERNIN J., RODDIER F., (1975). – Détection au sol de la turbulence stratosphérique par intercorrélation spatioangulaire de la scintillation stellaire, *C.R. Acad. Sc., Paris*, 280, 463.
- [41] RODDIER C., (1976). – Etude des effets de la turbulence atmosphérique sur la formation des images astronomiques, Thèse d'Etat, Nice.
- [42] BORGNINO J., MARTIN F., (1977). – Analyse statistique des déformations aléatoires d'une surface d'ondes dues à la turbulence atmosphérique au voisinage du sol, 1^{ère} partie : Exposé de la méthode – Premiers résultats – *J. Optics*, 8, 319.
- [43] BORGNINO J., VERNIN J., (1978). – Experimental verification of the inertial model of atmospheric turbulence from solar limb motion, *J. Opt. Soc. Am.*, 68, 1056.
- [44] BENSIMON J. et DEHOVE B., (1977). – Modèle thermique unidimensionnel, Rapport COVOS, n° 6B.
- [45] BENSIMON J. et DEHOVE B., (1976). – Evaluation de l'effet d'une flotte d'avions du type Concorde sur l'équilibre thermique de l'atmosphère, *Comm. Symp. Int. sur l'ozone atmosphérique* (Dresden, RDA).
- [46] BENARIE M. and DETRIE J.P., (1978). – Assessment of OECD study on long range transport of air pollutants involving aspects of air chemistry, *Proc. 13th Int. Conf. on Atmospheric Pollution, Paris*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, M. BENARIE Ed., *Studies in Environmental Science*, vol 1, 207-215.
- [47] BENARIE M., (1976). – Transport of pollutants considered from the point of view of short and medium range material balance, *Water, Air and Soil Pollution*, vol 6, 329.
- [48] BERG W.W., VIE le SAGE R., SATO K., PILOTTE J.O., COHN S.L., WINCHESTER J.W. and NELSON J.W., (1977). – Hourly variation of aerosol composition in the great lakes Basin, *J. of Great Lakes Research*, 3, 278-290.
- [49] VIE le SAGE R., BERG W.W., COHN S.L., WINCHESTER J.W. and NELSON J.W., (1978). – Variation de la composition chimique des aérosols atmosphériques en fonction du temps, *Poll. Atmos.*, n° 77, 6-16.
- [50] ROBE-NAUDY M.C. – Etude de la pollution en oxydes d'azote et dioxyde de soufre d'un site industriel. Mise en oeuvre d'un laboratoire mobile équipé d'un système de télé-détection et d'analyseurs au sol pour l'étude de la dispersion des panaches de fumées et de leurs retombées, Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VII.
- [51] CORNU A. and MASSOT R., (1975). – Compilation of mass spectra data, vol 1 & 2, 2nd Ed. Heyden and Son Ltd Editor, London.
- [52] FOSTER P., (1977). – Etude de l'interaction de polluants atmosphériques avec ou sans irradiation UV. Mécanismes et cinétiques de réactions, Thèse d'Etat, Grenoble.
- [53] BUAT-MENARD P., MORELLI J. and CHESSELET R., (1974). – Water-soluble elements in atmospheric particulate matter over Tropical and Equatorial Atlantic, *J. Rech. Atmos.*, vol VIII, n° 3-4, 661-673.
- [54] MORELLI J., (1977). – Contribution à l'étude du cycle atmosphérique du potassium marin, Thèse d'Etat, Univ. Paris VI.
- [55] HOANG CHI TRACH et SERVANT J., (1974). – Exemple d'un apport continental de quelques métaux dans l'aérosol au-dessus de l'atlantique Nord à la latitude de 40° N, *J. Rech. Atmos.*, vol VIII, n° 3-4, 791-805.

- [56] CHESSELET R., BUAT-MENARD P., LESTY M. and JEHANNO C., (1976). – Heavy metals in oceanic microlayer derived aerosols, Paper presented at the Joint Oceanographic Assembly, Edinburgh (Scotland), 13-24 september, Session C₇ : The skin of the ocean.
- [57] BUAT-MENARD P. and CHESSELET R., (1979). – Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of ocean suspended matter, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 42, 399-411.
- [58] MORELLI J., (1978). – Données sur le cycle atmosphérique des sels marins, *J. Rech. Océanogr.*, vol III, n° 4, 27-49.
- [59] CHESSELET R., MORELLI J. and BUAT-MENARD P., (1972). – Some aspects of the geochemistry of marine aerosols, Reprint from Nobel Symposium 20, "The changing chemistry of the ocean", Ed. D. DYRSSEN and D. JAGNER, Stockholm.
- [60] RANCHER J., (1978). – Contribution à l'étude du cycle du chlore, du brome et de l'iode dans l'atmosphère au-dessus de l'océan, Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VII.
- [61] NGUYEN B.C., BONSANG B. and LAMBERT G., (1974). – The atmospheric concentration of sulfur dioxide and sulfate aerosols over the Antarctic, Subantarctic areas and oceans, *Tellus*, 26, 241-249.
- [62] BONSANG B., NGUYEN B.C., GAUDRY A., LAMBERT G., (1977). – Variation of the chemical composition of marine aerosols in a high biological productivity area *Proc. 9th Int. Conf. on Atmospheric Aerosols, Condensation and Ice Nuclei*, Galway, Ireland, (sous presse).
- [63] NGUYEN B.C., BONSANG B., LAMBERT G. and PASQUIER J.L., (1975). – Residence time of sulfur dioxide in the marine atmosphere, *Pure and Applied Geophysics*, 123, 489-500.
- [64] TYMEN G., BUTOR J.F., RENOUX A. et MADELAINE G., (1975). – Quelques caractéristiques de l'aérosol situé au-dessus de l'Atlantique (Campagne Midlante A, Avril-Mai 1974), *Chemosphere*, 4, 357-360.
- [65] NGUYEN B.C., BONSANG B., GAUDRY A., LAMBERT G., (1977). – Oxidation processes of sulfur components in the marine atmosphere, Paper presented at the IAGA/IAMAP Joint Assembly, Seattle, USA.
- [66] NGUYEN B.C., (1976). – Le cycle du soufre, Rapport présenté au XIV^e Journées de l'Hydraulique, Mécanique des fluides et l'environnement, Question I, Rapport 13, Société Hydrotechnique de France, Paris.
- [67] MARTY J.C., SALIOT A. et TISSIER M., (1978). – Inventaire, répartition et origine des hydrocarbures aliphatiques et polyaromatiques dans l'eau de mer, la micro-couche de surface et les aérosols marins en Atlantique tropical Est, *C.R. Acad. Sc., Paris*, T 286, Série D. 833-836.
- [68] DOMERGUE J.L., CROZAT G. and TINGA A., (1977). – Size selection and modification of the global chemical composition in the production of fine dust by wind erosion of soil, *Proc. 9th Int. Conf. on Atmospheric Aerosols, Condensation and Ice Nuclei*, Galway, Ireland, (sous presse).
- [69] BARLET A., (1974). – Caractérisation des masses d'air à l'aide de quelques éléments constitutifs des aérosols atmosphériques dosés par spectrophotométrie d'absorption atomique, Application à l'agronomie, Thèse de Doctorat Ingénieur, Abidjan.
- [70] CROZAT G., DOMERGUE J.L., BAUDET J. et BOGUI V., (1978). – L'influence des feux de brousse sur la composition chimique des aérosols atmosphériques en Afrique de l'Ouest *Atmos. Environm.*, 12, (9), 1917-1920.
- [71] CROZAT G., (1978). – L'aérosol atmosphérique en milieu naturel. Etude des différentes sources de potassium en Afrique de l'Ouest (Côte d'Ivoire), Thèse d'Etat, Toulouse.
- [72] DELMAS R., BAUDET J. et SERVANT J., (1978). – Mise en évidence de sources naturelles de sulfates en milieu tropical humide, *Tellus*, 30 (2), 158-168.
- [73] HAULET R., ZETWOOG P. et SABROUX J.C., (1977). – Sulfur dioxide discharge from Mount Etna, *Nature*, 268, 715-717.
- [74] BUAT-MENARD P. and ARNOLD M., (1978). – The heavy metal chemistry of atmospheric particulate matter emitted by Mount Etna Volcano, *Geophys. Res. Letters*, vol 5, n° 4, 245-248.
- [75] MORELLI J., BUAT-MENARD P. and CHESSELET R., (1974). – Magnesium depletion with increasing altitude in the water-soluble particulate matter collected over the North-Atlantic, *J. Rech. Atmos.*, vol VIII, n° 3-4, 993-994.
- [76] DELAUNAY J.C., (1978). – Mise au point d'un dispositif de mesure de l'oxyde de carbone dans l'atmosphère au niveau du ppb par chromatographie en phase gazeuse Thèse 3^e cycle, Univ. Paris VII.
- [77] BARBE A., SECROUN C. et JOUVE P., (1977). – Infrared and microwaves high resolution spectrum of ν_3 band of ozone, *J. of Molecular Spectroscopy*, T 64, 343.
- [78] BERTIN M. et BRASSEUR G., (1976). – Utilisation d'un modèle bidimensionnel pour l'étude de la répartition et de la circulation de l'ozone stratosphérique. *L'Aéronautique et l'Astronautique*, n° 61, 6.
- [79] BERTIN M., BORGHI R., BRASSEUR G., JOATTON R. et MAIGNAN M., (1976). – Modèle mathématique de la stratosphère, *Rapport COVOS* n° 6A.
- [80] LABEYRIE J. et JEHANNO C., (1974). – Retombée atmosphériques et fertilité du sol en Gascogne, *J. Rech. Atmos.*, Vol VIII, n° 3-4, 921-937.
- [81] BARLET A., DIDIER De SAINT-AMAND R., CROZAT G. et DOMERGUE J.L., (1976). – Importance agronomique des apports en potassium via l'atmosphère en zone de Savane, *L'agronomie Tropicale*, XXXI-1, 47-49.
- [82] SERVANT J., (1975). – Le bilan hydrométéorologique du plomb sur la France (1972-1973). Considération sur le bilan et l'importance du dépôt sec, *Comm. Conf. Int. sur les métaux lourds dans l'environnement*, Toronto, Canada.

- [83] LACAUX J.P., DESSENS J., (1976). – An automatic sequential rainfall sampler for analysis of contaminants at about 10^{-6} ppm level, *Proc. Int. Conf. on Clouds Physics, Boulder*, pp. 587-590.
- [84] BOUTRON C., (1978). – Influence des aérosols d'origine naturelle et anthropogénique sur la chimie des neiges polaires, Thèse d'Etat, Grenoble.
- [85] LORJUS C. et BRIAT M., (1976). – Teneurs en éléments traces dans la glace ; variations temporelles liées à l'activité humaine et au climat, Rapport présenté aux XIV^e Journées de l'Hydrauliques, Société Hydrotechniques de France, Paris.
- [86] BOUTRON C., MARTIN S. and LORJUS C., (1977). – Composition of aerosols deposited in Antarctic snows : time dependence and sources, *Proc. 9th Int. Conf. on Atmospheric Aerosols Condensation and Ice Nuclei*, Galway, Ireland, (sous presse).
- [87] DELMAS R. and BOUTRON C., (1978). – Sulfate in Antarctic snow layers : spatio-temporal distribution, *Atmos. Environ.*, 12, 723-728.
- [88] BRIAT M., (1978). – Evaluation of levels of Pb, V, Cd, Zn and Cu in the snow of Mt Blanc during the last 25 years, *Proc. 13th Int. Conf. on Atmospheric Pollution, Paris*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, M. Benarie Ed., *Studies in environmental Science*, vol I, 225-228.
- [89] DELMAS R. and ARISTARAIN A., (1978). – Recent evolution of strong acidity of snow of Mt Blanc, *Proc. 13th Int. Conf. on Atmospheric Pollution*, Paris, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, M. BENARIE Ed., vol I, 233-237.
- [90] POULET G., Le BRAS G. et COMBOURIEU J., (1974). – Etude cinétique des réactions du chlore atomique et du radical C10 avec le méthane par la technique du réacteur à écoulement rapide couplé à un spectromètre de masse, *J. Chimie Physique*, n° 1, 101-106.
- [91] POULET G., Le BRAS G. and COMBOURIEU J., (1977). – Kinetics of the Cl + C₂H₂ reaction. Stratospheric implication, *J. of Physical Chemistry*, 81, 2303.
- [92] POULET G., Le BRAS G. and COMBOURIEU J., (1978). – Kinetic study of the reactions of Cl atoms with HNO₃, H₂O₂ and HO₂, *J. of Chemical Physics*, vol 69, n° 2, 767-773.
- [93] JOURDAIN J.L., POULET G., BARASSIN J., Le BRAS G. et COMBOURIEU J., (1977). – Mécanismes chimiques de la pollution atmosphérique : étude cinétique de réactions élémentaires possibles, *Poll. Atmos.*, n° 75, 256-259.
- [94] JOURDAIN J.L., Le BRAS G. et COMBOURIEU J., (1978). – Etude cinétique des réactions du 1, 1, 1 trifluoro chloroéthane avec les atomes de chlore et d'oxygène, *J. Chimie Physique*, 75, n° 3, 318-323.

X – MODIFICATION DU TEMPS

P. ADMIRAT

Laboratoire de Glaciologie du C.N.R.S.
2, rue Très Cloîtres – 38031 GRENOBLE CEDEX

Dans ce domaine de la Physique de l'Atmosphère, la plupart des projets ont pris naissance par suite de leur intérêt économique et ont été soutenus par divers secteurs d'activité.

Depuis 1976, les études scientifiques relatives à la modification du temps sont concertées et regroupées sous l'égide de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique qui a créé un Comité "Modification du Temps". Cette organisation nouvelle est particulièrement opportune dès lors que les campagnes scientifiques nécessaires à ces recherches sont souvent considérables par leur durée, leur coût, la variété des mesures nécessaires et leur caractère international. C'est ainsi qu'en 1978 le comité mis en place par la DGRST a coordonné la participation française au programme suisse-franco-italien Grossversuch IV portant sur les orages à grêle et l'efficacité de la méthode soviétique.

Les cinq thèmes suivants regroupent l'ensemble de l'activité :

NUAGES – DISSIPATION ET PRECIPITATIONS PROVOQUEES

Des essais de dissipation de brouillards non surfondus ont été poursuivis sur l'aéroport de Brest-Guipavas jusqu'en 1976 (SERPOLAY, ANDRO). Les résultats portant sur l'efficacité de divers agents introduits dans les brouillards ou dans des couches d'air humide ont été présentés à l'occasion de la conférence AGARD de Bruxelles en 1976 [1, 2]. Actuellement l'intérêt se porte sur des essais en grande chambre à brouillard.

Le déclenchement des précipitations a donné lieu à une série d'expériences d'ensemencement par des particules hygroscopiques injectées dans les parties chaudes des nuages à partir du sommet du Puy-de-Dôme (1465 m) durant l'été 1977 (J. DESSENS, S. GODARD et R. SERPOLAY). Le contrôle des modifications apportées à l'intérieur des nuages a été effectué essentiellement avec un radar de 8 mm de longueur d'onde. L'analyse des données est actuellement en cours.

Un autre axe de recherche de l'I.O.P.G. (J. DESSENS) a été orienté vers l'étude de diverses techniques de contrôle des expériences de modification du régime des précipitations liquides ou solides. Une méthode originale statistique utilisant le cumul des résidus des séries climatologiques chronologiques et spatiales a été développée et testée sur une expérience française de pluie provoquée [3].

FOUDRE

Un groupe de recherche mixte CEA/EDF/CNET s'est constitué pour étudier la foudre et ses répercussions au niveau des Télécommunications dans la zone expérimentale de Saint-Privat d'Allier (Centre de la France) (A. EYBERT-BERARD, R. FIEUX, C. GARY, J. HAMELIN, P. HUBERT, B. HUTZLER, A. MEESTERS, P. PERROUD, J.-M. PERSON, J.-F. KARC-

ZEWSKY, F. X. SENE). Des coups de foudre sont déclenchés artificiellement à l'aide d'une technique fusée-fil [4, 5].

La mesure du champ électromagnétique rayonné par l'éclair [6, 7] à l'aide d'un capteur large bande passante et pour des distances du point d'impact variant de 100 m à 50 km ainsi que les mesures du courant foudre et de la vitesse ascensionnelle de l'éclair pour un éclair déclenché, ont permis de bâtir un modèle mathématique de ce rayonnement.

De juin à septembre 1978 ont été effectuées des mesures comparatives. Les connaissances acquises pour les éclairs déclenchés permettront d'en déduire les courants de foudre des éclairs naturels et de calculer les surtensions induites dans les artères des Télécommunications [8, 9].

ORAGES – MODELISATION

Des modèles mono et bidimensionnels ont été élaborés par le groupe de l'Université de Toulouse (PICCA, LANGUIN, SAPORTE, S. CHAUZY, A. ELEFTERION, P. SARTHOU, R. RASOAMANANA).

Dans le modèle monodimensionnel on représente les phénomènes liés à la microphysique. Le rôle de la phase glace dans les précipitations a été précisé. On détermine ainsi les vitesses verticales et la teneur en eau liquide ou en glace en fonction du temps et de l'altitude. Le cas d'un ensemencement en noyaux glacigènes artificiels a été étudié. On montre qu'un ensemencement provoque une diminution de la grêle et une augmentation de la quantité de pluie. L'influence du moment de l'intervention a été envisagée. On a testé également le rôle du régime de congélation sur l'intensité des précipitations et mis en évidence l'influence du mode de découpage en classes du spectre dimensionnel des gouttes [10].

Dans le modèle bidimensionnel à symétrie cylindrique on tient compte des échanges entre le nuage et le milieu environnant. On a étudié en particulier l'influence du coefficient d'échange turbulent sur la vie du nuage et on a comparé l'évolution d'un nuage entretenu par une alimentation continue à sa base avec celle d'un nuage non entretenu. Le modèle permet de connaître à chaque instant et en tout point du nuage le spectre granulométrique des gouttes (l'existence de la phase glace n'a pas été envisagée pour limiter le temps de calcul). On détermine ainsi avec une bonne définition spatiale (mailles de 100×200 m) et temporelle ($\Delta t = 1$ mn) l'évolution de la microstructure du nuage [11, 12, 13, 14].

Actuellement ce laboratoire participe sur le plan de la simulation numérique au programme COCAGNE (Conséquence de la Convection Artificielle, Génération de Nuages et autres Effets) qui se développe sur le site expérimental du C.R.A. de Lannemezan.

Une utilisation opérationnelle d'un modèle à une dimension qui tient compte de l'entraînement de l'air, a été tenté par J. F. MEZEIX pour la prévision de la grêle au niveau de la région française du Languedoc [15, 16, 17]. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque la situation météorologique permet des développements orageux d'évolution diurne, sans changement de masse d'air.

ORAGE – PREVENTION DE LA GRELE : OPERATION GROSSVERSUCH IV

Le projet "Grossversuch IV" a pour objectif le test scientifique de l'efficacité de la méthode soviétique de prévention de la grêle. Ce programme international (Suisse, Italie, France) se déroule en Suisse dans la région du Napf. Après deux ans de préparation (1975-1976), il est entré dans une phase opérationnelle prévue sur 5 ans jusqu'en 1981. Tous les orages qui passent sur la zone de 2000 km^2 sont étudiés de la même manière à l'aide de radars de 3 et 10 cm de longueur d'onde et leurs précipitations recueillies sur un réseau de 400 grêli-mètres et pluviomètres quadrillant le terrain suivant une maille de 2 km.

Ces orages sont ensemencés ou non ensemencés (fusées Oblako) en fonction du résultat d'un tirage au sort. L'effet de l'ensemencement est mesuré, non pas avec les données des assurances grêle qui continuent d'être exploitées par ailleurs [18], mais par comparaison des paramètres physiques des précipitations (surface grêlée, nombre et dimension des grêlons, masse et énergie cinétique de la grêle, spectre dimensionnel, . . .) mesurés dans les deux séries d'orages qui comprendront près de 100 cas à la fin de la période [19].

Un groupe du Laboratoire de Glaciologie de Grenoble (P. ADMIRAT, J.-C. GRENIER et S. ZAIR) associé au CNEFA (J.-F. MEZEIX, N. DORAS, J.-P. ROUET) collabore à ce projet pour la France. Ce groupe s'est spécialisé dans la mesure des précipitations au sol [20, 21] et supporte toute l'infrastructure de collecte et de dépouillement des données. L'étude des résultats a conduit jusqu'à présent à confirmer la structure en "cœur de grêle" des précipitations, véritables zones d'accumulation de la grêle au sol, et à démontrer que l'interprétation de cette structure au moyen d'une dynamique pulsatoire des cellules orageuses recevait une assez bonne confirmation expérimentale grâce aux mesures radar [22, 23]. Les travaux statistiques portant sur les paramètres locaux ou globaux des précipitations "traitées" et "non traitées" sont poursuivis régulièrement par trois équipes suisses, italiennes et françaises, mais les résultats concernant l'efficacité de la méthode de prévention ne sont pas attendus avant la fin de la période opérationnelle.

Une technique de contrôle physique au niveau de l'insémination par la détermination dans l'air [24] et dans les précipitations [25] du contenu en particules d'iodure d'argent a été développée par J.-P. LACAUX et J. DESSENS et appliquée d'abord dans le programme LANGUEDOC [26] et actuellement dans GROSSVERSUCH IV. La partie technologique de cette étude a permis la construction d'un collecteur automatique qui échantillonne dans le temps la précipitation [27, 28]. Une version améliorée et simplifiée de cet appareil a été utilisée en 1977 pour mesurer le niveau naturel de la concentration d'argent dans les précipitations sur le site de GROSSVERSUCH IV, en Suisse. En 1978, cet effort a culminé dans une participation importante au programme GROSSVERSUCH IV, mettant en jeu pendant six semaines un réseau de 15 collecteurs de précipitation, un système de deux radars météorologiques à effet Doppler, et une station de radiosondages. Cette campagne était organisée sous l'égide de la DGRST.

MODIFICATION INVOLONTAIRE DU TEMPS

L'étude des influences de l'activité humaine sur le temps est aussi au centre de l'intérêt d'un groupe de l'I.O.P.G. de Clermont-Ferrand.

En collaboration avec EDF et l'Université de Toulouse, ce groupe étudie le comportement d'un jet chaud dans sa partie en air clair et dans sa partie nuageuse. Le but de cette étude est d'établir un modèle réaliste des effets d'un rejet de chaleur localisé et important dans l'atmosphère. A cette fin, une série d'expériences est conduite à Lannemezan avec un Météotron d'une puissance de 1000 MW. Une étude quantitative du jet convectif au-dessus d'un Météotron de puissance moindre a déjà été réalisée par B. BENECH qui a également envisagé une pénétration du panache dans des couches stables en altitude [29, 30].

Une étude a été entreprise en vue de mettre en évidence, par photographies prises de satellites, le phénomène de formation et de diffusion des nappes de brouillard en rapport avec la présence d'effluents d'origine industrielle [31].

Enfin la mesure des noyaux de condensation nuageuse et des noyaux géants est également au programme de l'activité du groupe. L'influence du rejet dans l'atmosphère de substances tensio-actives sur les processus de condensation et d'évaporation fait actuellement l'objet d'un travail de recherche tendant à apporter des précisions sur ce problème [32].

CONCLUSION

Au cours de cette période, la modification du temps est entrée dans une phase plus scientifique. L'opération "Grossversuch IV" sur la prévention de grêle sera suivie attentivement jusqu'en 1981.

Le Comité "Modification du Temps" de la DGRST coordonnera, dans les années à venir, les actions des laboratoires français au regard du programme d'Augmentation des Précipitations lancé par l'O.M.M.

LISTE DES ABREVIATIONS UTILISEES

C.E.A.	Commissariat à l'Énergie Atomique
E.D.F.	Electricité de France
C.N.E.T.	Centre National d'Étude des Télécommunications
I.O.P.G.	Institut et Observatoire de Physique du Globe du Puy-de-Dôme
G.N.E.F.A.	Groupeur National d'Étude des Fléaux Atmosphériques
D.G.R.S.T.	Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique

- [1] ANDRO A., GODARD S. et SERPOLAY R. – Artificial modification of the air microstructure inside cloudy or simply moist stratified layers - 1977, AGARD Conference Bruxelles 1976, AGARD Conference Proceedings, n° 192, p. 5-1 à 5-13.
- [2] SERPOLAY R. (1978) – La dissipation des brouillards au moyen des agents servant à modifier les nuages. *La Météorologie*, n° 12, p. 41-52.
- [3] BOIS P., DESSENS J. et LACAUX J.P. (mars 1978) – Détection d'anomalies accidentelles ou recherchées dans les séries chronologiques utilisées en modification du temps. Présenté à la XVI^e Assemblée Générale de Grenoble, septembre 1976 et publication du JAM.
- [4] EYBERT-BERARD A., FIEUX R., GARY C., HAMELIN J., HUBERT P., HUTZLER B., MEESTERS A., PERROUD P. (juin 1976) – Eclairs déclenchés à la station de Saint-Privat d'Allier - 13^e Conférence Internationale pour la protection contre la foudre - Venise.
- [5] EYBERT-BERARD A., FIEUX R., GARY C., HAMELIN J., HUBERT P., MEESTERS A., PERROUD P., PERSON J.M. (may-june 1978) – Research on artificially triggered lightning in France - I.E.E.E. - *Trans. Power apparatus and systems*. Vol. PAS 97 n° 3.
- [6] HAMELIN J., MEESTERS A. (mai 1977) – Champ électromagnétique lié aux décharges de foudre. Protection des infrastructures de Télécommunications S.E.E. Perros-Guirrec.
- [7] HAMELIN J., MEESTERS A. (octobre 1977) – Mesures des champs électromagnétiques créés par les décharges orageuses - La mesure dans les Télécommunications URSI Tricastel.
- [8] HAMELIN J., KARCZEWSKY J.F., SENE F.X. (mai-juin 1978) – Sonde de mesures du champ magnétique du à une décharge orageuse. *Annales des Télécommunications*, t. 33, n° 65.
- [9] GROUPE DE RECHERCHE DE SAINT-PRIVAT D'ALLIER (mai 1978) – Développement des recherches sur la foudre en France - 14^e Conférence internationale pour la protection contre la foudre - Gdansk.
- [10] LANGUIN C. (octobre 1973) – Simulation numérique de la dynamique et de la microphysique d'un nuage convectif - Rôle de la phase glace dans les précipitations - Thèse de 3^e cycle.
- [11] CHAUZY S., ELEFTERION A. et SARTHOU P. (1975) – Une méthode d'étude expérimentale in situ de la zone d'échange entre les nuages convectifs et leur environnement. *Atmosphère*, Vol. 13, n° 2.
- [12] RASOAMANANA R. (1976) – Un modèle bidimensionnel de nuage convectif – Thèse de 3^e cycle.
- [13] SARTHOU P. (juin 1977) – Contribution à l'étude des modèles mono et bidimensionnels de nuages convectifs - Thèse d'Etat.
- [14] RASOAMANANA R. et SARTHOU P. (1977) – Un procédé de simulation numérique des cumulus à faible développement. *J. Rech. Atm.* 11, n° 4, p. 255-267.
- [15] MEZEIX J.F. (1975) – Modèle mathématique d'un orage avec entraînement de l'air. *Rapport Technique n° 21 du GNEFA*.
- [16] MEZEIX J.F. et CHASSANY J. (1976) – Aspects thermodynamiques et synoptiques dans la formation de la grêle pour la région Languedoc. *Rapport Technique n° 23 du GNEFA*.

- [17] MEZEIX J.F., ADMIRAT P. et CHASSANY J. (1977) – Stratification des conditions thermodynamiques de l'atmosphère pour la détermination d'un prédicteur de grêle dans la région du Languedoc. *Rapport Technique n° 26 du GNEFA*.
- [18] DESSENS J. (1978) – Mesures de la grêle à l'aide de données physiologiques. *Atmosphère-Océan* 16, p. 107-113.
- [19] FEDERER B., WALDVOGEL A., SCHMID W., HAMPEL F., ROSINI E., VENTO D., ADMIRAT P., ROUET J.P. (1977) – Grossversuch IV design of a randomized hail suppression experiment using the soviet method - E.T.H. n° 81.
- [20] GNEFA (1977) – Mesure des précipitations de grêle au sol - *Rapports techniques n° 29 - 30 - 31*.
- [21] MEZEIX J.F. and ADMIRAT P. – The measurement of hail at ground level. *Journal Ocean Atmosphère*, 16, 1.
- [22] ADMIRAT P., GOYER G. et BLIN P. (1977) – Un mouvement pulsatoire des cellules orageuses à l'origine des coeurs de grêle observés au sol - Journées "Convections" de Clermont-Ferrand.
- [23] DESROZIERS G. et RENOUF M. (1978) – Etude de quelques cas d'orages à grêle dans la région du Napf - *Publication n° 218 du Laboratoire de Glaciologie*.
- [24] LACAUX J.P., PHAM VAN DINH et BEGUIN J. (1974) – Determination of silver iodide in air by flameless atomic absorption spectrophotometry. *Atomic Absorption Newsletter*, 13, n° 3, p. 49-52.
- [25] LACAUX J.P. (1974) – Contenu en argent des précipitations orageuses dans la région du Languedoc. *C.R. Acad. Sci., Série B*, 7, 278, p. 143-145.
- [26] LACAUX J.P. et RIBET S. (février 1977) – Rapport technique "LANGUEDOC 1976". *Note IOPG, n° 34*.
- [27] DESSENS J., LACAUX J.P. (1975) – Temps de séjour et contrôle des effets de l'Agl dans l'Atmosphère - Rapport de synthèse. DRME 74018, 28 p plus annexes.
- [28] LACAUX J.P. et DESSENS J. (1976) – An automatic sequential rainfall sampler for analysis of contaminants at about 10^{-6} ppm level - Proceedings on Int. Conf. on Cloud Physics, Boulder, p. 587-590.
- [29] DESSENS J. (janvier 1977) – Effets produits par une aire de surchauffe - Journées d'études sur la convection développée, Clermont-Ferrand.
- [30] BENECH B. (1977) – Etude dynamique d'un type de convection artificielle dans l'atmosphère - Thèse d'Etat, Université de Toulouse n° 740.
- [31] SERPOLAY R. (1977) – Contrôle par satellite d'un panache de pollution ayant entraîné la formation de brouillard. *J. Rech. Atmos.*, 11, n° 3, p. 197-201.
- [32] SERPOLAY R. (1976) – Les agents physico-chimiques utilisés dans le domaine de la modification du temps : état actuel de nos connaissances et prospective de recherches - *Journal de Recherches Atmosphériques*, 10, n° 4, p. 233-242.

SECTION VI
SCIENCES HYDROLOGIQUES

TABLE DES MATIERES

	Pages
I – Eaux de surface M. ROCHE	281
II – Climatologie Ch. P. PEGUY	285
III – Aménagements des Eaux M. CARLIER	286
IV – Qualité des Eaux superficielles G. LEYNAUD	289
V – Eaux souterraines G. CASTANY	291
VI – Télédétection et eaux souterraines Y. VUILLAUME	299
VII – Neiges et glaces L. LLIBOUTRY	301

I – EAUX DE SURFACE

Marcel ROCHE
O.R.S.T.O.M.

1 – ACQUISITION DES DONNEES

1.1 – Effort méthodologique

La quadriennat 1975-1978 a été marqué par un effort de réflexion sur le but de l'acquisition des données et les relations entre les possibilités de cette acquisition et les besoins suscités par l'aménagement des eaux.

Cette tournure d'esprit rejoint les préoccupations d'un grand nombre d'hydrologues du monde et spécialement de ceux dont la vocation est de participer aux opérations de développement. En France, de telles démarches ont lieu surtout dans quelques agences de bassins, dans les services de l'Agriculture compétents en matière d'eau et dans différentes sociétés dont le BRGM et l'ORSTOM.

Sur le plan international, une des manifestations les plus caractéristiques de ce besoin d'éclaircissement a abouti, sous l'égide de l'OMM, à préconiser la mise en œuvre d'un système hydrologique opérationnel à fins multiples (SHOFM), caractérisé par une approche systématique du problème de l'acquisition des données et de leur mise à disposition. Les principales administrations compétentes, ainsi que le BRGM et l'ORSTOM, participent sur le plan national à l'élaboration du SHOFM. Les réflexions propres de deux derniers organismes ont abouti à une position commune qui s'est exprimée lors du séminaire du CEFIGRE (Centre de formation international pour la gestion des ressources en eau) sur les données hydrologiques, qui s'est déroulé en mai 1978. Les nombreuses interrelations qui existent entre les éléments du système données et les éléments du système besoins (pour les aménagements) condamnent toute analyse purement cartésienne et obligent pratiquement à une approche systématique dans laquelle du reste les interfaces jouent un rôle important.

1.2 – Méthodes et appareillages

En matière de capteurs (détection directe du phénomène physique : limnigraphes, pluviomètres, etc.), il n'y a pas grande nouveauté. Les limnigraphes pneumatiques produits en France essentiellement par NEYRPIC ont été améliorés substantiellement durant ces quatre années. Certains organismes, dont l'ORSTOM qui l'a fait à l'échelle mondiale, ont participé à l'opération d'intercomparaison des pluviomètres à l'initiative de l'OMM. Un des résultats les plus clairs a été de mettre en évidence l'effet du vent sur le captage de la pluie suivant la hauteur du pluviomètre au-dessus du sol ; ces résultats devraient conduire normalement à l'adoption du standard international (pluviomètre enterré dont la collerette est entourée d'une grille d'environ 1 m² pour lequel le dispositif à turbulence fine crée des perturbations beaucoup moins importantes que tout autre type d'appareil.

Dans l'appareillage de mesure relatif aux eaux de surface, on enregistre quelques nouveautés. Si le matériel de jaugeage classique reste à peu près le même, les jaugeages isoto-

piques sont devenus opérationnels et la mise en œuvre des "vaches", pour la production instantanée de radio-isotopes à courte durée de vie, offre un certain avenir à ces méthodes.

Pour l'étude de ruissellement, quelques organismes ont mis au point et rendu opérationnels des simulateurs de pluie. Pour son compte, l'ORSTOM, en Afrique Noire, utilise maintenant couramment un grand simulateur capable d'arroser une surface de plus de 100 m² et a mis au point un mini-simulateur dont la construction économique permet de le reproduire en de nombreux exemplaires et qui permet d'étudier les phénomènes d'infiltration sur des surfaces de 1 m² : c'est l'instrument idéal pour travailler en forêt. Pour le contrôle de l'infiltration de l'eau dans le sol, l'ORSTOM a mis au point des sondes à chocs thermiques d'une utilisation beaucoup plus pratique et beaucoup moins onéreuse que la classique sonde à neutrons : cet appareil sera fabriqué en petite série dans le courant de l'année 1979.

Dans les transmissions des données par radio au niveau du sol, les progrès sont continus mais il n'y a pas de grande innovation. Par contre, on commence à disposer d'un matériel de transmission par satellite qui doit permettre dans un délai relativement court (deux ou trois ans) d'améliorer considérablement les systèmes de télétransmission. Une opération en vraie grandeur a démarré au Sénégal en juin 1978 (ORSTOM) : il s'agit de transmettre les données d'un pluviographe et celles d'un limnigraphe par l'intermédiaire d'une part d'un géostationnaire (METEOSAT), d'autre part d'un orbital (système ARGOS), en n'utilisant que du matériel européen. Les matériels de transmission et les interfaces sont fournis par l'Agence spatiale européenne, la société AERAZUR, Electronique M. Dassault, pour la partie transmission, les sociétés NEYRTEC et OTT pour les codeurs.

Signalons enfin le lancement durant ces quatre ans de l'acquisition des données par télédétection en France. Un certain nombre de laboratoires de traitement des images se sont montés dans des unités purement hydrologiques, notamment au BRGM et à l'ORSTOM.

1.3 - Réseaux

En France, l'Agriculture a, semble-t-il, définitivement assis son réseau de mesures hydro-métriques. La Division technique générale, pour sa part, maintient sensiblement le statu quo étant arrivée déjà depuis quelque temps à un optimum.

Des réflexions sur ce qu'on appelait la rationalisation des réseaux rejoignent de très près l'analyse systémale des relations entre la production des données et la demande des aménageurs et exploitants. A ce sujet, il convient de faire la différence entre la rationalisation qui se réfère aux facteurs purement physiques (mesures à prendre pour déterminer telle variable concernant un phénomène à un endroit donné avec une position et une confiance statistiques données), et l'optimisation qui consiste soit à maximiser la quantité d'information, pour un budget pré-déterminé, soit à faire une sorte d'analyse coût-bénéfice basée sur la comparaison entre le coût marginal d'une augmentation d'information et le bénéfice marginal qu'on en tire pour la réalisation ou l'exploitation des aménagements. Il convient d'ajouter que de telles analyses ne sont presque jamais menées à bien et que le bon sens et l'expérience en matière de réseaux sont encore les outils les plus efficaces.

1.4 - Saisie des données

La période 1975-1978 a vu se généraliser la saisie semi-automatique des données ; la plupart des administrations, organismes et bureaux d'études français dépouillent actuellement les diagrammes (limnigrammes et pluviogrammes) au moyen de tables de lecture couplées à des perforatrices de cartes ou de rubans. La saisie à la main se fait toujours sur cartes perforées mais on emploie également couramment des disquettes. La saisie entièrement automatique à partir de capteurs avec ou sans télétransmission constitue encore une exception, sauf dans les services dont le rôle essentiel consiste à gérer des systèmes d'aménagement (notamment EDF). Il semble que l'on ait eu certains déboires avec les enregistrements sur mini-cassettes.

1.5 – Fichiers et banques de données

On a essayé d'actualiser un peu la terminologie concernant le stockage des données en réservant le nom de banque aux systèmes qui comportent un dispositif d'interrogation directe ou un service de mise à disposition immédiate. Le simple stockage conserve le nom de fichier.

Les "fichiers-cartes" sont peu à peu abandonnés pour les "fichiers-bandes". Lorsqu'il s'agit de conserver indéfiniment des données, cela ne va pas sans quelques inconvénients, le fichier-bande étant, malgré toutes les précautions qu'on peut prendre, plus fragile qu'un fichier-cartes stocké dans de bonnes conditions mécaniques et climatiques. L'idéal est évidemment d'avoir les deux : le fichier-bande est alors le seul opérationnel (c'est lui qui sera éventuellement utilisé par la banque), le fichier-cartes ne jouant plus qu'un rôle d'archives avec un système de classement plus économique.

Pour la France, le fichier central est organisé par le Service des problèmes de l'eau. Le BRGM a son propre fichier, ainsi que l'ORSTOM qui sert de conseiller en la matière pour de nombreux pays étrangers ou organismes internationaux ou inter-gouvernementaux.

1.6 – Traitement primaire des données

La période a été marquée par une prise de conscience généralisée de l'hétérogénéité des séries, en particulier en matière de pluviométrie où il s'agit le plus souvent d'erreurs statistiques provenant de modification ou d'inadéquation de l'appareillage. La méthode classique des doubles cumuls a été sensiblement améliorée par la recherche de vecteurs régionaux qui permettent à la fois une analyse plus sûre et un coût nettement plus faible.

La plupart des services et organismes ont maintenant des programmathèques pour toutes les opérations de traitement primaire des données et constitution des fichiers.

2 – MONOGRAPHIES

Pour la France, la plus grande étude régionale dont l'achèvement est prévu en 1978 concerne "Les bassins de la Seine et les cours d'eau de Normandie". Elle est publiée par l'Agence Seine-Normandie avec le concours de M. Tixeront.

L'ORSTOM a commencé la publication systématique de ses grandes monographies ou études régionales. Les cinq volumes actuellement sortis concernent le Sénégal, le Chari, la Sanaga, les ressources en eau de surface de la Martinique, le bassin du fleuve Volta. En préparation (publication prévue en 1979 ou 1980) : le bassin du Niger, les fleuves du Gabon, la Medjerdah (Tunisie), les régimes hydrologiques de Madagascar, les fleuves côtiers du Cameroun.

3 – MODELES MATHEMATIQUES

Parmi les modèles à caractère déterministe, on peut compter les modèles dits "de bassin versant" ou "modèle de production" qui sont en fait des opérateurs permettant de passer des précipitations aux débits. Ils ont continué à être développés en France, notamment par SOGREAH, le BRGM et l'ORSTOM.

On sait que l'ORSTOM, en collaboration avec INRS/Eau du Québec, avait mis au point un modèle dit "à discrétisation spatiale". En 1977, il a été décidé de créer une association entre le laboratoire des Mines de Fontainebleau, INRS/Eau et l'ORSTOM en vue de produire un modèle mixte basé également sur le principe de la discrétisation spatiale pour les eaux de surface et les eaux souterraines. La fin des travaux est prévue pour 1978.

VI-6

Toujours dans les modèles déterministes, quelques nouveaux développements ont eu lieu pour l'utilisation des modèles de simulation des systèmes d'eau.

Les modèles stochastiques ont surtout été utilisés pour la simulation ou la prévision des basses eaux et des étiages.

On peut rattacher à l'utilisation des modèles déterministes ou stochastiques la synthèse sur les crues des petits bassins versants entreprise au niveau national par le CTGREF où l'ORSTOM a un rôle de conseiller.

PARIS, le 16 août 1978

M. ROCHE

II – CLIMATOLOGIE

Ch. P. PEGUY

Directeur de Recherche
CNRS

En climatologie, la recherche universitaire continue de poursuivre une lente production de grosses thèses d'Etat de géographie, maintenant diffusées par les soins de la librairie H. Champion. Les cadres en sont le plus souvent des groupements de régions (les "Midis français" avec A. DAUPHINE, l'"Arc Alpin" avec Huguette VIVIAN, l'Espagne et le Nord Portugal Atlantique avec J. MOUNIER), ou plus traditionnellement une "région" – la Normandie – avec Gisèle ESCOURROU. Les techniques d'analyse, variées selon les auteurs et les objectifs poursuivis, font toujours une place à la climatologie synoptique, complétée aujourd'hui par l'imagerie satellitaire.

Des travaux d'ampleur moindre que les thèses permettent une mise en œuvre plus souple de techniques récentes, comme aussi de mieux suivre les suggestions de l'actualité. Les orientations de recherches se diversifient dès lors. L'existence de longues séries d'observations invite à l'emploi de moyens statistiques, parmi lesquels on citera l'analyse des "séquences" de jours consécutifs de jours avec/sans précipitation (S. MARTIN). Elle a permis la mise au point de graphismes originaux exprimant la variabilité interannuelle d'une variable climatique en un point : les "calendriers de probabilités" de Ch. P. PEGUY. L'analyse factorielle en composantes principales permet de combiner à l'étude de cette variabilité interannuelle celle de la variabilité régionale. Il s'est avéré que les "fluctuations spatio-temporelles" des précipitations s'organisaient de façon non-aléatoire (S. MARTIN, Huguette VIVIAN). A l'inverse de ces techniques très sophistiquées, exigeant de longues séries, l'existence en certains pays en voie de développement de séries courtes et très hétérogènes peut conduire à préférer à des "moyennes" boiteuses des "années caractéristiques" concentrant un maximum d'information. En fait, la climatologie tropicale est en France pleine de promesses, l'Amérique andine, et surtout l'Asie du Sud-Est étant l'objet de travaux en cours, la plupart sous la direction de P. PAGNEY (Dijon). Un Colloque de Climatologie tropicale se réunira à Paris en novembre 1978.

La sécheresse de 1976, qui devait sensibiliser l'opinion française aux choses du climat, orientait de nombreux Chercheurs vers l'agrométéorologie. La plupart des revues françaises de géographie y consacraient des articles, certaines (*Revue de Géographie de Lyon* 1977/2) un numéro spécial. La notion de "jours disponibles" et l'étude de leur variabilité interannuelle, se révèle fructueuses. D'autres Chercheurs (J.P. BESANCENOT, J. MOUNIER) reprennent la géographie des loisirs en mettant à profit les enseignements de la biométéorologie. L'étude des conditions de mise en œuvre de l'énergie solaire constitue enfin un dernier exemple de cette "climatologie appliquée" qui vise à rendre compte, aujourd'hui, de certains aspects de la mise en valeur de la planète, comme la climatologie des années 50 cherchait à en expliquer les paysages végétaux naturels.

Ch. P. PEGUY

III – AMENAGEMENTS DES EAUX

M. CARLIER

Agence financière du Bassin Seine-Normandie

Au cours de la période triennale 1975-1978, de nombreux travaux et études hydrologiques ont contribué à l'amélioration et au développement des techniques d'aménagement des eaux superficielles et souterraines.

Indépendamment de l'apport de l'hydrologie scientifique dans les domaines des eaux de surface et souterraines, de la climatologie et de la qualité des eaux qui sont traités par ailleurs, il convient de souligner les études et recherches hydrologiques poursuivies dans les domaines suivants qui concernent plus directement l'aménagement des eaux.

1 – SECHERESSES ET ETIAGES

- Distribution de fréquences adaptées aux étiages et aux débits faibles et pouvant être nuls [1] (a).
- Interpolation et extrapolation dans l'espace des résultats d'étiages connus aux stations hydrométriques [2].
- Application des prévisions d'étiage à la gestion des volumes réservés à l'agriculture dans les barrages (SERRE-PONCON sur la Durance, canal de la NESTE, barrage de MONTBRON, etc).
- La sécheresse de l'année 1976 a fourni l'occasion d'études spécifiques portant sur le contrôle, la critique et la correction des méthodes d'estimation de l'évapotranspiration réelle [11] et des bilans hydrologiques ; à partir des observations effectuées au cours de l'étiage exceptionnel 1976, des synthèses régionales ont été publiées.

2 – CRUES

- Nouvelles méthodes rationnelles adaptées à l'estimation des crues en zones urbaines [3].
- Modèles d'hydrologie urbaine (ruissellement) [4].
- Etude générale de synthèse sur les crues des petits bassins versants ; cette étude est basée sur les observations effectuées sur environ 200 stations de jaugeage intéressant des bassins versants de surface inférieure à 100 km² ; elle comporte une analyse des hydrogrammes de crues et des caractéristiques climatiques et géomorphologiques des bassins versants ; l'étude se poursuit actuellement et doit s'achever prochainement.
- Etude particulière de l'assainissement de zones urbaines et rurales dont l'hydrogramme résultant du ruissellement sur les surfaces urbanisées se superpose à un écoulement plus lent originnaire des zones rurales [5].

.....
(a) Les chiffres entre parenthèses renvoient à la bibliographie citée en fin du rapport

– Recherches sur les compositions des lois statistiques avec application à la prédétermination des crues ; ces recherches ont porté sur les lois des débits journaliers et des rapports du débit instantané de pointe au débit moyen journalier [6], sur les lois des pluies et des coefficients d'écoulement, sur les lois des événements supérieurs à un seuil et des nombres de réalisation annuelle de ces événements [7].

3 – BARRAGES

– Mise au point des méthodes de calculs des ondes de submersion résultant des ruptures de barrages ; établissement d'abaques permettant une estimation rapide et approximative des temps d'arrivée de l'onde et des surfaces inondées.

– Approche directe de la distribution de fréquence d'un débit de crue laminé par un barrage [8].

– Signalons spécialement le chapitre consacré à l'hydrologie dans l'ouvrage "Technique des barrages en aménagement rural" édité en 1977 [9] par le Ministère de l'Agriculture et qui présente une synthèse des études poursuivies depuis plusieurs années dans le domaine de l'hydrologie appliquée à la conception et au calcul des ouvrages d'évacuation des barrages.

4 – HYDRAULIQUE AGRICOLE

– Influence du drainage sur l'hydrologie des bassins versants, tant sur le plan quantitatif (crues) que qualitatif (teneurs des eaux en nitrates, phosphates, etc. . .) [10].

5 – AMENAGEMENTS DE COURS D'EAU

– Edition d'abaques pour le calcul des lignes d'eau en régime permanent [12].

– Etude de la propagation des crues et des étiages dans les lits des cours d'eau ; calcul des lignes d'eau en régime transitoire.

– Elaboration de nouvelles règles et méthodes de calcul et conception d'aménagement des cours d'eau à lit mobile. Sauvegarde de l'environnement et des intérêts piscicoles mis en jeu par ces aménagements

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Distribution de fréquences adaptées aux étiages (*Note technique, CTGREF 1978*).
- [2] Assessment of low water characteristics on unobserved basins of the eastern region of Paris with use of representative basin data (Casebook on application of results of research in representative and experimental bassins ; UNESCO, Paris 1978).
- [3] Instruction technique relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations (circulaire interministérielle n° 77.284/INT. en date du 22 juin 1977 ; édition Imprimerie Nationale).
- [4] Une étude générale de l'assainissement pluvial urbain (*La Houille blanche, n° 1, 1975*).
- [5] Etude de l'assainissement pluvial des terres basses d'ARLES (*Informations techniques du CTGREF, cahier n° 19, 1975 et n° 22, 1976*).
- [6] Application du calcul de la distribution d'une fonction de deux variables à l'estimation des crues (*Bulletin technique du Génie rural, n° 120, CTGREF, 1977*).
- [7] Etude statistique d'évènements hydrologiques observés sur un nombre réduit d'années (*Etude n° 22, CTGREF, 1978*).
- [8] Approche directe de la distribution de fréquence d'un débit laminé par un barrage (11^{ème} conférence européenne de la CIID, Rome 1977).

VI-10

- [9] Technique des barrages en aménagement rural (Ministère de l'Agriculture, 1977).
- [10] Appréciation de la qualité des eaux d'un petit bassin rural drainé et cultivé (Congrès international de limnologie, Copenhague, 1977).
- [11] L'évapotranspiration réelle en hydrologie (15^e Journées de l'Hydraulique de la SHF, Toulouse, 1978).
- [12] Abaques pour le calcul des lignes d'eau en régime permanent (*Note technique n° 4*, CTGREF, 1976).

IV – QUALITE DES EAUX SUPERFICIELLES

G. LEYNAUD

C.T.G.R.E.F.

1 – EVOLUTION GENERALE

L'évolution générale de la situation intéressant les études et recherches en matière d'hydrologie peut être caractérisée par les traits suivants :

– Une évolution importante de la législation et la réglementation concourant à la protection de l'environnement : loi sur la protection de la nature imposant notamment les études d'impact, loi sur les installations classées modernisant les anciens textes sur les établissements classés, loi sur le contrôle des produits chimiques instituant une procédure de déclaration avec constitution d'un dossier d'évaluation des risques écologiques, mise en place des objectifs de qualité.

Des discussions ont eu lieu et se poursuivent à Bruxelles pour l'harmonisation des législations sur l'eau des pays de la C.E.E. (directives : eau potable, baignade, vie piscicole, vie aquatique, conchyliculture).

– L'augmentation générale des prélèvements pour les divers usages et notamment l'irrigation conduisant à la recherche du développement et de la régularisation de la ressource en eau, notamment par la construction de barrages et la réalimentation artificielle des nappes.

– Le développement de la production d'énergie thermique (surtout nucléaire) et hydroélectrique (problèmes liés au réchauffement des eaux et aux modifications du débit).

– La concrétisation de l'action des Agences Financières de Bassin et de l'Administration dans la lutte contre la pollution aboutissant à la construction de nombreuses installations d'épuration des eaux et à une réduction globale sensible des rejets de matières oxydables. Les effets de cette amélioration sont cependant amoindris par l'extension d'autres formes de pollution (toxiques, composés de l'azote et du phosphore, altération du lit des cours d'eau et des bassins versants . . .) qui prennent dès lors un relief particulier et nécessitent la mise en œuvre de nouvelles techniques de prévention et d'épuration.

– La sécheresse exceptionnelle qui a atteint la majeure partie de la France en 1976 a accentué l'acuité des problèmes liés à la qualité des eaux et a montré l'importance des relations existant entre des débits et la qualité des eaux superficielles.

– Une deuxième campagne a été réalisée en 1976 au titre de l'Inventaire National du degré de pollution des eaux superficielles ; elle a porté, comme la première réalisée en 1971, sur quelque 1 200 points et selon des méthodes unifiées. Par rapport à la première campagne, la gamme des analyses a été étendue notamment en ce qui concerne les substances toxiques.

2 – ETUDES ET RECHERCHES

La réalisation des premières études d'impact a entraîné un développement des études de terrain et des inventaires hydrobiologiques.

La législation sur les produits chimiques a nécessité une intensification des travaux portant sur l'évaluation de la dégradabilité et de la toxicité des substances chimiques à l'égard de diverses espèces ou de chaînes alimentaires simplifiées.

Les travaux sur les matières en suspension, les sédiments et le comportement de certains micropolluants (métaux lourds notamment) ont été poursuivis et amplifiés.

L'étude des effets de certains types particuliers d'altération de la qualité des eaux a été poursuivie et développée, notamment :

- réchauffement des eaux,
- extractions de matériaux dans les lits mineurs des cours d'eau,
- modifications du lit des cours d'eau et des bassins versants (canalisation, imperméabilisation).

L'étude des pollutions d'origine agricole et plus généralement des pollutions diffuses a motivé un développement des recherches portant sur le transfert et l'évolution des fertilisants, des pesticides et d'autres micropolluants des sols vers les eaux souterraines et superficielles.

Les aspects sanitaires (contamination bactérienne et virale des eaux douces ou marines) ont revêtu une importance spéciale et inspiré des travaux sérieux portant sur la survie et la dispersion des germes, les effets directs ou indirects (consommation de produits de la pêche) sur la santé humaine.

Les travaux concernant la protection des lacs ont été poursuivis ; une méthodologie applicable à l'inventaire de leur degré de pollution est en cours de mise au point et sera vraisemblablement appliquée dans les prochaines années.

Le problème complexe des liaisons débit-qualité des eaux a été abordé à propos des études portant sur la fixation des débits réservés ou des débits de référence utilisés pour le choix des objectifs de qualité.

La mise en évidence des effets de certaines pollutions (fertilisants, micropolluants, germes pathogènes), les difficultés de fonctionnement ou le caractère incomplet des procédés classiques d'épuration ont entraîné un redéploiement des efforts de recherche sur les procédés de traitement : recherche de procédés plus performants, plus rustiques ou mieux adaptés à des variations importantes de la charge.

- développement de l'assainissement de type individuel et de l'épandage souterrain.
- développement des procédés extensifs : lagunage simple, aspersion.
- développement des procédés physico-chimiques.

En outre, l'élimination des boues de stations d'épuration et notamment leur valorisation a fait l'objet de nombreuses recherches.

BIBLIOGRAPHIE

Il est difficile d'effectuer une sélection parmi les nombreuses références de publications traitant de la qualité des eaux superficielles.

Il est toutefois possible d'obtenir une vue d'ensemble du travail effectué en France dans ce domaine au cours des dernières années en consultant les rapports des Journées de Montpellier "L'Eau, la Recherche, l'Environnement" (Montpellier 12-13-14 octobre 1977) - Collection Recherche - Environnement n° 8 - Ministère de l'Environnement et du Cadre de Vie, Service des Affaires Scientifiques.

Le même Ministère publiera prochainement les résultats complets de la campagne 1976 de l'Inventaire National du degré de pollution des eaux superficielles.

V – EAUX SOUTERRAINES

G. GASTANY

SERVICE GEOLOGIQUE NATIONAL

INTRODUCTION

Les recherches et travaux, effectués sur les eaux souterraines au cours des quatre dernières années, se sont orientés vers l'*hydrogéologie quantitative*, base de la gestion de l'eau, cette dernière ayant été abordée pour quelques grands systèmes aquifères.

L'*acquisition des données de base*, tout en poursuivant les évaluations régionales de ressources en eau, a, par une technologie avancée, évolué vers des mesures plus précises, rapides, peu onéreuses et automatiques. Des synthèses régionales et des cartes thématiques ont été réalisées selon des conceptions plus élaborées.

Les efforts principaux des *recherches* se sont orientés vers les expérimentations *in situ*, effectuées par des équipes pluridisciplinaires. Elles ont abordé les problèmes d'hétérogénéité et des transferts d'échelle, de la case lysimétrique à celle du bassin hydrologique. Elles peuvent être groupées en quatre thèmes :

- alimentation naturelle et artificielle des eaux souterraines et problèmes posés par l'irrigation ;
- identification, structure et fonctionnement des systèmes aquifères ;
- thermodynamique des eaux souterraines et hydrogéothermie ;
- qualité et pollution des eaux souterraines.

Les expérimentations *in situ* et les interprétations ont été possibles par le développement simultané d'une technologie et de moyens concernant en particulier la géochimie isotopique et l'informatique hydrologique. La télédétection en hydrologie a été développée par l'emploi de divers capteurs mis en œuvre par les vecteurs appropriés (avion, satellites).

1 – ACQUISITION DES DONNEES DE BASE ET SYNTHESES – CARTES

a – Evaluation des ressources en eau

L'évaluation des ressources en eau s'est poursuivie par deux types de prospection :

- *inventaire systématique* des points d'eau et captages, par carte topographique à 1/50 000. Il a été élargi aux prélèvements. La couverture actuelle atteint 15 % du territoire ;
- *inventaire sélectif* par départements ou par régions hydrogéologiques intéressant 25 % de la France.

Un inventaire, avec constitution d'un *fichier des eaux minérales* est en cours.

b – Création, optimisation et fonctionnement des réseaux d'observation. Publications d'annuaires

Le *réseau piézométrique*, encore localisé et sous la responsabilité de divers organismes (Agriculture, Equipement, Service géologique national, Agences financières de bassin), a été

coordonné, développé et optimisé. Il comprend 1500 piézomètres sélectionnés groupés dans diverses régions : bassin de Paris, Artois-Picardie, Rhin-Meuse, plaine d'Alsace, Nord-Pas-de-Calais, Champagne-Ardennes. Des annuaires sont publiés par traitement automatique des données au service géologique national.

Le *réseau de surveillance de la qualité* des eaux souterraines, réparti en réseau de contrôle de la pollution et en réseau de surveillance (de détection), a fait l'objet d'études méthodologiques avec tests sur plusieurs secteurs, dont le bassin de Paris (Agence de bassin Seine-Normandie).

c – Bassins représentatifs, périmètres d'expérimentation et stations d'essais

L'orientation vers les expérimentations *in situ* a conduit à équiper, ou créer, des dispositifs d'études et d'essais. La règle est de concentrer les efforts sur l'équipement de quelques unités, terrain d'application d'équipes pluridisciplinaires. Les installations, situées dans différentes zones hydrogéologiques, couvrent les grands types de régime des eaux souterraines et de roches réservoirs, en particulier les calcaires fissurés karstiques.

d – Méthodologie d'acquisition de données sur les paramètres des bassins hydrologiques et des systèmes aquifères

– *acquisition de données sur les paramètres hydrologiques*. Etude critique des formules d'hydrométéorologie et d'hydrologie permettant une meilleure évaluation des éléments du bilan. Recherches sur l'analyse de l'hydrogramme d'écoulement pour une estimation plus précise de l'écoulement souterrain. Développement du traitement automatique.

– *acquisition de données sur les paramètres hydrodynamiques, hydrocinématiques et hydrogéochimiques des systèmes aquifères*. L'automatisation de l'acquisition des données a progressé, grâce à une technologie de chaînes de mesures, fiables et économiques, *in situ* avec effort particulier en zone non saturée et à la réalisation de capteurs spécifiques. Des essais sur les mesures de résistivités du sol, considérées comme un index de la teneur en eau sont encourageants. Des méthodes rapides, peu onéreuses, de détermination ont été mises au point : pompages d'essai de courte durée, interprétation d'essais sur puits incomplets, techniques de traçage. La diagraphie dans les forages a été développée : résistivités, températures, radioactivité, micromoulinet, télévision. L'exécution et l'interprétation des essais dans les aquifères calcaires fissurés ont fait l'objet de recherches ayant abouti à une méthode opérationnelle.

e – Synthèses, monographies régionales et cartes des eaux souterraines

Des *synthèses* ont été élaborées, à partir des données recueillies, présentées souvent sous forme d'*atlas hydrogéologiques* départementaux ou régionaux. Pour les premiers à citer, le Calvados, la Seine maritime, l'Aisne, la Gironde, les Pyrénées orientales, l'Aude. Les régions couvertes sont le bassin de la Seine et des cours d'eau normands, le Nord de la France, le socle du massif armoricain, la plaine d'Alsace et la zone lyonnaise.

Des recherches sur le perfectionnement des *méthodes d'expressions cartographiques* ont abouti à l'établissement et à la publication de cartes hydrogéologiques à différentes échelles :

- *cartes hydrogéologiques à grande échelle* (1/50 000, 1/100 000 et 1/200 000) couvrant les trois cinquièmes de la France (dont 75 coupures à 1/50 000) ;
- *Atlas des eaux souterraines de la France à 1/1 000 000* comprenant actuellement : débit moyen des nappes d'eau souterraine, principaux systèmes aquifères, qualité chimique, eaux minérales et thermominérales, coût de production, vulnérabilité des nappes à la pollution.

2 – RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE.

Des travaux et des recherches ont été poursuivis, souvent innovés, par les grands établissements de recherches publics ou parapublics : centre national de la recherche scientifique (CNRS), laboratoires d'hydrogéologie et de mécanique des fluides des Universités, centres de recherches des grandes écoles (école des mines de Paris), institut national agronomique, service géologique national (BRGM), office de la recherche scientifique et technique Outre-mer (ORSTOM), GERSAR. Ils ont été incités et soutenus par des financements de la Délégation générale à la recherche scientifique et technique, du CNRS, du service des problèmes de l'eau et des agences financières de bassin.

Les deux faits marquants sont, d'une part l'exécution d'études pluridisciplinaires portant conjointement sur l'hydrodynamique, l'hydrocinématique, la thermodynamique, l'hydrogéochimie et la géobiologie et, d'autre part, les applications sur des dispositifs expérimentaux à toutes échelles d'espace. Elles ont dégagé les problèmes de l'hétérogénéité des réservoirs et des transpositions d'échelle. Ceux-ci feront l'objet d'études ultérieures. Il est bien évident que les aspects quantitatifs et qualitatifs ont été abordés simultanément car ils sont indissociables pour la gestion de l'eau.

a – Alimentation naturelle et artificielle des eaux souterraines. Echanges de flux à la limite atmosphère-sol

Ces recherches ont porté principalement sur la distribution spatiale et temporelle des précipitations efficaces (ou de l'écoulement total) et leur répartition à la surface du sol en écoulement de surface et en écoulement souterrain. Une évaluation plus précise du flux de l'évapotranspiration réelle à la surface du sol, par perfectionnement des méthodes climatiques (TURC) et des bilans énergétiques, a été recherchée. Une méthodologie basée sur les fréquences mensuelles, voire journalières et la distribution spatiale par mailles, permet une évaluation plus précise par une confrontation avec les facteurs conditionnels de l'écoulement dans le bassin hydrologique (géomorphologie, végétation, sol, etc.). Un intérêt particulier a été porté sur la variabilité spatiale et temporelle de l'alimentation naturelle des nappes. L'évaluation de la quantité d'eau réelle, consommée par les cultures et pénétrant en zone non saturée, aboutit à l'établissement du bilan des sols cultivés avec, ou sans, irrigation.

La constitution d'un fichier de 80 bassins de dimensions moyennes, avec une vingtaine de variables caractéristiques de l'écoulement, permettra par application de techniques d'analyse statistique multidimensionnelles de mieux caractériser l'évaluation de l'écoulement total, surtout en absence de jaugeages. Le calcul des ressources en eau totales renouvelables potentielles gagne ainsi en précision.

b – Identification, structure et fonctionnement hydrodynamique des systèmes aquifères

Afin de mieux cerner, représenter et schématiser toutes les caractéristiques et le fonctionnement des systèmes aquifères, en vue de leur modélisation, les recherches ont porté sur trois thèmes.

Mécanismes des transferts de flux en zone non saturée en milieu poreux. Processus d'infiltration

Un net progrès a été obtenu par perfectionnement des dispositifs de laboratoire et, surtout, par expérimentations sur des stations opérationnelles. Ces études intéressent l'identification des paramètres (perméabilité, succion, vitesse de déplacement) et la mise au point de techniques permettant l'évaluation et le contrôle quasi-continu du flux réel à travers la zone non saturée. L'apport des techniques isotopiques a été d'un grand secours.

Mécanismes des transferts en zone saturée en milieu poreux. Structure et fonctionnement hydrodynamique des systèmes aquifères

L'identification et la détermination des paramètres hydrodynamiques (transmissivité,

diffusivité et emmagasinement) ont été traités. Mais l'intérêt a été axé sur la *dispersion* (paramètres hydrocinématiques) avec de nombreux travaux aboutissant à des publications. L'attention a été attirée sur l'hétérogénéité des réservoirs aquifères et les effets d'échelles. Une méthodologie de la détection des hétérogénéités par mesure des vitesses d'écoulement et par des techniques de prospection géophysique sur stations d'essais, a été mise au point. Les résultats obtenus ont permis une plus grande précision dans l'établissement des modèles hydrodynamiques, physiques et mathématiques.

Hydrogéologie des roches fissurées carbonatées. Hydrogéologie karstique

Les études sur l'hydrogéologie karstique sont caractérisées par leur orientation vers le quantitatif et leur caractère multidisciplinaire. En particulier les recherches quantitatives et qualitatives sur les bassins expérimentaux (Baget en Ariège, région montpéliéraine, massifs du Jura, fontaine de Vaucluse). Les travaux sur la craie du bassin de Paris ont été présentés dans un colloque national. Le fait marquant est l'analyse structurale du réservoir calcaire fissuré, par des techniques en surface et dans les forages, confrontée avec les caractéristiques hydrauliques. Elles ont abordé la schématisation de la structure et du fonctionnement des systèmes aquifères fissurés. Une opération importante est en cours dans le sud de la France. Un barrage souterrain à Port-Miou (Provence), obstruant partiellement un conduit karstique souterrain, situé au-dessous du niveau de la mer, en vue du captage d'une importante résurgence d'eau douce a été réalisé. Toutes les recherches marquent un progrès vers la modélisation des systèmes aquifères en milieu fissuré. Dans cette voie à signaler les travaux entrepris sur les roches cristallines fissurées (Bretagne en particulier).

c – Thermodynamique des eaux souterraines et hydrogéothermie

Les recherches dans ce domaine s'appliquent à deux échelles spatiales : le système aquifère et le bassin hydrogéologique.

En ce qui concerne le système aquifère elles complètent son fonctionnement. En particulier sur la thermomigration sous l'influence des gradients thermiques dans les transferts d'humidité et sur l'étude du flux de chaleur, *in situ*, ainsi que les échanges de chaleur entre l'eau en circulation et la roche réservoir (relations entre les données de température et le mode de circulation des eaux souterraines dans les aquifères de la Gironde, caractéristiques des champs thermiques sur le site de la source du Lez dans la région de Montpellier). Les mesures en surface et à faible profondeur ont permis d'étalonner les prospections de thermométrie aéroportées. Des recherches sur les possibilités de stockage de thermies dans le sous-sol, sur modèles et *in situ*, ont donné des résultats satisfaisants.

L'étude hydrogéothermique des bassins d'Aquitaine et de Paris a abouti à deux monographies détaillées, éditées par le Service géologique national.

d – Qualité et pollution des eaux souterraines

Les recherches sur la qualité des eaux souterraines ont marqué une priorité à la géochimie des isotopes du milieu et à l'étude des mécanismes des transferts de substances dans le circuit atmosphère-sol-sous-sol-nappe. Elles ont été conduites de pair avec celles sur la pollution de l'espace souterrain.

Hydrogéochimie isotopique. Fonctionnement hydrogéochimique des systèmes aquifères

L'hydrogéochimie est considérée comme le complément indispensable de l'hydrodynamique pour l'étude du fonctionnement des systèmes aquifères et des mécanismes d'acquisition de la qualité chimique des eaux souterraines sous l'influence des facteurs naturels ou de l'introduction de polluants issus de l'activité humaine. La priorité a été donnée à la géochimie isotopique afin de progresser dans la méthodologie des traçages naturels et artificiels. Le CNRS a équipé une structure analytique, dite "Laboratoire sans mur" chargée de la coor-

dination de l'emploi des traceurs isotopiques et de l'interprétation des données ainsi que de l'exécution des analyses. Des efforts identiques ont été réalisés par le Service géologique national et le Commissariat à l'énergie atomique. A signaler l'utilisation des isotopes du milieu dans le contexte hydrogéochimique et biologique des aquifères calcaires fissurés hétérogènes avec expérimentation sur bassins et stations expérimentaux ; l'utilisation des variations naturelles des rapports azote 15/azote 14 (marquage des nitrates) et soufre 34/soufre 32, pour la détection de l'origine de la pollution (atmosphère, fertilisants). Une méthodologie d'emploi simultané de l'oxygène 18, du deutérium et du tritium a été élaborée pour l'étude analytique fine du cycle de l'eau dans les bassins hydrologiques et les dispositifs d'essais, basée sur le traçage naturel de l'eau des précipitations et les réponses à la sortie de l'aquifère (drainage de parcelles, exutoire de l'écoulement souterrain). Les corrélations obtenues par les différentes techniques, hydrodynamiques, géochimiques, isotopiques, confirment les hypothèses sur les processus d'infiltration et de transferts des flux dans les milieux poreux et fissurés.

Les applications sur le terrain de la géochimie isotopique du carbone 14/carbone 13 pour l'analyse du fonctionnement des grands aquifères, karstiques ou poreux, ont donné lieu à des monographies détaillées (aquifère karstique du Calcaire carbonifère du Nord, aquifère sableux de l'Albien du bassin de Paris et des Sables landéniens des Flandres, bassin du Roussillon).

Le système aquifère multicouche des sables albiens du bassin de Paris a permis une synthèse hydrogéochimique des éléments majeurs, traces et isotopes naturels. Elle a abouti à des guides de prospection des eaux souterraines applicables aux aquifères profonds.

Pollution des eaux souterraines. Prévention, détection ou contrôle ou parade

La pollution des eaux souterraines est, pour l'avenir, le principal facteur limitant des ressources en eau souterraine. C'est pourquoi elle a attiré de nombreuses recherches dont les résultats ont été présentés dans des réunions scientifiques, citées en bibliographie. Cinq grands thèmes ont été traités.

Introduction des polluants. Impacts, enfouissement et création de foyers de pollution. Catalogue des principaux polluants. L'étude des polluants chimiques (fertilisants, métaux lourds) et organiques (pesticides, herbicides) a dégagé l'importance des pollutions d'origine agricole par les nitrates, dues principalement au développement des pratiques culturales modernes. L'analyse des transferts de flux dans le système global nappe/rivière a eu des répercussions importantes sur l'exploitation rationnelle des aquifères alluviaux.

Transfert, migration et évolution des polluants en zone non saturée. Le pouvoir d'auto-épuration chimique et bactériologique de la zone non saturée a été précisé par des recherches sur les échanges d'ions et les phénomènes d'adsorption prédominant sur la désorption. Le rôle des argiles, des constituants organiques du sol (complexe organo-humique) et du régime hydrologique a été mis en évidence. En définitive le sol naturel constitue un filtre efficace pour les pesticides, les herbicides et les microorganismes (bactéries pathogènes). La pollution est inquiétante pour les nitrates et les sulfates et préoccupante pour les métaux lourds.

Propagation et évolution des polluants dans l'aquifère. La barrière protectrice de la zone non saturée franchie, les caractéristiques physico-chimiques de l'eau souterraine sont acquises et aucun obstacle sérieux ne s'oppose à la propagation de la pollution dans l'espace souterrain. Le principal rôle de l'aquifère joue avec la dilution. Il est donc fonction du renouvellement des eaux souterraines, lequel est un facteur principal. C'est ici que la dispersion dynamique intervient. Ses paramètres sont déterminés par des opérations de traçages isotopiques dont la méthodologie d'emploi et d'interprétation a été développée. Un effort particulier a été porté sur la délimitation des périmètres de protection des eaux captées pour l'alimentation en eau potable et l'édiction de leurs servitudes. Des instructions pratiques ont été élaborées et diffusées.

Persistence de la pollution. Techniques de dépollution. Les phénomènes de persistance de la pollution, après disparition des foyers de pollution (rémanence), ont été abordés. Ils se rattachent à la désorption. Des essais de dépollution ont été testés sur des stations pour les hydrocarbures. Ils seront développés au cours des années à venir.

Vulnérabilité des nappes à la pollution et protection des eaux captées pour l'alimentation humaine. La méthodologie de la vulnérabilité des nappes à la pollution a été améliorée avec établissement de nombreuses cartes à différentes échelles (1/1 000 000, 1/250 000). Ces études, jointes à celles sur les substances polluantes et leur migration ont permis d'envisager une conception réaliste, dynamique et évolutive de la délimitation des périmètres de protection et de la prescription de leurs servitudes.

3 – INFORMATIQUE HYDROLOGIQUE : PROGRAMMES DE CALCUL AUTOMATIQUE ET MODELES

Les recherches et leurs applications ont été accompagnées, en étroite liaison, par le développement de l'informatique hydrologique, laquelle a connu un grand essor. Une programmation française s'est constituée avec des échanges entre centres. Elle porte sur les calculs automatiques et les modèles. Seuls les travaux originaux sont cités.

a) Programmes de calcul automatique

– Mise en mémoire et traitement des données hydrométriques, piézométriques et hydrogéochimiques ; optimisation des réseaux d'observation ; rationalisation des données, variables régionalisées, krigeage, convolution, déconvolution.

– Résolution numérique des formules hydroclimatiques (TURC, THORNTHWAITE), établissement des bilans par bassin et par maille, aux fréquences décennales, mensuelles et annuelles avec essais au pas journalier. Distribution spatiale du module d'écoulement total et d'écoulement souterrain dans un bassin.

b) modèles mathématiques

– Modèles globaux hydroclimatiques du bilan d'un bassin hydrologique (modèle couplé)

– Simulation hydrodynamique des transferts d'eau en milieu non saturé avec prise en compte de la succion et des phénomènes d'hystérésis. Amélioration du calcul des flux horizontaux et verticaux. Application à l'étude des transferts d'eau en zone irriguée et détermination de la dose et du processus d'irrigation optimaux. Modèle couplé zone non saturée/zone saturée.

– Simulation hydrodynamique des écoulements bidimensionnels monophasiques en milieu poreux et régimes permanent ou transitoire ; transferts et échanges thermiques ; drainage des aquifères multicouches ; milieu fissuré karstique.

– simulation cinématique et modèles diphasiques de propagation de la pollution ; transports de masse et de soluté dans un écoulement bidimensionnel ou radial ;

– simulation d'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines, basée sur la thermodynamique des équilibres thermiques.

4 – PREVISIONS ET GESTION

a) Prévisions des basses eaux

Les recherches sur la prévision des niveaux piézométriques minimums et des débits

d'étiage des cours d'eau, basées sur les modèles existant n'utilisant que les données classiques météorologiques et hydrométriques, ont abouti à la publication périodique d'un bulletin interministériel sur la "situation hydrologique et prévisions des basses eaux".

b) Gestion des grands aquifères

Une méthodologie de la gestion des grands aquifères a été établie avec mise au point de modèles prenant en compte les contraintes physiques et socio-économiques. Elle a été testée et appliquée en différentes régions : Nord de la France, Beauce, Crau, Gironde, Est lyonnais. Elle a été obtenue par des travaux sur le calcul du coût des diverses opérations de captages, de distribution et de traitement de l'eau souterraine.

5 – SELECTION BIBLIOGRAPHIQUE

Etant donné l'abondance des publications, parues au cours de la période 1975-78, seuls les travaux importants sont cités. Nombre d'entre eux comportent une bibliographie.

a) Colloques nationaux

- 1975 – L'eau, la recherche, l'environnement. Thème 1 : les aspects quantitatifs des ressources en eau. La recherche scientifique et technique sur l'environnement, Rennes, mai.
- 1976 – La mécanique des fluides et l'environnement. XIV^e jour. hydrau., Soc. hydrotechn. France, Paris, 7-9 sept.
- 1977 – Deuxième colloque d'hydrologie en pays calcaire. Ann. scien, Univ. Besançon, 3^e série, fasc. 25, 434, p.
- 1977 – Protection des eaux souterraines captées pour l'alimentation humaine. Orléans, 1-2 mars. Serv. géol. nat., B.R.G.M., Orléans, 4 vol.
- 1977 – Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France. Nice, 27-28 oct. Serv. géol. nat., B.R.G.M., Orléans, 2 vol.
- 1978 – Interactions entre l'eau souterraine et son milieu. Dynamique des écoulements, phénomènes de transfert, mécanismes d'échanges échelles de temps et d'espace. Montpellier, 13-15 mars. Centre nat. rech. sci. et Univ. sci. et techn. Languedoc, Montpellier.
- 1978 – Hydrogéologie de la craie du bassin de Paris. Rouen, 13-15 mars. Serv. géol. nat., B.R.G.M., Orléans, 625 p.
- 1978 – L'hydrotechnique au service d'une politique de l'eau. XV^e jour. hydrau., Toulouse, 5-9 sept. Soc. hydrotechn. France. 1978 – Symposium i
- 1978 – Symposium international sur les implications de l'hydrogéologie dans les autres sciences de la Terre. Montpellier, 11-16 sept. 1978, centre études et rech. geol. et hydrogéol.

b) bibliographies, dictionnaires

- 1977 – Bibliographie hydrogéologique de la France (1968-1977). Mém. B.R.G.M., Orléans , n° 93, 97 p.
- 1977 – DION J. et MARGAT J. – L'eau souterraine dans la politique de l'eau, l'aménagement, l'utilisation et la gestion des ressources en eau, en France. Essai de bibliographie. B.R.G.M., Orléans, 8 p.
- 1977 – CASTANY G. et MARGAT J. – Dictionnaire d'hydrogéologie. B.R.G.M. Orléans, 249 p., 561 concepts. p.
- 1978 – Vocabulaire de l'hydrologie et de la météorologie. Conseil intern. de la langue française. La maison du dictionnaire, Paris, 237 p.

- 1978 – ALBINET M. – Catalogue des modèles de simulation hydrodynamique d'aquifères réalisés en France à la date du 31-12-1977. B.R.G.M., Orléans, rap. int.
- 1975 – Les bassins de la Seine et des cours d'eau normands. Tome 1 : ressources en eau et données hydrologiques ; fasc. 4 : eaux souterraines. Agence financière de bassin Seine-Normandie, Paris, 157 p., fig. et atlas.
- 1975 – MANGIN A – Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Thèse doct. ès-sci., Univ. Dijon, Ann. spéléo, 1974, t. 29, n° 3 et 4, 1975, t. 30, n° 1.
- 1975 – FOURNEAUX J.C. – Etude des échanges nappe-rivière. La nappe de la plaine de l'Isère dans l'ombilic de Grenoble. Thèse, doct. ès-sci., Univ. sci. médi., Grenoble, 327 p.
- 1976 – DELHOMME J.P. – Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse doct. ing., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris, 160 p.
- 1976 – LOUIS Cl. – Introduction à l'hydraulique des roches. Thèse doct. ès-Sci., Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- 1976 – MEGNIEN Cl. – Hydrogéologie du centre du bassin de Paris : contribution à l'étude de quelques aquifères principaux. Thèse doct. ès-sci., Université Pierre et Marie, Curie, Paris.
- 1977 – L'eau en hydrogéologie. Notes d'hydrogéologie. Union Franç. géol., Géologues, Paris, n° 41 et 42.
- 1977 – COMBES M. – Ressources en eau du Maroc. Thèse doct. ès-sci., Univ. sci. et techn. Languedoc, Montpellier.
- 1977 – SAUTY J.P. – Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage. Thèse doct. ing., Univ. Sci. et med., Grenoble.
- 1978 – BLAVOUX B – Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène 18 et du tritium. Possibilités et limites de la méthode des isotopes du milieu en hydrologie de la zone humide. Thèse doct. ès-sci., Univ. Pierre et Marie Curie, Paris.
- 1978 – BONNET M. – Méthodologie d'emploi des modèles mathématiques d'écoulement en hydrogéologie. Thèse doct. ès-sci., Univ. de Nancy.
- 1978 – MANIA J. – Contribution à l'étude des systèmes aquifères. leurs influences sur la gestion des ressources en eau dans le nord de la France. Thèse doct. ès-sci., Univ. sci. et techn., Lille.
- 1978 – Situation hydrologique et prévisions de basses eaux. B.R.G.M., Orléans, bull. n° 5.

VI – TELEDETECTION APPLIQUEE A L'ETUDE DES RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE

Compte rendu des activités nationales par
Y. VUILLAUME

BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES (B.R.G.M.)

1 – Sur le plan général depuis le précédent rapport à l'UGGI les progrès suivants ont été enregistrés :

– Dans le domaine de l'observation multispectrale du sol, les données acquises par avion et le satellite Landsat ont été multipliées (équivalent à 3 couvertures annuelles de la France en moyenne). Les méthodes d'analyse de donnée ont été dominées et une 2^e génération de système de traitement de données mise en place. Il a donc été possible de réaliser des études orientées vers les domaines d'application. Simultanément, la méthodologie d'emploi de l'infrarouge thermique a sensiblement progressé. Les résultats obtenus pour l'étude du bilan radiatif et de l'inertie thermique du sol ont permis de passages au stade pilote. Des projets débutent dans ce sens ; ils concernent les régions semi-arides dont les grandes dimensions permettent l'emploi de données de satellites à faible résolution spatiale (Météosat, NOAA et ultérieurement TIROS N, HCMM).

Enfin, l'évaluation du radar a été entreprise en se fondant sur le double intérêt de ce détecteur : l'observation tous temps et dans les grandes longueurs d'onde, la pénétration dans le milieu et l'accès à l'humidité du sol. Les travaux se situent actuellement au niveau d'observations systématiques sur site visant à corréliser ces mesures électromagnétiques nouvelles avec celles de géophysique électrique et d'humidité du sol mesurée avec la sonde à neutron. Les premiers essais de radar aéroporté ont eu lieu, en préparation des vols radar de la navette spatiale de la NASA.

2 – De façon plus détaillée, les principaux résultats obtenues sont les suivants :

– La recherche de failles par analyse structurale de photographies aériennes a progressé avec l'emploi de l'imagerie de satellite : ceci est surtout valable pour l'implantation d'ouvrages de captages en zone de socle et en région karstique (travaux en France et à l'étranger du BRGM, du LRMR en Grèce et en Crète). Dans certains cas, on procède à l'extension d'un réseau d'anomalies repérées ponctuellement au sol par géophysique, à l'aide d'images Landsat (C.G.G. au Yemen).

– la typologie des éléments de surface du sol est rendue possible par l'analyse multispectrale de la lumière solaire qu'il réfléchit. Cette méthode a été employée pour identifier les parcelles irriguées dans de grands ensembles hydroagricoles du bassin parisien. L'eau d'irrigation provient de la nappe sous-jacente dont les écoulements naturels sont sensiblement modifiés. On observe dans ce cas l'emploi conjugué de données acquises par avion et satellite pour des surfaces de plusieurs départements français (Agence financière de bassin Loire – Bretagne et Seine Normandie). Des travaux préliminaires avaient eu lieu en 1974-75 sur la nappe de Crau. (BRGM – CRPE).

La détection de réseaux de drainage, (à – 1 m de profondeur) qui modifient l'alimentation de la nappe sous-jacente, a été réalisée par observation d'avion équipé en IRC et infrarouge thermique (C.T. GREF/GDTA bassin hydrologique d'investigation : Orgeval et C.G.G. – Belgique).

L'infrarouge thermique est employé pour l'analyse du régime hydrologique des karsts. Des études sont en cours sur des bassins représentatifs pour corréliser les écoulements observés ponctuellement (débit, température) avec les variations spatiales de l'émission thermique de la surface du karst (BRGM et CRGH, GDTA).

La détection d'anomalies thermiques correspondant à des résurgences d'eau souterraine en rivière a fait l'objet de travaux en région karstique (laboratoire d'hydrogéologie - Besançon) ou en région côtière (BRGM, IGN, LRMR).

Des travaux de détection par infrarouge thermique ont également été réalisés pour repérer les fuites de barrages (LRMR en France et Suisse).

Ce dernier laboratoire poursuit par cette même méthode l'étude hydrodynamique de l'estuaire de la Gironde selon les épisodes de marée et recherche en particulier la distribution des écoulements souterrains.

Des recherches sur l'humidité des sols ont conduit à l'analyse de leur inertie thermique. Des expériences intensives ont été menées avec les moyens aéroportés et satellitaires sur le site de Montagne Noire (GDTA).

Parallèlement, l'étude du bilan radiatif d'un sol et de ses relations avec l'évapotranspiration a fait l'objet de travaux sur site hydrologique de l'Orgeval (GDTA associé au CTGREF). Les résultats obtenus conduisent à une spatiaiaation par télédétection du rayonnement net mesuré ponctuellement au sol et permettent de passer au niveau pilote à l'étude du bilan des nappes de région semi-aride africaine avec des données de satellite Météosat notamment (GDTA).

Des travaux de ce type sont entrepris en 1978 pour accéder au bilan hydrique de la nappe de Crau avec les données du satellite HCMM (Ecole des Mines et INRA).

La détection par radar de l'humidité des sols en relation avec l'alimentation des nappes libres fait l'objet de travaux sur sites. Les longueurs d'onde de travail sont 3 cm, 3 dm, 3 m et les "profondeurs de pénétration" en sol sec sont de dimension comparable. (GDTA - CRG - INRA). Les méthodes d'exploitation des données de radar (aéroporté Vigie et de la Navette Spatiale) sont en cours de développement (GDTA).

En conclusion, des progrès significatifs ont été enregistrés pendant la durée de 4 ans sur les méthodes, les moyens et les détecteurs. Mais on observe aussi une tendance à mieux utiliser la télédétection en hydrogéologie expérimentale et appliquée.

VII – NEIGES ET GLACES

L. LLIBOUTRY

LABORATOIRE DE GLACIOLOGIE DE GRENOBLE

1 – NEIGE

Les études concernant la neige en France sont animées et coordonnées par une association, reconnue en 1976 d'utilité publique, l'Association Nationale pour l'Etude de la Neige et des Avalanches (ANENA), subventionnée principalement par la Protection Civile. Depuis 1972, elle publie une revue avec 3 numéros par an. On y trouve en particulier les comptes-rendus des colloques suivants qu'a organisés l'ANENA :

25-26 Avril 1972, à Courchevel : Protection contre les avalanches

4-6 Juillet 1973, à Barèges : Génie paravalanche

19 Avril 1974, à Grenoble : Localisation du risque d'avalanche et aménagement de la montagne

24-25 Avril 1975, à Briançon :

a) Météorologie en montagne

b) Ski de randonnée et sécurité

23 Avril 1976, à Grenoble : Avalanches, responsabilités et assurances

12-14 Avril 1978, à Grenoble : 2^e rencontre internationale sur la neige et les avalanches.

Stabilité du manteau neigeux

Le Centre d'Etude de la Neige de l'Etablissement d'Etudes et Recherches Météorologiques a étudié dans ses laboratoires du Col de Porte et de Chamrousse la métamorphose constructive de la neige.

Bois et Obled, de l'Institut de Mécanique de Grenoble, ont étudié la longue série d'observations d'avalanches faites à Davos et les relevés météorologiques pour déterminer les variables principales, puis faire une analyse discriminante qui permette de classer à priori, au vu des bulletins météorologiques, la journée à venir comme comportant ou non un risque d'avalanche.

Dynamique des avalanches

Le Centre d'Etude de la Neige du CERA FER (Centre d'Etudes et Recherches pour l'Agriculture, les Forêts et l'Equipement Rural du Ministère de l'Agriculture), dirigé par L. de Crécy et le Laboratoire d'applications spéciales de la physique du CENG (Centre d'Etudes Nucléaires de Grenoble), dirigé par P. Perroud, font de très intéressantes mesures sur l'avalanche en mouvement. L'avalanche est déclenchée par explosif, chaque fois que la situation est avalancheuse, dans un couloir aménagé au-dessus du Col du Lautaret. Pour la première fois les vitesses (avec des moulinets hydrauliques) et les pressions d'arrêt sur des disques sont enregistrés en continu, à différents niveaux, au sein de l'avalanche en mouvement.

Les avalanches de poudreuse sont simulées en canal noyé à l'Institut de Mécanique de Grenoble, par l'équipe de E.J. Hopfinger.

Etudes appliquées et développement

Citons le déclenchement par explosifs, et une adaptation du canon à air comprimé avalancher, le génie paravalanche, la détection de victime par ondes électromagnétiques (sans répondeurs, ou avec répondeurs passifs), etc. . .

Références

- LIVA V., non publié (1976) – Emissivité et transmission de la neige en ondes centimétriques, application à la détection radiométrique des victimes d'avalanche. Thèse de Docteur-Ingénieur, Inst. Polytech. de Grenoble.
- HOPFINGER E.J. and TOCHON-DANGUY J.C. (1977) – A model study of powder-snow avalanches. *J. of Glaciology*, vol. 19, n° 81, p. 343-356.
- FOHN P., GOOD W., BOIS P. and OBLED C. (1977) – Evaluation and comparison of statistical and conventional methods of forecasting avalanche hazard. *J. of Glaciology*, vol. 19, n° 81, p. 375-387.

La plupart des autres recherches françaises concernant la Commission Neige et Glaces se font au *Laboratoire de Glaciologie* du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), situé comme les établissements précédents à Grenoble. Ce laboratoire, dont le volume a presque doublé au cours des dernières années, comprend environ 65 personnes, dont une vingtaine de chercheurs permanents et autant d'étudiants chercheurs. Il est divisé en 3 groupes de 2 équipes chacune :

- groupe "glace et glaciers" (responsable : L. Lliboutry, directeur du laboratoire) ;
- groupe "géochimie" (responsable : C. Lorius) ;
- groupe "atmosphère" : équipe "transferts air-sol" (responsable : A. Poggi) et équipe "précipitations orageuses" (responsable : P. Admirat).

2 – PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DE LA GLACE

Conduction thermique de la glace aux très basses températures

J. Klinger a montré que la conductibilité thermique aux très basses températures (entre 0,6°K et 2°K) est une méthode de choix pour déceler les diverses imperfections du réseau cristallin. Ces expériences ont été faites avec l'aide du Service des Très Basses Températures du CENG. Cette technique a permis de fixer le meilleur procédé pour obtenir des monocristaux de glace de très grande qualité.

Pics d'absorption d'énergie lors de vibrations mécaniques

L'absorption d'énergie mécanique par des monocristaux ou poly-cristaux, aux fréquences ultrasoniques ou infrasoniques est étudiée au laboratoire de Physique des matériaux de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, par l'équipe de J.-F. Gobin et J. Perez. Les polycristaux montrent un pic supplémentaire dû à l'absorption aux joints de grain.

Mouvement des dislocations lors du fluage

Cette même équipe, par diffraction de rayons X observée avec une caméra de Lang, a pu mesurer le nombre de dislocations actives et leur vitesse lors de la déformation plastique de la glace. Cela a permis à J. Pérez d'élaborer une théorie originale du fluage, où le noyau vitreux des dislocations joue un grand rôle. Elle a l'avantage sur les théories en cours d'être enfin basée sur une observation directe des processus élémentaires, dont elle rend compte quantitativement.

Loi de comportement mécanique des glaces polycristallines

P. Duval a étudié à fond cette loi de comportement complexe, y distinguant :

- un fluage transitoire réversible peu sensible à la température, logarithmique quelques heures, puis s'arrêtant. La déformation totale est proportionnelle à la contrainte. Phénoménologiquement, il s'agit d'une élasticité retardée, type corps de Maxwell, avec un pseudo-module d'Young 10 fois plus faible que le module d'élasticité instantané. P. Duval l'explique par un réajustement réversible des rideaux de dislocations (sous-joints de grains) ;
- le fluage transitoire d'Andrade, en $t^{1/3}$, très sensible à la température, ne s'observant qu'à la charge, et proportionnel au cube de la contrainte ;
- un fluage permanent tertiaire, avec recristallisation simultanée, dont la vitesse oscille par suite de phases successives d'érouissage et recristallisation. Sa vitesse moyenne suit la loi de Glen avec un exposant $n = 3$.

P. Duval a montré que la texture avec les axes optiques groupés en 4 maximums qu'on trouve dans les glaciers s'établit lorsque la déformation n'est pas un cisaillement simple, et qu'elle est très stable. Il a découvert l'augmentation de la vitesse de fluage de la glace au point de fusion (pour des contraintes données) en fonction de la teneur en inclusions d'eau.

Simulation en laboratoire du glissement d'un glacier sur une bosse

Les conditions régnant à la base d'un glacier sont produites au Laboratoire de Glaciologie dans deux grosses machines, sorte de viscosimètres de Couette géants, baptisées Pénélope et Télémaque. R. Brepsion a publié les premiers résultats obtenus avec Pénélope. La glace bulleuse mise dans la machine a une forte élasticité retardée du type corps de Voigt, ce qui crée un frottement même lorsque pression "du glacier" et pression d'eau "sous-glaciaire" s'équilibrent. Les bulles d'air s'éliminent progressivement dans les cavités, créant la couche basale de glace bleue (considérée à tort dans les glaciers comme de la glace de regel).

Ecoulement d'un corps de Glen autour d'une bosse

L. Lliboutry et C. Ritz ont fait un calcul approché de l'écoulement d'un corps visqueux non linéaire suivant la loi de Glen autour d'une sphère parfaitement lisse. Ecoulement et contraintes diffèrent beaucoup du cas du corps visqueux Newtonien.

BREPSON R., sous presse - Simulating glacier sliding over a bump with Penelope. *J. of Glaciology*.

DUVAL P. (1976) - Lois du fluage transitoire ou permanent de la glace polycristalline pour divers états de contrainte. *Annales de Géophysique*, vol. 32, n° 4, p. 335-350.

DUVAL P. (1977) - The role of the water content in the creep rate of polycrystalline ice. *Isotopes and impurities in snow and ice*. (Actes du Colloque de Grenoble août/sept. 1975) IAHS Publ. n° 118, p. 29-33.

DUVAL P. sous presse - Creep and fabrics of temperate polycrystalline ice under shear and compression. *J. of Glaciology*.

KLINGER J. (1975) - Low-temperature heat conduction in pure, monocrystalline ice. *J. of Glaciology*, vol. 14, n° 2, p. 517-528.

LLIBOUTRY L. et RITZ C. (1978) - Ecoulement d'un fluide visqueux non linéaire (corps de Glen) autour d'une sphère parfaitement lisse. *Annales de Géophysique*, vol. 34, n° 2, p. 133-146.

MAI C., PEREZ J., RIVIERE R., TATIBOUET J. et VASSOILLE R. (1977) - Dislocations et propriétés physico-mécaniques de la glace Ih. *Annales de Physique*, 15^e Série, vol. 2, p. 91-118.

PEREZ J., TATIBOUET J., VASSOILLE R. et GOBIN P.F. (1975) - Comportement dynamique des dislocations dans la glace. *Philosophical Mag.*, vol. 5, p. 985-999.

PETIT J.R. et DUVAL P. (1976) - La thermoluminescence de la glace. Les effets de la déformation plastique. *Solid State communications*, vol. 19, p. 475-477.

TATIBOUET J., VASSOILLE R. and PEREZ J. (1975) - Ultrasonic properties of plastically deformed ice. *J. of Glaciology*, vol. 15, n° 73, p. 161-169.

3 - GLACIERS

Pendant les 4 années écoulées le Laboratoire de Glaciologie n'a effectué du travail de terrain (programmes antarctiques mis à part) que sur les glaciers d'Argentière, de la Mer de Glace et des Bossons (Massif du Mont-Blanc) et de Saint-Sorlin (Grandes Rousses). Il fallait d'abord analyser les données recueillies et publier tous les résultats obtenus. C'est chose faite pour les campagnes dans la Cordillera Blanca du Pérou (1967-70), la Vallée Blanche supérieure (1970-71), le glacier Ampère à Kerguelen (1970-74) et les glaciers de Bellecôte en Vanoise (1973). Des résultats définitifs relatifs à la Mer de Glace et au Glacier de Saint-Sorlin (où le laboratoire travaille depuis 1961 et 1957 respectivement) commencent à sortir.

Plusieurs de ces publications sont sorties à l'occasion d'un colloque sur la dynamique des glaciers tempérés (8-9 septembre 1977, Munich) organisé par L. Lliboutry dans le cadre de la Société Européenne de Géophysique, et patronné par l'AISH.

Etudes des glaciers et catastrophes glaciaires de la Cordillera Blanca du Pérou

L. Lliboutry a publié un travail considérable effectué avec la Société Coyne et Bellier et l'équipe du glaciologue péruvien B. Morales pour étudier des lacs pro-glaciaires dangereux. Peu après la fin de ce travail, la catastrophe de Yungay fut l'occasion d'une nouvelle mission, de l'UNESCO cette fois. On trouve dans les articles publiés les premières données sur le climat et les bilans glaciaires dans la Cordillère Blanche, l'historique de toutes les catastrophes dont cette Cordillère a été le siège, avec leurs causes et les moyens de les prévenir, une étude des systèmes morainiques imbriqués (avec forages et exploration géophysique à l'appui), etc. . .

Etudes de bilans glaciaires

Une étude du glacier Ampère, principal émissaire de la calotte Cook à Kerguelen par M. Vallon, donne les seuls résultats glaciologiques obtenus aux moyennes latitudes de l'hémisphère sud pendant la Décennie Hydrologique Internationale. Alors que dans l'hémisphère nord le recul des glaciers était à peu près stoppé, il a continué à être considérable au Glacier Ampère.

Les bilans de masse annuels ont été déterminés sur la zone d'ablation du glacier de Saint-Sorlin (Massif des Grandes Rousses) depuis 20 ans. Une étude de L. Lliboutry et M. Echevin semblerait montrer que le modèle statistique linéaire de L. Lliboutry peut être étendu en zone d'accumulation. Pour connaître les fluctuations du bilan total, sur tout le glacier, il suffirait alors de très bien le mesurer, avec de nombreuses balises, en une zone limitée facile d'accès.

Bilans d'énergie à la surface des glaciers

Le programme de la Décennies Hydrologique Internationale prévoyait des mesures du bilan énergétique à la surface de certains glaciers témoins, pendant la période d'ablation. Cela a été fait sur le glacier de Saint-Sorlin par S. Martin et sur le glacier Ampère, à 2 niveaux, par A. Poggi. Signalons à ce propos l'ouvrage de ce dernier sur les transferts turbulents d'énergie air-sol, paru chez Masson.

Mesures d'épaisseur de glaciers

Les mesures d'épaisseur sont nécessaires pour avoir les débits solides, permettant de savoir si le glacier est en équilibre dans ses différentes sections, et en vue d'études de dynamique glaciaire. Les techniques pour mesurer l'épaisseur de glaciers alpins sont bien au point : sondeuse électrique de 18 mm de diamètre ou sondeuse à eau chaude sans tube pour le retour (F. Gillet) ; prospection sismique, réflexion et gravimétrie (M. Vallon).

La carte détaillée du bedrock sous le glacier de Saint-Sorlin est terminée. Ce bedrock comporte trois cuvettes de surcreusement alignées et une vallée en Z que ne laissait pas soupçonner la surface régulière du glacier. Les résultats obtenus aux glaciers de Bellecôte (Vanoise) et Ampère (Kerguelen) ont été publiés. Une prospection sismique a été faite au glacier d'Argentière.

Reconstitution de bilans passés et ondes de crue

S. Martin a amélioré sa corrélation bilan de masse-variables météorologiques en retenant comme variables significatives les précipitations de septembre à mai confondues, la précipitation de juin et la température maximale journalière moyenne pour juillet et août. En prenant les variables météorologiques relevées à Lyon-Bron, 77 % de la variance des bilans de masse glaciaires dans les Grandes Rousses est expliqué.

Il peut alors reconstituer les bilans glaciaires depuis l'an 1882. On a d'autre part des altitudes moyennes de profils transversaux sur la Mer de Glace (depuis 1891, avec une lacune 1900-1911), les glaciers des Bossons et d'Argentière (depuis 1904). Les corrélations entre le niveau du profil l'année t et le bilan glaciaire l'année $t-p$ sont maximales pour certaines valeurs de p . Chacune correspond à une onde de crue formée en un lieu différent en amont. Ces lieux sont des zones où le glacier est mince, rapide, offrant une grande surface à l'accumulation ou l'ablation.

Cette étude donne la clef pour dépouiller toutes les données recueillies par le Centre mondial sur les variations des glaciers.

Toutes les données sur les variations de niveau de la Mer de Glace ont été rassemblées, contrôlées et coordonnées par L. Reynaud, un travail d'historien et de bénédiction.

Vitesses de glissement et loi de frottement

Des mesures très précises de L. Reynaud ont confirmé l'importance en montagne des courbures des rayons lumineux en projection horizontale, et montré que le mouvement saccadé qu'on croyait exister à la Mer de Glace n'était qu'une apparence due à ce phénomène.

L. Lliboutry a repris la théorie du frottement du glacier sur son lit. Après avoir relevé de nombreuses erreurs dans tout ce qui a été publié depuis 20 ans sur le sujet, il a mieux examiné les processus hydrologiques et de regel sous le glacier. Les phases de régime autonome n'affectent guère le frottement, et seul le régime interconnecté est à considérer. Il a établi la loi de frottement (sans ou avec cavitation sous-glaciaire) pour les modèles de bedrock suivants :

1) Lit plan parsemé au hasard d'obstacles hémisphériques de toutes tailles. A frottement constant (c'est à peu près le cas lors des fluctuations saisonnières) et pour un glacier suffisamment lent et épais, la vitesse augmente progressivement jusqu'à un facteur 4 entre le moment où il n'y a pas de pression d'eau sous-glaciaire et le moment où celle-ci atteint la pression de glace.

2) Ondulations de longueur comparable. Le coefficient de frottement dépend alors de la vitesse et de la fonction d'éclairement (shadowing function) du lit rocheux. Lorsque l'amplitude des oscillations suit une loi de distribution gaussienne, ce coefficient reste à peu près constant aux grandes vitesses (alors qu'il s'annulait pour un bedrock à profil sinusoïdal).

En liaison avec cette théorie, des profils longitudinaux de lits rocheux récemment évacués par les glaces ont été relevés par J.-P. Benoist. Pour la première fois, des densités spectrales de puissance (dans l'intervalle centimètre-mètre) et des fonctions d'éclairement en sont données.

Transformations de la glace de glacier

M. Vallon a publié les résultats obtenus par J.-R. Petit et B. Fabre en 1970 et 1971, lorsque la Vallée Blanche supérieure (zone d'accumulation de la Mer de Glace) avait été carot-

tée jusqu'au lit rocheux, sur 180 m d'épaisseur. Le névé se transforme rapidement en glace imperméable vers 30 m de profondeur en été, lorsqu'il est saturé d'eau de fonte.

La température en profondeur a été mesurée sur les pentes du Mont-Blanc, et les différents processus thermodynamiques en jeu dans les glaciers tempérés exposés par L. Lliboutry.

M. Brochu (Centre d'Etudes Arctiques, Paris) a étudié les trous à cryoconite d'un glacier de l'Arctique.

REFERENCES

- BENOIST J.P., sous-presse – Spectral power density and shadowing function of a glacial microrelief at the decimetric scale.
- BROCHU M. (1975) – Les trous à cryoconite du Glacier Gilman (nord de l'île d'Ellesmere). *Polarforschung*, vol. 45, n° 1, p. 32-44.
- GILLET F. (1975) – Instruments and methods. Steam, hot water and electrical thermal drills for temperate glaciers. *J. of Glaciology*, 14, n° 70, p. 171-79.
- Laboratoire de Glaciologie du CNRS (L. Lliboutry, rédacteur), (1976) – Les Glaciers de Bellecôte. *Travaux scientifiques du Parc National de la Vanoise*, 7, p. 9-24.
- LLIBOUTRY L. (1975) – La catastrophe de Yungay (Pérou). *Symposium Neiges et Glaces (Actes du Colloque de Moscou, août 1971)*. Publ. de l'AIHS n° 104, p. 353-363.
- LLIBOUTRY L. (1975) – Loi de glissement d'un glacier sans cavitation. *Ann. de Géophysique*, 2, p. 207-226.
- LLIBOUTRY L. (1976) – Physical processes in temperate glaciers. *J. of Glaciology*, 16, n° 74, p. 151-158.
- LLIBOUTRY L. (1978) – Glissement d'un glacier sur un plan parsemé d'obstacles hémisphériques. *Ann. de Géophysique*, vol. 34, n° 2, p. 147-162.
- LLIBOUTRY L. sous presse – Local friction laws for glaciers : a critical review and new openings. *J. of Glaciology*.
- LLIBOUTRY L., BRIAT M., CRESEVEUR M. et POURCHET M. (1976) – 15 m deep temperatures in the glaciers of Mont-Blanc (French Alps). *J. of Glaciology*, 16, n° 74, p. 197-203.
- LLIBOUTRY L. et ECHEVIN M. (1974) – Mesure des bilans annuels en zone d'accumulation. *Z für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 10, p. 71-88.
- LLIBOUTRY L., MORALES ARNAO B., PAUTRE A. et SCHNEIDER B. (1977) – Glaciological problems set by the control of dangerous lakes in Cordillera Blanca, Peru. I – Historical failures of morainic dams, their causes and prevention. II – Movement of a covered glacier embedded within a rock glacier. III – Study of moraines and mass balances at Safuna. *J. of Glaciology*, 18, n° 79, p. 239-290.
- MARTIN S. (1975) – Wind regimes and heat exchange on glacier de Saint-Sorlin. *J. of Glaciology*, 14, n° 70, p. 91-105.
- MARTIN S. (1977) – Analyse et reconstitution de la série des bilans annuels du Glacier de Sarennes ; sa relation avec les fluctuations du niveau de trois glaciers du Massif du Mont-Blanc (Bossons, Argentière, Mer de Glace). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 13, p. 127-153.
- POGGI A. (1976) – Contribution à l'étude de la couche limite au voisinage immédiat de la surface du glacier Ampère (Iles Kerguelen). Une contribution française à la Décennie Hydrologique Internationale. *Ann. de Géophysique*, 32, n° 4, p. 351-372.
- POGGI A. (1977) – Heat balance in the ablation area of the Ampère Glacier (Kerguelen Islands). *J. of Applied Meteorology*, 16, n° 1, p. 48-55.
- POGGI A. (1977) – Etude comparative du bilan thermique en deux stations du Glacier Ampère (Kerguelen). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 13, p. 87-97.
- REYNAUD L. (1975) – Mouvements du glacier en surface sur une courte échelle de temps. *Bulletin des Sciences Hydrologiques*, 20, n° 3, p. 329-339.
- REYNAUD L. (1977) – Glacier fluctuations in the Mont-Blanc area (French Alps). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 13, p. 155-166.
- VALLON M. (1977) – Topographie sous-glaciaire du Glacier Ampère (Iles Kerguelen), T.A.A.F.). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 13, p. 37-55.
- VALLON M. (1977) – Bilan de masse et fluctuations récentes du Glacier Ampère (Iles Kerguelen, T.A.A.F.). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 13, p. 57-85.
- VALLON M., PETIT J.R. et FABRE B. (1976) – Study of an ice core to the bedrock in the accumulation zone of an alpine glacier. *J. of Glaciology*, 17, n° 75, p. 13-28.
- OUVRAGES DIDACTIQUES
- LLIBOUTRY L. (1977/78) – Articles : Ablation, Andes, Bilan glaciaire, Catastrophes glaciaires, Chevrons, Crevasses, Glaciers, Glaciologie, Glissement des glaciers, Hydrologie nivale et glaciaire, Moulins, Névés, Pénitents, Rimaye, Trous à cryoconite, Vers de glacier. *Grande Encyclopédie de la Montagne* (Editions Atlas).
- POGGI A. (1977) – *Introduction à la micrométéorologie, transferts d'énergie atmosphère-sol* (Masson et Cie), 148 p.

GEOCHIMIE

Objectif des études

Les couches de neige déposées successivement sur les calottes polaires renferment un certain nombre de témoins, le plus souvent à caractère global, de l'évolution de l'atmosphère terrestre. Leur analyse a pour objet (Lorius et Delmas) :

a) de décrire les variations du climat (précipitations, températures) et d'en étudier la variabilité ; on s'intéresse à la période récente (variations inter-annuelles sur le dernier siècle), aux principaux événements de l'holocène (10 000 ans) et au maximum de froid de la dernière glaciation (18 000 ans).

b) de déterminer l'origine (continents, océans, poussière cosmique, activité humaine) des éléments traces ; on recherche les causes des variations observées (échanges atmosphériques, pollution, activité volcanique ou cosmique...) et les corrélations éventuelles avec le climat, l'activité solaire...

c) d'obtenir un certain nombre de paramètres (accumulation, températures, profils de la surface et du socle rocheux, vitesses) qui permettront de modéliser la calotte glaciaire et d'évaluer son état de stabilité.

Bien que l'on s'intéresse principalement à l'Antarctique, un certain nombre de travaux sont aussi réalisés dans les Alpes.

Relations extérieures

Les recherches dans l'Antarctique n'ont été possibles que grâce à un important financement des Terres Australes et Antarctiques Françaises (TAAF), à l'aide logistique des Expéditions Polaires Françaises et au support aérien de la National Science Foundation (USA). Elles font partie d'un *programme international* (non intégré) de Glaciologie Antarctique (PIGA), soutenu aussi par l'INAG et auquel participent des équipes d'Australie (Melbourne), Grande Bretagne (Cambridge), URSS (Moscou et Leningrad), USA (Columbus, Madison, etc...). Une coopération avec l'Institut Antarctique Argentin a débuté.

Sur le *plan national*, une RCP "Calottes glaciaires, étude du climat et des échanges de matière", dont le responsable est C. LORIOUS, lie le Laboratoire de Glaciologie au Centre des Faibles Radioactivités (CNRS-CEA) de Gif-sur-Yvette et aux Centres d'Etudes Nucléaires de Saclay (Département de Recherches et Analyses) et de Grenoble (Service de Chimie Analytique). Les travaux dans les Alpes ont bénéficié d'une convention du Ministère de l'Environnement.

Campagnes

Elles ont principalement comporté deux missions au Pôle Sud et en un site vierge (Dôme C = 74° 40' S, 124° E, altitude 3 200 m) des régions centrales de l'Antarctique. Des travaux complémentaires ont été réalisés entre ce site et la côte. Au Dôme C on a notamment réalisé (campagne 1977-78) avec un carottier thermique (Gillet et al.) un carottage de 905 m de profondeur représentant les couches de neige accumulées au cours des 30 000 dernières années.

Etude des variations du climat

Il a été possible d'établir (Lorius et Merlivat) une relation empirique entre la teneur isotopique moyenne des précipitations et la température moyenne du site où elles se déposent. Cette relation peut servir de base pour l'étude des variations passées du climat. Les premiers résultats obtenus au Dôme C et ceux publiés par des équipes étrangères indiquent une évolution parallèle des grands traits des variations climatiques dans les régions de haute latitude. Depuis 10 000 ans les conditions ont été sensiblement les mêmes que celles que nous

connaissions actuellement ; la transition à partir du climat beaucoup plus froid qui existait auparavant (au-delà de 15 000 ans) s'est effectuée en quelques millénaires (Lorius et Duplessy). Un progrès important vers l'interprétation en terme de température des variations isotopiques (δ) observées a été réalisé grâce à une méthode originale (Raynaud, Raynaud et al.). Il a en effet montré que le volume de gaz V piégé dans la glace dépend de la température et principalement de l'altitude à laquelle la glace s'est formée. En traitant simultanément les données de V et δ (qui dépend des mêmes paramètres), il devient possible de différencier les variations isotopiques liées au seul climat de celles liées par exemple aux variations d'épaisseur des calottes.

On s'efforce de caractériser non seulement les variations spatio-temporelles des températures, mais aussi celles des précipitations (Merlivat et al.) (Lambert et al.). Ces deux données manquent en effet pour l'hémisphère Sud ; elles serviront à tester les modèles atmosphériques en cours d'élaboration pour l'étude de l'évolution des climats.

Impuretés contenues dans la glace : contribution liée aux phénomènes naturels et à l'activité humaine

L'éloignement des continents et des foyers importants de l'activité industrielle font de l'Antarctique un très bon site pour détecter les modifications du niveau de base (ou bruit de fond) atmosphérique. Le problème est difficile car il s'agit de déterminer si la contribution humaine aux impuretés atmosphériques est significative à l'échelle globale.

Le traitement statistique des résultats d'analyse permet de montrer que la neige contient principalement des éléments provenant des roches et sols des continents (Si, Al, Fe) et des océans (Na, Mg, S sous forme de SO_4). Même si les teneurs sont très faibles (au Pôle Sud par exemple 10 g de Na et 1 g de Al pour 1 000 tonnes de neige), il se dépose chaque année sur l'Antarctique des quantités considérables de matière (environ 500 000 tonnes) dont beaucoup à une origine très lointaine. La contribution marine est prépondérante (Boutron et Lorius) : la poussière cosmique n'en représente qu'une très faible part que l'on arrive néanmoins à caractériser.

Et puis l'on trouve aussi, à des teneurs plus faibles, certains éléments considérés comme polluants (au Pôle Sud 0,02 g de Pb pour 1 000 tonnes de neige mais aussi 50 g de sulfates) et dont la présence ne peut s'expliquer simplement par une origine continentale ou océanique. Cela est vrai pour Pb, Cu, Zn, Ag (Boutron et al.). On a aussi observé pour ces métaux lourds une faible augmentation au cours des 25 dernières années : les couches de neige déposées en 1975 au Pôle Sud en contiennent 2 à 5 fois plus que celles déposées vers 1950. Il semblerait ainsi que cette évolution traduise une modification globale de l'atmosphère comme le suggère la comparaison avec les études réalisées sur la neige du Groenland.

Il est tentant d'attribuer cette augmentation à l'activité industrielle croissante, d'autant plus qu'on a retrouvé trace en Antarctique de composés dont la seule origine est la pollution (DDT, fréons). Mais l'interprétation est en fait complexe comme en témoignent deux types d'arguments. D'une part les volcans émettent des quantités importantes de métaux lourds, d'autre part il existe encore trop de métaux lourds dans la neige déposée à une époque où l'activité industrielle est faible ou nulle. Des causes naturelles pourraient donc être responsables pour une bonne part des excédents trouvés dans les neiges antarctiques. On pense en particulier à l'activité volcanique.

Les poussières émises dans la haute atmosphère pourraient avoir atteint l'Antarctique et ceci apparaît clairement pour SO_4 qui constitue (sous forme de SO_2) un composé important des émissions volcaniques : au Pôle Sud le pic observé en 1965 correspond à l'arrivée des aérosols émis lors de l'éruption du Mont Agung en novembre 1963. Pour SO_4 les teneurs observées en 1950 sont peu différentes de celles observées dans la neige récente ; l'éventuelle contribution humaine est masquée par l'importance de la source volcanique (Delmas et Boutron).

Par contre les couches de neige déposées en Antarctique témoignent nettement de la contamination globale de l'atmosphère par les produits radioactifs. L'activité de la neige mesurée actuellement montre que les couches déposées depuis 1955 ont une radioactivité β très supérieure au niveau naturel (Merlivat et al., Lambert et al.).

- LORIOUS C. et DELMAS R. (1975) – Géochimie des calottes polaires : aspects atmosphériques et climatiques. *Congrès de la Société Française de Physique, Dijon, 30 juin-4 juillet 1975. Colloque C8 : Physico-chimie de la basse atmosphère. Journal de Physique, 36*, Supplément au n° 12, p. C8-37.
- GILLET F., DONNOU D. and RICOU G. (1976) – A new electrothermal drill for coring in ice. *Ice Core Drilling*. (J.-F. Spettstoesser ed.). University of Nebraska Press, p. 19-27.
- RAYNAUD D. (20 mai 1976) – Les inclusions gazeuses dans la glace de glacier ; leur utilisation comme indicateur du site de formation de la glace polaire ; applications climatiques et rhéologiques. (Thèse de Doctorat d'Etat, Université Sci. et Méd. de Grenoble), 128 p.
- LORIOUS C. et DUPLESSY J.C. (1977) – Les grands changements climatiques. *La Recherche, 8*, n° 83, p. 947-56.
- MERLIVAT L., JOUZEL J., ROBERT J. and LORIOUS C. (1977) – Distribution of artificial tritium in firn samples from East Antarctica. *Isotopes and Impurities in Snow and Ice*. (Proceedings of the Grenoble Symposium, Aug/Sept 1975) - IAHS Publ. n° 118, p. 138-45.
- BOUSTRON C. and LORIOUS C. (1977) – Trace element content in East Antarctica snow samples. *Isotopes and Impurities in Snow and Ice*. (Proceedings of the Grenoble Symposium, Aug/Sept. 1975). IAHS Publ. n° 118, p. 164-71.
- RAYNAUD D. and LORIOUS C. (1977) – Total gas content in polar ice : rheological and climatic implications. *Isotopes and Impurities in Snow and Ice*. (Proceedings of the Grenoble Symposium, Aug/Sept 1975). IAHS Publ. n° 118, p. 326-35.
- LAMBERT G., ARDOUIN B., SANAK J., LORIOUS C. and POURCHET M. (1977) – Accumulation of snow and radioactive debris in Antarctica : a possible refined radiochronology beyond reference levels. *Isotopes and Impurities in Snow and Ice*. (Proceedings of the Grenoble Symposium, Aug/Sept 1975). IAHS Publ. n° 118, p. 146-58.
- LORIOUS C. and MERLIVAT L. (1977) – Distribution of mean surface stable isotope values in East Antarctica : observed changes with depth in the coastal area. *Isotopes and Impurities in Snow and Ice*. (Proceedings of the Grenoble Symposium, Aug/Sept 1975). IAHS Publ. n° 118, p. 127-37.
- DELMAS R. and BOUSTRON C. – Sulfate in Antarctic snow : spatio-temporal distribution. *International Symposium on sulfur in the atmosphere*, Sept. 7-14, Dubrovnik, Jugoslavia, Atmospheric Environment, Vol. 12, n° 1-3, p. 723-28.
- BOUSTRON C., MARTIN S. and LORIOUS C. (sept. 1977) – Composition of aerosols deposited in Antarctic snows : time dependence and sources. *Proceedings of the 9th international conference on atmospheric aerosols, condensation and ice nuclei*, Galway, Ireland, (Pergamon Press).

SECTION VII

SCIENCES PHYSIQUES DE L'OCÉAN

TABLE DES MATIERES

I – Mouvements et caractères des masses d'eau. Circulation générale et échelle intermédiaire M. LACOMBE.....	313
II – Transferts et transformations d'énergie au voisinage de l'interface air-mer M. COANTIC.....	322
III – La houle A. CAVANIE.....	327
IV – Ondes internes et marées M. CREPON.....	329
V – Etudes théoriques sur la dynamique des mers B. SAINT-GUILY.....	332
VI – Optique marine et télédétection A. MOREL et J. LENOBLE.....	334
VII – Océanographie côtière et environnement R. BONNEFILLE.....	340
VIII – Géologie et géophysique des marges continentales et des fonds océaniques G. GRAU.....	343
IX – Les récifs coralliens A. GUILCHER.....	352
X – Océanographie chimique P. COURTOT.....	355
XI – La géochimie des océans R. CHESSELET et Cl. LALOU.....	359

I – MOUVEMENTS ET CARACTERES DES MASSES D'EAU. CIRCULATION GENERALE ET ECHELLE INTERMEDIAIRE

Henri LACOMBE (*)

Laboratoire d'Océanographie Physique
Muséum National d'Histoire Naturelle, 75005 PARIS

En ce domaine les études faites en France ont été très variées, comme le montre la diversité des rubriques évoquées ci-dessous.

1 – ETUDES DE CLIMATOLOGIE MARINE MOYENNE ET SAISONNIERE

L'exploitation de données historiques concernant les caractères marins superficiels ou les caractères météorologiques a conduit à des études dans de *vastes zones océaniques du large*, notamment dans le NW Atlantique [9], la Mer d'Arabie [8, 10, 11]. Dans le Pacifique inter-tropical [4, 5, 6], les résultats de mesures et prélèvements systématiques sur les navires de certaines lignes de navigation, organisées par une équipe de l'ORSTOM en liaison avec des équipes américaines, confirment l'existence d'interactions océan-atmosphère à l'échelle du Pacifique entier.

Dans l'Atlantique tropical Est, en plus d'études descriptives [49, 50], HISARD et MERLE [28], également de l'ORSTOM, ont émis l'hypothèse de l'existence régulière d'un phénomène analogue à l'"El Niño" du Pacifique ; cette régularité s'expliquerait par l'étroitesse relative de l'Atlantique, qui peut ainsi répondre plus rapidement que le Pacifique au déplacement saisonnier des alizés.

Dans l'ensemble [12], ces études *climatologiques de grande échelle* mettent, notamment, en évidence que, dans les aires étudiées, grâce à l'existence de séries chronologiques, il y a, au moins dans l'hémisphère Nord et près de l'équateur, une évolution parallèle de la température superficielle depuis le début du siècle : augmentation d'environ 1° entre 1920 et 1965 ; depuis, il y aurait tendance à diminution.

Deux publications [65 et 33] présentent deux aspects très différents d'utilisation éventuelle de l'énergie thermique des mers.

Des études sur des *aires plus proches des côtes* et plus limitées ont, par ailleurs, mis en évidence d'intéressants phénomènes :

Dans le Golfe de Gascogne, l'évaluation par les équipes brestoises de l'Université et du COB des contenus thermiques de la couche superficielle, en 1973 et 1974 [14, 15], ont montré que le Golfe accumule moins de chaleur que certaines aires situées plus à l'Ouest (45°N-10°W), bien que les températures de surface y soient plus élevées.

En Mer Celtique, l'ensemble des données historiques disponibles traitées à Brest (Université et CNEXO-COB) rendent compte, non seulement des variations saisonnières de la structure hydrologique et de leur répartition synoptique dans un secteur restreint, mais aussi de variations cycliques sur des périodes de plusieurs mois à plusieurs années [58, 59]. En outre,

(*) Avec l'aide de J. LE FLOCH', F. MADELAIN et J. MERLE.

le front thermique superficiel existant, en période chaude, à l'Ouest d'Ouessant [57] a été étudié à plusieurs reprises, en liaison avec l'équipe de radiométrie du Laboratoire de Météorologie Dynamique de Paris [3].

J. LE FLOCH' [43] a rassemblé un certain nombre de faits concernant cette aire : front thermique, nappe froide au contact du fond sur le plateau continental atlantique breton, présence du front halin dû à la Loire.

En ce qui concerne le front thermique, un modèle simple en a été proposé [17].

2 – ETUDES GENERALES D'OCEANOGRAPHIE PHYSIQUE ET DYNAMIQUE

Le cours de P. TCHERNIA [62, 63] sur l'océanographie régionale sera sous peu publié, en français par l'Ecole Nationale Supérieure des Techniques Avancées et en traduction anglaise (Pergamon Press).

Dans la même rubrique, on peut citer l'article "courants marins" [37] publié dans l'Encyclopédie du Bureau des Longitudes 1977, le texte d'une série d'exposés dans le cadre du Cours d'automne à l'ICTP de Trieste – Physique de l'atmosphère et des océans – [35] et divers autres articles, dont [36].

3 – ETUDES DE DYNAMIQUE ET DE VARIABILITE MARINES

Ces études ont porté sur des régions et des phénomènes très divers et leur présentation sera, par commodité, faite selon les aires géographiques étudiées.

Proche Atlantique et Manche

En Manche, dans le cadre de l'opération Jonsdap, la publication [42] présente d'intéressantes informations sur l'effet du fond sur un courant de marée.

Si l'étude [44] expose divers problèmes relatifs à l'extension de l'eau méditerranéenne dans l'Atlantique proche, une mention particulière doit être faite des travaux du groupe de MADELAIN [2, 46, 47] sur une structure tourbillonnaire de courant qu'il a étudiée au large de la Bretagne au cours des années 1976 et 1977 au moyen de bouées dérivantes. Ces bouées, dont certaines portaient des capteurs thermiques, étaient localisées par le satellite américain Nimbus F environ 5 fois par jour avec une précision estimée à $\pm 1,5$ mille. Les bouées portaient des "drogues" de 100 m.

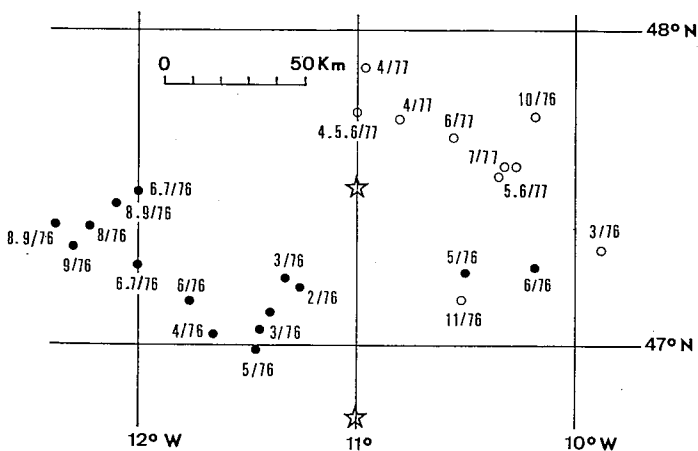
La zone d'étude avait été choisie, au vu de campagnes précédentes, pour la faiblesse des courants moyens et des gradients horizontaux de température ou de salinité de façon à limiter au maximum sur les séries temporelles de température les fluctuations dues à la variabilité spatiale. Cette expérience a duré 21 mois, au cours desquels 20 lâchers de bouées furent effectués sur le méridien 11°W par 46°N, 46°45'N et 47°30'N. Les résultats les plus significatifs qui peuvent être déduits de cette expérience sont les suivants :

- de façon presque systématique, toutes les bouées qui furent larguées ont été piégées dans des cellules de circulation cyclonique ou anticyclonique [46] :

- . de février à octobre 1976, les trajectoires observées furent anticycloniques ; les bouées dérivèrent à des vitesses moyennes journalières de 12 cm/sec effectuant une révolution en 20 à 30 jours ; les vitesses maximales journalières observées atteignent 35 cm/sec, alors que la circulation moyenne en dehors du tourbillon n'est que de quelques centimètres par seconde. Un exemple des trajectoires anticycloniques obtenues jusqu'au 1er octobre 1976 est reporté sur la figure n° 1, leur diamètre est de 100 à 150 km,

. à partir du mois d'octobre, toutes les trajectoires obtenues furent cycloniques, d'un diamètre plus faible de l'ordre de 50 à 80 km, parcourues à des vitesses de 10 à 12 cm/sec en 15 jours environ ;

- les trajectoires obtenues au cours de la 3ème expérience (fig. 1) indiquent qu'il y a augmentation de la vitesse des bouées lorsqu'elles se rapprochent du centre du tourbillon ;



- centre de tourbillon anticyclonique
- centre de tourbillon cyclonique
- ☆ points de lancement des bouées ID 0165 et 1653 de la figure 1.

Fig. 2 – Positions du centre des tourbillons décrits par des bouées dérivantes 1976-1977.

- des mesures directes de courant [47] montrent que ces tourbillons sont sensibles jusqu'à 600 mètres de profondeur et très probablement au-delà (1700 m et plus) ;
- à 300 mètres de profondeur, l'écart de température entre le centre et l'extérieur du tourbillon atteint 1°C alors qu'il n'est que de 0,5°C en surface [2] ;
- une carte montrant l'emplacement du centre des différents tourbillons observés (cycloniques d'une part, anticycloniques d'autre part – fig. 2) suggère qu'il s'agit peut-être d'une paire de tourbillons inverses dérivant très lentement vers le Nord-Ouest. Selon leur point de lâcher, les bouées étaient captées, en début d'expérience, dans le système anticyclonique et, ensuite, dans le système cyclonique.

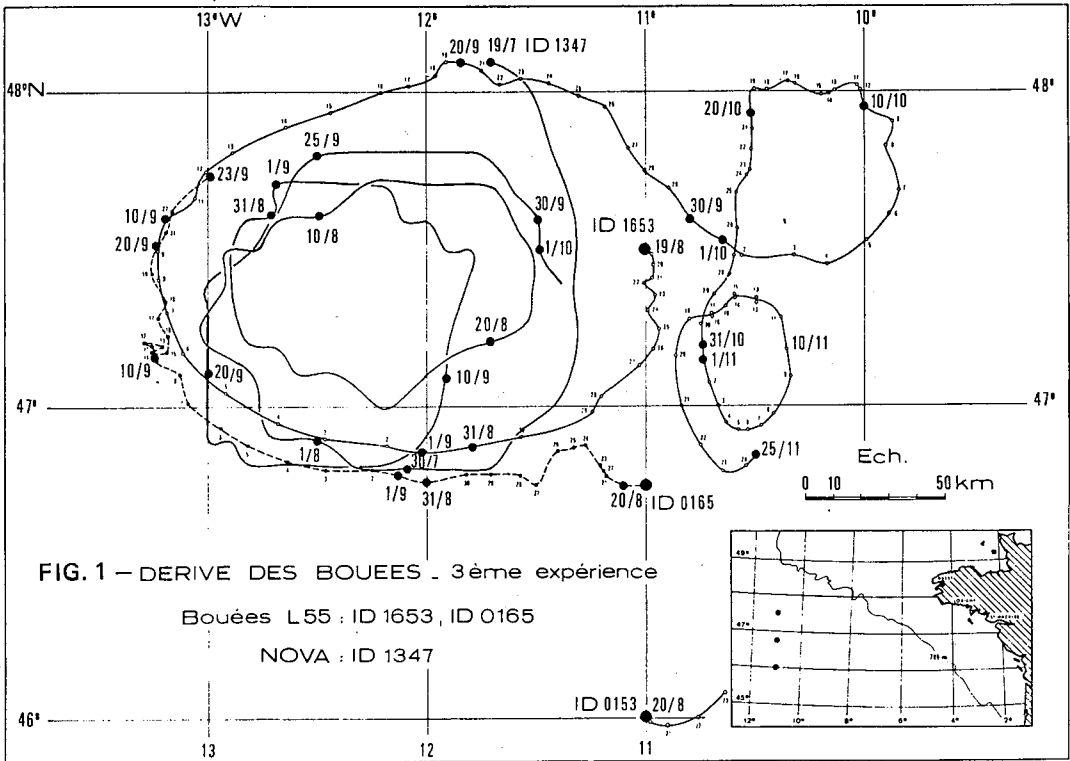
Au cours de l'année 1979, après une campagne de prospection qui sera menée à l'aide de bouées dérivantes, une étude intensive d'un système tourbillonnaire mettant en œuvre deux bateaux pendant chacun deux mois aura lieu en septembre-octobre ;

– dans le Golfe de Gascogne lui-même, l'analyse (LIE, 45), des variations journalières du niveau marin dans des ports ainsi que des éléments météorologiques ont permis l'étude d'ondes de plateau continental engendrées par la composante de vent parallèle à la côte.

Méditerranée

L'un des problèmes les plus intensément étudiés a été celui de la formation des eaux profondes à la lumière de l'étude des résultats de plusieurs campagnes, dont [48]. Sur ce sujet GASCARD [18 à 23] a publié toute une série d'articles, dont sa thèse [20] qui met en évidence l'action de l'instabilité barocline et la genèse de tourbillons alternés de 10 km

de diamètre environ au cours d'une phase d'homogénéisation des couches marines superficielles sur 600-1000 m d'épaisseur dans l'aire de formation d'eau profonde de la Méditerranée NW. Mais, en fait, il est certain que l'homogénéisation constatée [34] sur toute l'épaisseur fluide (2000 m) est due à une *succession* de phases diverses au cours desquelles les mécanismes mis en jeu sont certainement très différents et, notamment, à des instabilités diverses [20] qui impriment aux eaux des mouvements verticaux d'ordres de grandeur et de durée très différents (1 mm/sec à 10 cm/sec). Dans certains d'entre eux, le vent joue très probablement un grand rôle.



D'autre part, il apparaît, à la lumière de résultats, non encore publiés, d'observations faites conjointement en 1976 et 1978 à bord du navire canadien HUDSON, en Mer du Labrador, par le groupe du "Bedford Institute" et l'équipe de GASCARD mettant en œuvre les techniques utilisées en Méditerranée, qu'il existe de grandes similitudes entre les mécanismes étudiés en Méditerranée et ceux de mers sub-polaires. La "similitude" du modèle réduit méditerranéen apparaît donc comme excellente. Des observations récentes ont mis en évidence

des structures à petite échelle (14 km selon GORDON) en Mer de Weddell, qui rappellent aussi celles de la Méditerranée NW.

En outre, une remarquable similitude a été mise en évidence par GASCARD [20] entre le front polaire atmosphérique boréal et les dépressions qui en sillonnent le bord, d'une part, et, d'autre part, les tourbillons ceinturant la "tache dense" d'eau méditerranéenne dans l'aire de formation d'eau profonde en Méditerranée du Nord-Ouest. Le "rapport de similitude" est d'environ 100, pour le rapport du diamètre du front polaire à celui de la tache dense, et pour le rapport de la dimension d'une dépression météorologique (1 000 km) et du tourbillon méditerranéen trouvé (10 km). Le rapport est proche de celui des rayons internes de déformation dans l'un et l'autre milieu.

Dans la même ligne d'études de circulation à échelle moyenne, on doit citer le tourbillon mis en évidence [54] en Mer d'Alboran par une bouée dérivante de la Météorologie Nationale, ainsi que l'effort fait par ce Service pour étudier le mouvement fluides dans diverses régions (Courant des Canaries, en plus de la Méditerranée).

Si une étude générale [32] rappelle quelques progrès récents accomplis dans la connaissance de la Méditerranée, l'exploitation [16] de campagnes de 1965 à 1968, effectuées dans la région des détroits de Sicile et de Sardaigne, a permis de déterminer non seulement les échanges entre Méditerranée orientale, Mer Tyrrhénienne et bassin algéro-provençal mais aussi la façon dont la nappe d'eau intermédiaire se dédouble dans le Canal de Sardaigne et de proposer une explication du phénomène. La structure des courants au large du Golfe du Lion [13], dans le canal Provence-Corse [38, 39] et enfin le régime du Golfe du Lion et des upwellings au voisinage de la côte [25, 51, 52] ont été étudiés. En particulier, les études de la dynamique marine d'été dans le Golfe du Lion, abordées, d'une part par de longues séries de mesures sur bouées, d'autre part par l'examen des thermographies de la surface marine dépouillées par le groupe MONGET, ont montré (C. MILLOT) que l'upwelling se développe vers le large par vents de terre (Mistral et Tramontane) à partir de "points-sources" situés sur certains segments rectilignes de la côte, puis s'étend ensuite vers le large. La présence, au niveau de la thermocline, d'oscillations d'inertie accompagnées de mouvements en opposition de phase de part et d'autre a été reconnue, même très près de terre ; enfin, des "cellules" de circulation semblent se développer en liaison avec les aires-sources de l'upwelling.

— Dans l'*Océan Indien*, SOARES [60] exploitant les données collectées au cours de l'Expédition Internationale dans cet océan et concernant le Canal de Mozambique a précisé de nombreux points de l'hydrologie et de la dynamique de cette région.

Au Sud, quelques informations ont été collectées sur la région de la Convergence antarctique [29].

— Dans l'*Antarctique*, le suivi par P. TCHERNIA [61] d'icebergs porteurs de balises interrogées par satellite a décelé certains traits remarquables concernant, d'une part la variabilité de la circulation antarctique, d'autre part le raccordement de la dérive périanarctique vers l'Ouest et de la dérive opposée, plus septentrionale, des vents d'Ouest.

Région équatoriale de l'Atlantique Est

Un important effort d'étude des caractères marins à grande échelle a été assuré par les chercheurs de l'ORSTOM en liaison avec l'équipe de l'Université de Bretagne occidentale (J. LE FLOCH') et d'équipes américaines : elles portent sur la région équatoriale de l'Océan Atlantique oriental. Les principaux résultats acquis depuis 1975 portent, d'une part sur la description de l'état moyen des systèmes de circulation équatoriaux et, d'autre part, sur leur variabilité à diverses échelles temporelles, ondes de basse fréquence, notamment.

Circulation moyenne

En plus de l'étude théorique de BROSSIER [1] et de l'étude générale [41], ce sont les résultats de mesures nombreuses et l'action conjointe de plusieurs équipes qui ont fait progresser nos connaissances sur la circulation moyenne dans cette aire, particulièrement intéressante.

L'état moyen de la circulation océanique intertropicale est dominé par les effets d'une tension presque zonale du vent (vers l'Ouest) et du piégeage de différentes catégories de mouvements océaniques par l'Equateur. HISARD et al. [26] montrent que la zone frontale du Cap Lopez, existant pendant l'été boréal, est due à la venue en surface d'eaux du "Sous-courant équatorial" (Equatorial under-current), qui apporte des eaux relativement froides et salées au contact des eaux équatoriales chaudes et peu salées.

Les mêmes auteurs [27] mettent en évidence deux sous-courants profonds de part et d'autre de l'équateur (vers 5°) et leurs caractères hydrologiques. Le sous-courant Nord est relié au contre-courant équatorial Nord ; celui du Sud est plus fugitif [40]. Certains mouvements méridiens [66] expliquent la présence d'eaux marquées par l'eau centrale Sud-Atlantique jusque vers 19°N et au centre du dôme de Guinée (10°N).

Variabilité

A la suite de l'opération GATE [7] ont été étudiés les méandres du Sous-courant équatorial ; en outre, ont été examinées [31] l'évolution, au cours de GATE, des gradients zonaux de pression atmosphérique à l'équateur, en phase avec la tension du vent.

Les upwellings côtiers de l'Atlantique équatorial oriental ont été rattachés [53], non pas à l'action locale du vent, mais à une action lointaine des alizés soufflant beaucoup plus à l'Ouest et dont la brusque intensification, en été, susciterait une onde de Kelvin piégée à l'équateur. L'upwelling côtier du Golfe de Guinée [28, 49] peut s'expliquer par la disparition de la mince couche d'eau relativement chaude et peu salée qui recouvre les eaux sous-jacentes plus froides pendant la longue saison chaude. Le phénomène a été comparé à un "El Niño" permanent. Les études [55] et [56], par analyse spectrale des observations de niveau et de températures de surface en divers ports du Golfe de Guinée, suggèrent l'existence d'une onde stationnaire (de période 40-50 jours) et d'une onde progressive d'une période de 14,7 jours piégée par la côte et résultant d'une interaction non-linéaire entre M_2 et S_2 . En outre, dans la même ligne, [64] fait une revue des phénomènes de basse fréquence affectant l'atmosphère et la surface marine et trouve des pics significatifs sur toute une série de périodes, de 3 jours à 12 mois. Des ondes de Rossby très particulières ont été mises en évidence dans le secteur [67].

4 - Quelques études comportant des éléments de *caractère technique* touchant divers appareils, leurs conditions d'emploi et la valeur des résultats qu'ils fournissent, apportent d'utiles informations [22, 24, 30, 42, 54].

BIBLIOGRAPHIE (à l'exclusion des rapports internes)

- [1] BROSSIER F. (1975) - Essai d'étude théorique de la circulation dans l'Atlantique équatorial. Thèse de 3^e cycle, Université de Bretagne occidentale, Brest.
- [2] BYUN S.K., MADELAIN F. (juin 1978) - A cyclonic eddy in the northeast Atlantic from a drifting buoy experiment-*Polymode News*, n° 49.
- [3] DECHAMBENOY G., LE FLOCH' J., PONTIER, RAILLARD J., SIROU F. (1977) - Quelques résultats de mesures par navire et avion de la structure thermique superficielle de la mer au large de Brest, *Rev. Hydrogr. Int.*, Vol. 54, n° 2, 135-152, 14 fig.
- [4] DONGUY J.R. et HENIN C. (1976) - Anomalous navifacial Salinities in the tropical Pacific Ocean. *J. Mar. Res.*, 34, 3, 335-364.
- [5] DONGUY J.R. et HENIN C. (1978) - Hydroclimatic anomalies in the south Pacific. *Oceanol. Acta*, 1, 1, 25-30.

- [6] DONGUY J.R. and HENIN J. (1975) - Surface salinity fluctuations between 1956 and 1973 in the western south Pacific Ocean. *Journ. Phys. Oceanogr.* (suppl.), 5, 1-10.
- [7] DUING W., HISARD P., KATZ E.J., MEINCKE J., MILLER L., MOROSHKIN K., PHILANDER G., RYBNIKOV A., VOIGT K. and WEISBER R. (1977) - Meanders and long waves in the Equatorial Atlantic. *Nature*, vol. 257, n° 55241, 280-284.
- [8] FIEUX M. (déc. 1975) - Etude de l'écoulement de la mousson de Sud-Ouest en Mer d'Arabie. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 281, sér. B, 563-566, 5 fig.
- [9] FIEUX M., STOMMEL H. (1975) - Preliminary look at feasibility of using marine reports of sea surface temperature for documenting climatic change in the western North Atlantic. *J. Mar. Res.*, vol. 33, 83-95, suppl. 1975, 8 fig.
- [10] FIEUX M., STOMMEL H. (1976) - Historical sea surface temperatures in the Arabian Sea. *Ann. Inst. Océanogr.* Paris, t. 52, fasc. 1, 5-15, 9 fig.
- [11] FIEUX M., STOMMEL H. (1976) - Onset of the South West monsoon over the Arabian Sea, from marine reports of surface winds : structure and variability. *Month. Weath. Rev.*, vol. 105, n° 2, 231-236, 6 fig.
- [12] FIEUX M. (1978) - Relation entre température de surface océanique et évolution climatique globale. *Océanis*, vol. IV, fasc. 2, (sous presse).
- [13] FIEUX M., GARZOLI S., GONELLA J. (1978) - Contribution à la connaissance de la structure spatiale des courants superficiels au large du Golfe du Lion. Soumis à *J. de la Rech. Océanogr.*
- [14] FRUCHAUD-LAPARRA B., LE FLOCH' J., LE TARRAU J.Y., TANGUY A. (1976) - Etude hydrologique et variations saisonnières dans le Proche Atlantique en 1973. *Rapp. Sci. et Tech. du CNEXO*, n° 26.
- [15] FRUCHAUD-LAPARRA B., LE FLOCH' J., LEROY C., LE TAREAU J.Y., MADELAIN F. (1976) - Etude hydrologique et variations saisonnières dans le Proche Atlantique en 1974. *Publ. CNEXO, Sér. Rapp. Scient.*, n° 30, 107 p.
- [16] GARZOLI S. et MAILLARD C. (1978) - Winter circulation in the Sicily and Sardinia straits region. *Accepté à Deep-Sea Res.*
- [17] GARZOLI S. (1978) - Contribution à l'étude de la formation et de l'évolution du front thermique sur le plateau continental breton. *Accepté aux Ann. Hydrogr.*
- [18] GASCARD J.C. (1975) - Comparaison des mouvements verticaux observés en profondeur en Méditerranée Nord-occidentale, en régime d'été et en régime d'hiver. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 280, B, 555-558, 3 fig.
- [19] GASCARD J.C. (1975) - Mediterranean Sea. *In Mc Graw-Hill Encyclopaedia of Science and Technology*, 267-269.
- [20] GASCARD J.C. (1977) - Quelques éléments de la dynamique de formation des eaux profondes méditerranéennes. Thèse Doct. Etat, Université Paris VI, 110 p., 59 fig.
- [21] GASCARD J.C. (1977) - Mouvements verticaux profonds en Méditerranée Nord-occidentale en hiver (milieu peu stratifié). *Ann. Hydrogr.*, 5^e sér., vol. 5, fasc. 1, 746, 177-181, 5 fig.
- [22] GASCARD J.C. - Technique de mesure de la composante verticale des mouvements marins. *Id. Ibid.*, 183-188, 6 fig.
- [23] GASCARD J.C. (1978) - Deep water formation in the North-western Mediterranean Sea. Baroclinic instability and ocean eddies. *Oceanol. Acta*, I, 3, 315-330, 17 fig.
- [24] GONELLA J. (1976) - Mooring effects on current-meter intercomparisons. *Polymode News*, 15, p. 3.
- [25] GONELLA J., LAMY A., MILLOT C. (1977) - Upwelling d'été sur la côte méditerranéenne française. *Ann. Hydrogr.*, 5^e sér., vol. 5, fasc. 1, 746, 87-94, 15 fig.
- [26] HISARD P., CITEAU J. et MORLIERE A. (1975) - Le courant de Lomonosov et la formation de la zone frontale du Cap Lopez. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, XI, 4, 455-464.
- [27] HISARD P., CITEAU J. et MORLIERE A. (1976) - Le système des contre-courants équatoriaux subsuperficiels ; permanence et extension de la branche sud dans l'Océan Atlantique. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, XIV, 3, 209-220.
- [28] HISARD P. et MERLE J. (1978) - Onset of summer surface cooling in the Gulf of Guinea during GATE. Soumis à *Deep-Sea Res.*
- [29] JACQUES G., GAMBERONI L. (1978) - Au-delà des frontières : la campagne ANTIPROD I. *Courrier du CNRS*, 30-35, 28 av. 4 fig.
- [30] JEANNIN P.F., GONELLA J. (1978) - Un test en faveur du GEK pour la mesure du courant superficiel dans l'Océan. *Oceanol. Acta*, vol. 1, 4, 401-406, 6 fig.
- [31] KATZ E.J., BELEVITSCH R., BRUCE J., BUBNOV V., COCHRANE J., DUING W., HISARD P., LASS H.U., MEINCKE J., DE MESQUITA A., MILLER L. et RYBNIKOV A. (1977) - Zonal pressure gradient along the equatorial Atlantic. *J. Mar. Res.*, 35 (2), 293-307.
- [32] LACOMBE H. (1975) - Aperçu sur l'apport à l'océanographie physique des recherches récentes en Méditerranée. *Bull. Et. en Comm. Médit.*, n° spécial 7, 5-25.
- [33] LACOMBE H., GUIBOUT P. (1/5 mars 1976) - Indications sommaires sur les aires favorables à l'exploitation de l'énergie thermique des mers. *In Coll. Int. Electricité Solaire CNES-CNRS, 719-737*, Toulouse, 10 fig.
- [34] LACOMBE H., GASCARD J.C., GONELLA J. (1977) - L'effacement de la stratification de densité, en hiver, au large de la côte de France. *Ann. Hydrogr.* 5^e sér., vol. 5, fasc. 1, 746, 135-147, 8 fig.

- [35] LACOMBE H. (1977) - The mesoscale and local scale response of the Mediterranean to the transfer and exchange of energy across the sea surface. In : Physics of oceans and atmosphere, 10^e Course sept/déc. 1975, Trieste, Int. Centre for theoretical physics, 1, 1, 211-278.
- [36] LACOMBE H. (1978) - L'océanographe physicien et la mécanique des fluides. 3^e Congrès français de Mécanique, Grenoble 6-9 sept. 1977, Confer. Générale, 1-1 à 1-25 et *Rev. de l'Armement*, n° 91, 1-29 (sous presse), 11 fig.
- [37] LACOMBE H. et SAINT-GUILY B. (1977) - Les courants marins. In : Encyclopédie du Bureau des Longitudes, 1, "La Terre, les Océans, l'Atmosphère", 135-152, Paris Gauthier-Villars.
- [38] LAMY A. (février 1976) - Etude hydrologique et dynamique dans le canal de Provence-Corse en été. Thèse 3^e Cycle, Université Paris VI, Océanogr. Phys., 71 p., 29 fig.
- [39] LAMY A. (1977) - Observations d'ondes internes au passage d'un front hydrographique. *Ann. Hydrogr.*, 5^e sér., vol. 5, fasc. 1, 75-85, 15 fig.
- [40] LEMASSON L. (1975) - Note sur la circulation dans l'Atlantique tropical (long de 10°W) ; le contre-courant sud équatorial. *Cah. ORSTOM, sér. océanogr. Phys.*, vol. 13, n° 4, 339-343.
- [41] LE FLOCH' J. et MERLE J. (décembre 1975) - Les eaux intermédiaires antarctiques dans l'Atlantique intertropical. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr. Phys.*,
- [42] LE FLOCH' J. ET DENIAUD Y. (1977) - Mesures de courant au voisinage du fond de la Manche. Etude des gradients de vitesse. *Ann. Hydrogr.*, 5^e sér., vol. 5, fasc. 2, 5-9, 2 fig.
- [43] LE FLOCH. J. (1978) - Quelques aspects de l'océanographie physique du plateau continental armoricain. *J. de Rech. Océanogr.*, vol. 3, n° 2, 5-18.
- [44] LE TAREAU J.Y. (1977) - Contribution à l'étude de l'océanographie physique du proche Atlantique. Problèmes relatifs à l'extension de l'eau méditerranéenne. Thèse de 3^e cycle, Université de Bretagne occidentale, Brest.
- [45] LIE H.J. (1977) - Variation journalière du niveau marin dans le Golf de Gascogne. Etude des ondes de plateau continental. Thèse 3^e cycle Océanogr. Phys., Université Paris VI, 131 p., 36 fig.
- [46] MADELAIN F., BILLANT A. (1978) - Campagne Nimbus F, bouées dérivantes dans l'Atlantique Nord-Est. Publications du CNEXO. Résultats des Campagnes à la Mer, n° 15.
- [47] MADELAIN F., KERUT E.G. (1978) - Evidence of mesoscale eddies in the Northeast Atlantic from a drifting buoy experiment. *Oceanol. Acta*, vol. 1, n° 2, 159-168, 12 fig.
- [48] MAILLARD C., CAHEN-HERZ O., GENNESSEAUX J., GASCARD J.C. (1977) - Campagne MEDOC 1972, Publ. CNEXO, Rés. des Campagnes à la Mer, n° 12, 70 p., 44 fig.
- [49] MERLE J. et LE FLOCH. J. (1978) - Cycle annuel moyen de la température dans les couches supérieures de l'Océan Atlantique Intertropical. *Oceanol. Acta*, vol. 1, n° 3, 271-276.
- [50] MERLE J., FIEUX M. et HISARD P. (1978) - Annual signal and interannual anomalies of sea surface temperature in the eastern Equatorial Atlantic Ocean. Soumis à *Deep-Sea Res.*
- [51] MILLOT C. (1976) - Specific features of the sea-shore circulation near Cap Leucate. *Extr. Mem. Soc. Roy. Sci. Liège*, t. 10, 6^e sér., 1-9.
- [52] MILLOT C. (1977) - Etude de la dynamique du plateau continental du Golfe du Lion. *CIESM*, vol. 24, fasc. 2, 39-41.
- [53] MOORE D.W., HISARD P., Mc CREARY J., MERLE J., O'BRIEN J.J., PICAUT J., VERSTRAETE J.M. et WUNSCH C. (1978) - Equatorial adjustment in the eastern Atlantic. *Geophys. Res. Letters*, vol. 5, n° 8, 637-640.
- [54] PETIT M., KLAUS V., GELCI R., FUSEY F., THERY J.J., BOULY P. et GALLAGHER J.J. (1978) - Etude d'un tourbillon océanique d'échelle moyenne en Mer d'Alboran, par emploi conjoint de techniques spatiales et océanographiques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, vol. 287 B, 215-218, 4 fig.
- [55] PICAUT J. et VERSTRAETE J.M. (1976) - Mise en évidence d'une onde de 40-50 jours de période sur les côtes du Golfe de Guinée. *Cah. ORSTOM Sér. Océanogr.*, XIV, 1, 3-14.
- [56] PICAUT J. et VERSTRAETE J.M. (1978) - Propagation of a 14.7 day wave along the northern coast of the Gulf of Guinea. Soumis à *J. of Phys. Oceanogr.*
- [57] RAILLARD J. (1977) - Quelques aspects de la structure thermique sur le plateau continental breton (thermocline - front thermique). *Ann. Hydrogr.*, 5^e sér., vol. 5, fasc. 2, 11-30, 17 fig., 18 coupes.
- [58] SERVAIN J. (1976) - Etude statistique de l'ensemble des données hydrologiques recueillies depuis le début du siècle en Mer Celtique. Thèse de 3^e cycle, Université de Bretagne occidentale, Brest.
- [59] SERVAIN J. (1977) - Anomalies de température à caractère périodique en Mer Celtique. *J. Rech. Océanogr.*, vol. 11, n° 3, 21-29, 8 fig.
- [60] SOARES G.R. (1975) - Contribution à l'étude de l'hydrologie et de la circulation du Canal de Mozambique en hiver austral. Thèse 3^e cycle Océanogr., Phys., Université de Paris VI, 89 p., 51 fig.
- [61] TCHERNIA P. (juillet 1977) - Etude de la dérive antarctique Est-Ouest au moyen d'icebergs suivis par le satellite Eole. In : Polar Oceans Proc., Pol. Ocean. Conf. Montreal, Mc Gill Univ., 1974, Arct. Inst. North America, 107-120, 2 fig.

- [62] TCHERNIA P. (1978) – Descriptive regional oceanography. Pergamon Press, sous presse.
- [63] TCHERNIA P. (1978) – Océanographie régionale. ENSTA, 250 p., 119 fig., planches, (sous presse).
- [64] VERSTRAETE J.M., PICAUT J. et MORLIERE A. (1978) – Atmospheric and tidal forcing along the shelf of the Guinea Gulf. Soumis à *Deep-Sea Res.*
- [65] VITUREAU P., et WINTER S. (mars 1975) – Energie thermique des mers. In : Colloq. Int. "Electricité Solaire" CNES-CNRS, Toulouse, 697-718, 6 fig.
- [66] VOITURIEZ B. et CHUCHLA R. (1978) – Influence of the southern Atlantic central water on the distribution of salinity and oxygen in the Northeast tropical Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.*, 25 (1), 107-117.
- [67] WEISBERG R.H., HORGAN A. et COLIN C. (décembre 1978) – Equatorially trapped Rossby-gravity waves in the Gulf of Guinea. Contribution to the AGU Fall Meeting, San Francisco.

II – “TRANSFERTS ET TRANSFORMATIONS D’ENERGIE AU VOISINAGE DE L’INTERFACE AIR-MER”

Michel COANTIC

Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence, 13000 MARSEILLE

Les travaux effectués en France dans ce domaine de 1975 à 1978 ont principalement concerné : les apports et retraits de chaleur par le rayonnement, les échanges turbulents de chaleur et de masse, et les échanges d’énergie mécanique au voisinage de l’interface air-mer. Ils ont associé des équipes relevant du C.N.R.S. , de l’Université, du Muséum National d’Histoire Naturelle, du C.N.E.X.O. , de l’E.E.R.M. et du C.E.A. , et bénéficié du support de ces divers organismes.

I – APPORTS ET RETRAITS DE CHALEUR PAR LE RAYONNEMENT

Le rôle de la source d’énergie constituée par le rayonnement solaire, et du puits d’énergie associé aux rayonnements infrarouge, dans le bilan thermique des masses d’eau a été considéré à plusieurs échelles : l’échelle du bassin méditerranéen, par le L.O.P. de l’Université de Paris VI [5, 6, 7, 32] ; celle associée à la variabilité spatio-temporelle de la couche mélangée superficielle, par le L.O.P. de l’Université de Bretagne Occidentale [25] ; enfin celle d’un lac profond, par le L.A.M.P. de l’Université de Clermont II [1, 2, 9]. Ces travaux visent à la prévision et la paramétrisation des bilans globaux et des structures locales.

Le problème des interactions entre les échanges radiatifs et les transferts de chaleur turbulents et moléculaires a été étudié, sur le plan théorique, par l’I.M.S.T. [12, 13, 16], et sur le plan expérimental, par le L.O.A. de l’Université de Lille, qui a déterminé les caractéristiques du film superficiel froid en fonction du flux total de chaleur et de la vitesse du vent [21]. Enfin, une expérience “d’étang solaire” a été menée à bien par une équipe du C.N.E.X.O. [24].

II – ECHANGES TURBULENTS DE CHALEUR ET DE MASSE

II.1 – Mécanismes de l’évaporation

Il a fait l’objet de diverses études à l’I.M.S.T. L’influence de la stratification en densité sur les taux d’évaporation a été mise en évidence [41, 48] dans la grande soufflerie de simulation des interactions océans-atmosphère [17, 18, 20]. Une méthode originale “isotopique” de détermination des rôles respectifs de la turbulence et de la diffusion moléculaire dans l’évaporation a été mise au point en coopération avec le D.R.A. du C.E.A. [27], puis appliquée à l’étude de l’influence des vagues [26], abordée également par d’autres méthodes.

II.2 – Transferts turbulents de chaleur

Le rôle joué par la turbulence dans les échanges de chaleur, latente aussi bien que sensible, entre l’océan et l’atmosphère a été examiné à l’I.M.S.T. de divers points de vue : théorie

et modélisation [12, 13, 16] ; exploration des caractéristiques de la couche limite thermique et hygrométrique en état de stratification neutre, stable et instable [33, 41, 48] ; enfin, étude expérimentale de la microstructure thermique des couches limites atmosphériques naturelle et simulée [28, 29, 30] où une anisotropie locale du champ thermique a été mise en évidence.

Par ailleurs, les transferts de chaleur entre un plan d'eau et l'atmosphère ont été étudiés expérimentalement au L.A.M.P., par des méthodes directe (mesures de fluctuations) et indirecte (bilan thermique), en vue de la détermination du bilan global [1, 2, 9].

II.3 – Mécanismes des transferts chimiques à travers l'interface air-mer

Leur étude, théorique et expérimentale en laboratoire, a été entreprise en 1977 à l'I.M.S.T., en coopération avec diverses équipes extérieures. Des chercheurs du D.R.A. du C.E.A., et de l'University of East Anglia, ont effectué des expériences sur les transferts de type "gazeux", gouvernés par la structure du film hydrodynamique superficiel. Pour les transferts de type "particulaire" utilisant comme véhicule les embruns marins, les premières études ont concerné la physique et la métrologie des mécanismes diphasiques à l'interface air-eau (écume, bulles et gouttelettes), en s'appuyant sur une étude antérieure de la structure du ressaut hydraulique [38, 40, 42, 43].

III – ECHANGES D'ENERGIE MECANIQUE

III.1 – Structure moyenne et turbulente des basses couches de l'atmosphère marine

Le problème a été abordé de divers points de vue. Une étude dans la soufflerie de l'I.M.S.T. a mis en évidence certaines caractéristiques universelles de la microstructure, que l'on a pu comparer à des données acquises par l'U.C.S.D. [28, 29, 30]. Des mesures effectuées à partir de la bouée-laboratoire du C.N.E.X.O., BORHA II, dans le cadre de l'A.T.P. "Océanographie Physique", par les chercheurs du L.O.P.-M.N.H.N., ont permis la détermination du taux de frottement par les méthodes "du profil" et "inertio-dissipative" et ont conduit à introduire une hypothèse nouvelle pour la relation espace-temps applicable aux petites structures de la turbulence atmosphérique près de la surface marine [23, 44, 45, 46, 47]. De nouvelles méthodes d'analyse spectrale ont été mises en œuvre [22, 39]. Par ailleurs, le L.A.M.P. a étudié la relation entre le coefficient de frottement et le facteur de rafale au-dessus d'un plan d'eau [10] et, à une plus grande échelle, a effectué trois campagnes de mesures par avions instrumentés (Ile d'Yeu 75 et 76, et Thermocline 77), pour étudier la structure de la couche limite planétaire maritime (voir aussi le rapport de la Section de Météorologie et Physique de l'Atmosphère).

III.2 – Mécanismes de la génération des vagues par le vent

Ils ont été explorés par l'I.M.S.T., en soufflerie d'une part (en coopération avec le Department of Meteorology du M.I.T.), et en mer d'autre part (en coopération avec le L.O.P.-M.N.H.N.). Les résultats les plus importants concernent la structure statistique des vagues de vent, dont on a montré qu'elles possèdent une relation de dispersion les assimilant à des groupes d'ondes de Stokes [31, 34, 35, 36]. On a également étudié le couplage entre les écoulements d'eau et d'air, dont le caractère non-linéaire a été mis en évidence [3, 4, 8, 15, 19, 37], et la génération des premières ondes de capillarité-gravité [11, 37].

De son côté, le Centre de Météorologie Maritime de l'E.E.R.M. a poursuivi des travaux sur une méthode numérique lagrangienne applicable aux écoulements plans et irrotationnels avec surface libre [50].

III.3 – Echanges turbulents dans la couche mélangée océanique

Durant l'opération déjà citée au § III.1., les chercheurs du L.O.P.-M.N.H.N. et de l'I.M.S.T. ont pu observer, à partir de BORHA II, les détails des mécanismes turbulents d'approfondissement et d'entraînement de la couche mélangée océanique sous l'effet d'un coup de vent brutal [23, 45, 46]. Ces mécanismes font par ailleurs l'objet de travaux théoriques pour la modélisation des processus de transfert turbulent [49], et pour leur exploration à distance par voie acoustique [14].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ALBIGNAT J.P. (avril 1978) – Estimation du bilan thermique d'un lac profond à l'aide de données météorologiques de routine. Thèse de 3^e cycle, Université de Clermont II, n° 557.
- [2] ALBIGNAT J.P., BOUTIN C., ISAKA H. (1978) – Estimation du bilan thermique et de la température moyenne de la couche mélangée d'un lac profond à l'aide de données météorologiques de routine. Accepté à Archiv für Meteorologie.
- [3] BALDY S. (juin 1977) – Etude statistique de mécanismes de transfert dynamique à une interface air-eau. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université d'Aix-Marseille II.
- [4] BALDY S., RAMANONJIARISOA A., COANTIC M. (juillet 1978) – Description and performance of a "wave follower" system for energy exchange studies in the vicinity of an air-water interface. *Review of Scientific Instruments*, vol. 49, n° 7, p. 80-85.
- [5] BETHOUX J.P. (1977) – Contribution à l'étude thermique de la Méditerranée. Thèse d'Etat, Université Pierre et Marie Curie.
- [6] BETHOUX N., BETHOUX J.P. (1976) – Le cycle annuel du bilan thermique de la mer en divers points du bassin liguro-provençal. *Rapp. Comm. Inter. Mer Médit.* 23, p. 25-26.
- [7] BETHOUX J.P., IVANOFF A. (1976) – Le bilan thermique et hydrique de la Méditerranée. *Rapp. Comm. Inter. Mer Médit.* 23, 5, p. 27-28.
- [8] BONMARIN P. (mai 1978) – Visualisation d'un écoulement aérodynamique au voisinage d'une interface air-eau. Actes 6^e Colloque National de Cinématographie Rapide, Collection A.N.R.T., p. 41-44.
- [9] BOUTIN C., ALBIGNAT J.P., ISAKA H. (1978) – Validation par le bilan thermique des paramétrisations aérodynamiques globales des échanges de chaleur à l'interface eau-atmosphère. Accepté à Tellus.
- [10] BOUTIN C., BOULLERY B., ALBIGNAT J.P., ISAKA H. (1977) – Etude expérimentale d'une relation entre le coefficient de frottement et le facteur de rafales en régime de vent faible et au-dessus d'une surface d'eau. *Boundary Layer Meteorology*, 12, p. 391-403.
- [11] CHOI I. (juin 1977) – Contribution à l'étude des mécanismes physiques de la génération des ondes de capillarité-gravité à une interface air-eau. Thèse de Doctorat de Spécialité, Université d'Aix-Marseille II.
- [12] COANTIC M. (1976) – La turbulence dans la couche de surface atmosphérique. Partie VI, p. 300-362, in "La Turbulence en Mécaniques des Fluides" par A. FAVRE, L.S.G. KOVASZNYI, R. DUMAS, J. GAVIGLIO et M. COANTIC Gauthier Villars.
- [13] COANTIC M. (mai 1978) – An introduction to turbulence in Geophysics and air-sea interactions. *AGARDograph* n° 232.
- [14] COANTIC M. (1978) – Sur la possibilité d'une exploration à distance de la structure interne de l'océan par des méthodes de sondage acoustique. *Revue du C.E.T.H.E.D.E.C.* n° 56, p. 107-114.
- [15] COANTIC M. (août 1978) – Coupled energy transfer and transformation mechanisms across the ocean-atmosphere interface. *Sixth Inter. Heat Transfer Conference*, Toronto, vol. 6, p. 76-126 et vol. 7, p. 61-76.
- [16] COANTIC M. (octobre 1978) – Bilan thermique du système terre (continents et océans) – atmosphère. Cycle de Conférences C.E.A./E.D.F. "Mécanique de l'atmosphère et énergétique industrielle", Jouy-en-Josas.
- [17] COANTIC M., BONMARIN P. (janvier 1975) – La soufflerie de simulation des interactions océans-atmosphère de l'Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence. *Met-Mar*, bull. n° 90, p. 6-11.
- [18] COANTIC M., BONMARIN P. (octobre 1975) – The air-sea interaction simulation facility at the Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence. *Atmospheric Technology* n° 7, p. 72-79.
- [19] COANTIC M., RAMANONJIARISOA A. (mars 1978) – Générateur de houle. *Le Marché de l'Innovation*, n° 29.
- [20] COANTIC M., BONMARIN P., FAVRE A. (mars 1976) – La simulation en soufflerie des échanges air-mer à petite échelle et ses applications. *Compte Rendu VII^e Colloque A.S.T.E.O.*, Thème I, p. 91-106.
- [21] DESCHAMPS P.Y. (1977) – Télédéttection de la température de surface de la mer par radiométrie infrarouge. Thèse de Doctorat, Université de Lille I, n° 376.
- [22] DUPE M. (1978) – Application de méthodes d'analyse spectrale auto-régressive au traitement de quelques mesures de turbulence naturelle. Thèse de 3^e cycle, Paris.

- [23] GIOVANANGELI J.P., REVAULT D'ALLONNES M., RAMANONJIARISOA A. (septembre 1977) – Open sea simultaneous observations of air and water motions during active air-sea interactions. Proceed. NATO Symposium "Turbulent fluxes through the sea surface, wave dynamics and prediction", Bendor (à paraître chez Plenum Press).
- [24] HYACINTHE J.L. (septembre 1976) – Lagunes solaires à stratification de densité : éléments physiques, résultats antérieurs et projet d'expérimentation. Rencontre internationale de la COMPLES.
- [25] MARIETTE V. (1977) – Contribution à l'étude des échanges océan-atmosphère et à l'élaboration d'un modèle de prévision à court terme de la structure thermique superficielle de la mer. Thèse 3^e cycle, Brest.
- [26] MERLIVAT L. (juin 1978) – The dependence of bulk evaporation coefficients on air-water interfacial conditions as determined by the isotopic method. *Jour. of Geoph. Res.*, vol. 83, n° C6.
- [27] MERLIVAT L., COANTIC M. (août 1975) – Study of mass transfer at air-water interface by an isotopic method. *Journal of Geoph. Res.*, vol. 8, n° 24, p. 3455-3464.
- [28] MESTAYER P. (janvier 1975) – Etude de certaines caractéristiques statistiques locales d'une couche limite turbulente à grand nombre de Reynolds. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université d'Aix-Marseille II.
- [29] MESTAYER P.G., CHAMPAGNE F.M., FRIEHE C.A., LA RUE J.C., GIBSON C.H. (septembre 1977) – Estimation of the fluxes over ocean by the co-variance and dispative methods. Proceed. NATO Symposium "Turbulent fluxes through the sea surface, wave dynamics and prediction" Bendor, (à paraître chez Plenum Press).
- [30] MESTAYER P., GIBSON C., COANTIC M., PATEL A. (septembre 1976) – Local anisotropy in heated and cooled turbulent boundary layers. *The Physics of Fluids*, vol. 19, n° 9, p. 1279-1287.
- [31] MOLLO-CHRISTENSEN E., RAMANONJIARISOA A. (août 1978) – Modeling the presence of wave groups in a random wave field. *Jour. of Geoph. Res.*, vol. 83, n° C8, p. 4117-4122.
- [32] MOREL A., PRIEUR L. (1977) – Irradiation globale en surface. Résultats de la campagne GUIDOM 1976. Publication du C.N.E.X.O., série : résultats des campagnes à la mer, fasc. 1, n° 13, p. 83-87.
- [33] PERI G. (février 1975) – Application de méthodes hygrométriques à l'étude du mécanisme de l'évaporation lors de la simulation des échanges océans-atmosphère. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université d'Aix-Marseille II.
- [34] RAMAMONJIARISOA A. (janvier 1975) – Note sur la prévision par des méthodes semi-empiriques des spectres d'énergie de vagues de vent. *Annales Hydrographiques*, 5^e sér., vol. 4, fasc. 1.
- [35] RAMAMONJIARISOA A., COANTIC M. (février 1976) – Loi expérimentale de dispersion des vagues de vent à faible fetch. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 282, série B, p. 111-114.
- [36] RAMAMONJIARISOA A., GIOVANANGELI J.P. (avril 1978) – Observations de la vitesse de propagation des vagues engendrées par le vent au large. *C.R. Acad. Sci. Paris*, série B, t. 287, p. 1333-1336.
- [37] RAMAMONJIARISOA A., BALDY S., CHOI I. (septembre 1977) – Laboratory studies on wind-waves generation. amplification and evolution. Proceed. NATO Symposium "Turbulent fluxes through the sea surface, wave dynamics and prediction", Bendor, (à paraître chez Plenum Press).
- [38] RESCH F. (septembre 1978) – Measurement techniques in the two phase flow region of the air-sea interface layer. Dynamics Flow Conference, Marseille, 11-14.
- [39] RESCH F.J., ABEL R. (octobre 1975) – Spectral analysis using Fourier Transform Techniques. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*, vol. 9, n° 4, pp. 869-902.
- [40] RESCH F.J., LEUTHEUSER H.J. (1975) – Phase separation in turbulent two-phase flow. Proceedings of the Third Symposium of Turbulence in Liquids. Edited by G.K. PATTERSON and J.L. ZAKEN, p. 243-249.
- [41] RESCH F.J., SELVA J.P. (septembre 1977) – Experimental study of momentum transfers, heat and vapor fluxes, under different stability conditions. Proceed. NATO Symposium "Turbulent fluxes through the sea surface, wave dynamics and prediction", Bendor, (à paraître chez Plenum Press).
- [42] RESCH F.J., LEUTHEUSER H.J., COANTIC M. (1976) – Etude de la structure cinématique et dynamique du ressaut hydraulique. *Journal of Hydraulics Research*, 14, n° 4, p. 293-319.
- [43] RESCH F.J., LEUTHEUSER H.J., WARD C.A. (avril 1976) – Entraînement d'air et ré-aération en écoulement hydraulique, in "Écoulements diphasiques et cavitation dans les systèmes de production d'énergie", p. 347-357. Comptes-Rendus Symposium A.I.R.H.
- [44] REVAULT D'ALLONNES M. (février 1974) – L'ergodicité et le problème de la moyenne en Océanographie. Compte-rendu VI^e Colloque A.S.T.E.O. Paris.
- [45] REVAULT D'ALLONNES M. (1976) – Quelques éléments sur la turbulence en mer. Communication XIV^e Journées de l'Hydraulique, Société Hydrotechnique de France. Paris.
- [46] REVAULT D'ALLONNES M. (1978) – Contribution à l'étude de la micro-turbulence naturelle au voisinage de l'interface air-mer. Thèse de Doctorat d'Etat, Paris.
- [47] RUIMY D. (1977) – Etude en similitude de la déformation du profil moyen de vent au voisinage de la Bouée-Laboratoire BORHA II. Thèse de Docteur-Ingénieur. Paris.
- [48] SELVA J.P. (juin 1978) – Etude de l'influence de la stratification sur l'évaporation. Thèse de Doctorat de Spécialité, Université d'Aix-Marseille II.

VII-16

- [49] SIESS J. (février 1975) – Etude d'après la méthode de J. LUMLEY de la pénétration de la turbulence dans un milieu stratifié. Thèse de Docteur-Ingénieur, Université d'Aix-Marseille II.
- [50] VAUTRAVERS J., GELCI R., DANIAULT N., GIVRY J. (juin 1978) – La méthode S.T.L *Note technique n° 412, E.E.R.M.*

III – LA HOULE

Alain CAVANIE

Centre Océanologique de Bretagne, 29000 BREST

En France, de nombreux organismes et laboratoires s'intéressent à la mesure et à l'analyse des données d'état de mer, à différents titres : il faut citer plus particulièrement les laboratoires du Ministère de l'Équipement, le Service des Phares et Balises, les Ports Autonomes, le Laboratoire Central d'Hydraulique, les organismes pétroliers, la Météorologie Nationale et le CNEXO. Un rôle d'incitation actif est joué dans ce domaine par l'Association de Recherche Action des Éléments, au sein de laquelle plusieurs de ces organismes ont regroupé leurs efforts pour entreprendre des études sur la climatologie des états de mer.

Des mesures de vagues de longue durée, en plusieurs points des côtes françaises, ont été entreprises par ces organismes [9, 12, 13] ; ceci représente un travail patient de longue haleine qui se poursuivra dans les années à venir. Le coût des campagnes de mesures en haute mer a souvent conduit les organismes pétroliers à regrouper leurs efforts dans des campagnes de mesures internationales, en ce qui concerne les eaux étrangères. Pour préparer l'arrivée des données venant des satellites océanographiques à venir, une expérience de vérité mer pour SEASAT 1 est en cours de réalisation au CNEXO [8] avec l'aide du CNES et dans le cadre international du SURGE (Seasat Users Research Group of Europe) ; cette expérience a pour but d'étalonner les capteurs du satellite et d'évaluer la contribution de ces données à la climatologie des états de mer.

L'analyse de ces différentes données a engendré un intérêt accru dans trois domaines :

- 1) l'emploi de méthodes statistiques pour trier les données ;
- 2) l'application et l'extension du cadre théorique offert par la théorie du bruit de fond pour caractériser les états de mer ;
- 3) l'emploi des concepts météorologiques et climatologiques pour reclasser l'ensemble des données d'un site de façon rationnelle.

Les travaux dans le premier domaine ont surtout porté sur les relations statistiques entre différents paramètres moyens mesurés (\bar{H} , \bar{T} , $H_{1/3}$, $TH_{1/3}$, ϵ , etc. . .) [6] et sur l'analyse des données au voisinage de la zone de déferlement, où la théorie du bruit de fond gaussien n'est pas appropriée [1, 7]. La notion de cycle d'état de mer, développée par les ingénieurs du Service des Phares et Balises, bien qu'elle implique dans son interprétation des notions météorologiques, doit y être rattachée ; brièvement résumé, le cycle d'état de mer est un segment de la trajectoire dans un plan ($H_{1/3}$, $TH_{1/3}$) des états de mer d'un site, en fonction du temps. L'emploi approprié de cette notion permet de séparer cycles de tempêtes de cycles de houle.

La description d'un état de mer donné peut se faire à partir d'une analyse spectrale ou vague par vague et les travaux sur la théorie du bruit de fond gaussien établissent des liens entre ces deux méthodes. Ces travaux théoriques ont conduit, pour des états de mer de tempête, à une densité de probabilité composée pour les hauteurs et les périodes des vagues individuelles [2, 3], dont la comparaison avec des données à Biarritz démontre la possibilité

d'extension à des états de mer moins sévères [10]. Par ailleurs, ils ont permis la description des relations entres hauteurs de vagues de tempêtes successives [4].

Un groupe de travail de l'A.R.A.E. effectue depuis deux ans l'analyse climatologique des données d'un site en Mer du Nord, employant l'ensemble des méthodes décrites ci-dessus. Si la somme de ces travaux ne sera publiée qu'en 1979, il faut déjà signaler la mise en évidence d'une relation étroite entre hauteur et période des vagues extrêmes au cours des tempêtes, phénomène observé dans la nature et prédit par la théorie [5].

REFERENCES

- [1] ARHAN M. et EZRATY R. (1975) – Saisie et analyse de données des courants particulières et pression au voisinage du fond dans la houle littorale proche du déferlement. *La Houille Blanche* n° 718.
- [2] ARHAN M., CAVANIE A. et EZRATY R. (1976) – Etude théorique et expérimentale de la relation hauteur-période des vagues de tempête. *IFP* 24191.
- [3] ARHAN M., CAVANIE A. et EZRATY R. (1976) – Relation statistique entre hauteur et période des vagues de tempête. *C.R. Acad. Sc., Paris, t. 283, série B.* 189.
- [4] ARHAN M. and EZRATY R. (1978) – Statistical relations between successive wave heights. *Oceanologica Acta*, vol. 1, n° 2.
- [5] ARHAN M., CAVANIE A. et EZRATY R. (1978) – Estimation de la gamme de périodes associées à la vague de projet. *Rapport ARAE/IFP*.
- [6] CADENAT et SCHMIED L. (1977) – Houle et typologie. *Revue Tech. S.P.B.* * Supplément sept. 1977.
- [7] CAVANIE A. et EZRATY R. (1976) – Etude statistique de la houle littorale proche du déferlement. *Annales Hydro.*, 5^e série, vol. 4, Fasc. 1.
- [8] CAVANIE A. (1978) – Evaluation et utilisation des données d'état de mer de SEASAT A. CNEXO Actes et Colloques, p. 287-294.
- [9] C.E.A. – Etude de l'action de la houle sur les transports sédimentaires. Expérience réalisée à Sète en 1976/1977 - SARR/SAPRA/78/8/C253/AC.
- [10] EZRATY R., LAURENT M. and ARHAN M. (août 1978) – Comparison with observations at sea of period or height dependent sea state parameters from a theoretical model. *Society of Petroleum Engineers Journal* vol. 18, n° 4.
- [11] HAIMAN G. (octobre 1977) – Valeurs extrêmes de la houle. *Revue Tech. du S.P.B.*
- [12] S.P.B.*, L.N.H.** – Analyse statistique de mesures de houle en différents sites du littoral. Edition n° 3.
- [13] S.P.B.* – Mesures de houle. Analyse vague par vague. Histogrammes. Juin 1972 à décembre 1977.

*S.P.B. : Service Phares et Balises.

**L.N.H. : Laboratoire National d'Hydraulique.

IV — ONDES INTERNES ET MAREES

Michel CREPON

Muséum National d'Histoire Naturelle, 75005 PARIS

1 — ONDES INTERNES

Le laboratoire d'Océanographie Physique de l'Université de Bretagne Occidentale a observé dans le Golfe de Gascogne des ondes internes, qui ont des périodes comprises entre 35 et 50 mètres, nettement supérieures à la période Brunt VÄISÄLÄ [16, 17].

L'Institut de Mécanique de Grenoble (IMG) a développé une modélisation physique de la génération des ondes internes par le vent. Sur le canal (8,0 × 2,0 × 0,6 m) équipé d'une soufflerie, et implanté sur la plaque tournante, on a étudié la génération des ondes internes par un coup de vent brusque, tout en restant maître des principaux paramètres — vitesse du vent, épaisseur et densité des couches d'eau, profondeur totale, vitesse de rotation de la plaque tournante (entre 35 et 150 s) —. Ces diverses séries d'essais ont permis de mettre en évidence expérimentalement une onde interne de période inférieure à la période d'inertie, et liée au caractère impulsif du vent. Ce résultat a été acquis grâce à une méthode particulière permettant l'analyse spectrale des enregistrements des surélévations de l'interface en dépit de la variation du niveau moyen de celles-ci. La période trouvée expérimentalement est comprise entre la période d'inertie et la période déterminée à partir d'une théorie approchée du phénomène. Ces essais ont, en outre, permis de préciser les déformations de l'interface en différents instants après le début du coup de vent [2, 3, 4, 18].

L'utilisation de l'installation a été reprise par M. MOLINES qui entreprend l'étude des fortes non linéarités. Il se limite aux non linéarités dynamiques en milieu non tournant, laissant pour plus tard la prise en compte de la rotation, celle du frottement à l'interface et du déferlement. Il s'appuie sur une extension faite par HELAL aux ondes internes de la théorie de J.P. GERMAIN des ondes en eau peu profonde. L'interprétation est bonne lorsque le profil de l'onde ne présente qu'une intumescence. Dès que l'une des couches est peu épaisse, il se produit plusieurs intumescences se propageant comme des solitons dont le calcul est à faire [5, 9, 6, 20].

2 — MAREES

Etude théorique sur les modèles de marées

La détermination des conditions aux limites d'un modèle numérique par la méthode des surfaces caractéristiques a été améliorée par MM. KRAVTCHENKO et BIOLLAY. D'autre part, une solution analytique de l'écoulement des marées (au voisinage d'un cap) a été obtenue par B. BERTRAND et comparée avec succès à des mesures faites sur le modèle réduit.

Etude sur modèle physique des marées dans la Manche

L'étude systématique des composantes significatives (amplitudes 3 cm) linéaires et non linéaires des marées dans la Manche a été terminée. Les résultats montrent un progrès très net

dans la connaissance des dénivellations dans tous les domaines et servent d'ores et déjà à la conception et au tarage de nombreux modèles numériques et aux réductions de sondage. La mesure des champs de courant à l'aide d'un "vélocimètre" à laser a été entreprise en 1978 [7, 1].

3 - MODELISATION NUMERIQUE DES MAREES

Mise au point de la méthode spectrale pour l'étude des marées

Elle repose sur :

- la décomposition spectrale des solutions ;
- le traitement des non linéarités du phénomène par une méthode de perturbations.

Elle permet de traiter séparément les différentes composantes du spectre de la marée dans une zone littorale donnée. Une application de cette méthode a été réalisée pour l'étude d'une onde longue se propageant dans un canal fermé, à fond horizontal et rugueux [10, 11, 12].

Utilisation des techniques aux éléments finis pour la modélisation spectrale des marées sur des domaines réels

L'application de la méthode définie ci-dessus conduit à la transformation d'un problème hyperbolique de propagation, dans l'espace (x, y, t) , en un ensemble de problèmes elliptiques à deux variables seulement (x, y) pour lesquels il est possible d'établir une formulation variationnelle : les méthodes aux éléments finis s'imposent donc pour intégrer numériquement ces problèmes sur des domaines réels. Une application est en cours pour la Manche ; des résultats satisfaisants ont été obtenus pour l'onde fondamentale M_2 [13, 14, 15].

Intercomparaison d'algorithmes pour la représentation des effets non linéaires dans les modèles numériques classiques aux éléments finis

Une étude critique de 4 algorithmes (caractéristiques, diffusif, Lax-Wendroff, implicite) a permis de caractériser le degré de précision qu'il est possible d'obtenir par ces méthodes pour la modélisation de la propagation des ondes longues et des effets non linéaires correspondants (déformation de la surface libre, courants moyens, niveaux moyens) (M. SAENZ, Thèse de Docteur-Ingénieur, Mars 1978).

Trois modèles numériques aux différences finies ont été élaborés pour modéliser les marées dans la Manche (modèle de 1er ordre portant sur les vitesses moyennes sur chaque verticale, modèle de 1er ordre en débit, modèle de 2ème ordre en débit) afin d'étudier l'aptitude de ces différents modèles à représenter les phénomènes non linéaires accompagnant la propagation des marées dans les zones littorales : génération d'harmoniques, abaissement des niveaux moyens, circulations résiduelles [19, 8].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BERTRAND B. et LE PROVOST C. (1977) - Rôle du frottement dans la génération des courants moyens dans les mers à marée littorale. *Annales Hydrographiques*, 5e série, vol. 5, fasc. 1, n° 746, p. 57-63.
- [2] CHABERT D'HIERES G. et RENOARD D. (1976) - "Canal équipé d'une soufflerie et d'un moyen mécanique de simulation du vent sur la plaque tournante de Grenoble" *La Houille Blanche*, n° 1/1976, 45,51.
- [3] CHABERT D'HIERES G. et RENOARD D. (1976) - Ondes internes engendrées par le vent dans un canal parallélépipédique en milieu tournant. *J. Rech. Océanogr.*, 1, 2, 1-16.

- [4] CHABERT D'HIERES G. et RENOARD D. (à paraître 1979) – "Etude expérimentale des ondes internes engendrées par le vent". *Oceanologica Acta*.
- [5] CHABERT D'HIERES G. et SUBERVILLE J.L. (1976) – "A theoretical and experimental study of internal waves in a rotating stratified medium". Actes du XI^{ème} Congrès I.U.T.A.M., Delft, 2^{ème} volume.
- [6] CHABERT D'HIERES G. et SUBERVILLE J.L. (1977) – "Etude expérimentale des ondes à l'interface d'une bicouche dans un canal parallélépipédique tournant". *Annales Hydrographiques*, 5^{ème} série, vol. 5, fasc. 1, n^o 746, p. 117-126.
- [7] CHABERT D'HIERES G. et LE PROVOST C. – Atlas des principales composantes de la marée dans la Manche. *Annales Hydrographiques*. (à paraître 2^e semestre 1978).
- [8] KABBAJ A. (1978) – Contribution à l'étude analytique de la propagation des ondes longues dans un canal à fond rugueux. Thèse de 3^e cycle, Université Scientifique et Médicale de Grenoble,
- [9] KRAVTCHEKNO J. et SUBERVILLE J.L. (1977) – Etude théorique des ondes internes dans les eaux d'un bassin en rotation. *Annales Hydrographiques*, 5^{ème} série, vol. 5, fasc. 1, n^o 746, p. 95-115.
- [10] KRAVTCHEKNO J. et LE PROVOST C. (1977) – Sur la théorie spectrale des marées littorales. *Annales Hydrographiques*, 5^{ème} série, vol. 5, fasc. 1, n^o 746, p. 47-55.
- [11] LE PROVOST C. (1976) – Theoretical analysis of the structure of tidal wave's spectrum in shallow water areas. *Mémoires, Société Royale des Sciences de Liège*, 6^{ème} série, tome X, p. 97-111.
- [12] LE PROVOST C. (1976) – Etude des marées dans les mers littorales. *Annales Hydrographiques*, 5^{ème} série, vol. 4, fasc. 1, p. 7-31.
- [13] LE PROVOST C. et PONCET A. (1977) – Sur une nouvelle méthode numérique pour calculer les marées océaniques et littorales. *C.R.A.S.*, t. 285, série B, p. 349-352.
- [14] LE PROVOST C. et PONCET A. (1977) – "Une nouvelle approche pour la modélisation spectrale par éléments finis des marées littorales". Actes du 3^e Colloque International sur les méthodes de calcul scientifique et technique, Versailles, Déc. 1977, Edition Springer-Verlag.
- [15] LE PROVOST C. et PONCET A. (1978) – Finite element method for spectral modelling of tides. *International Journal for numerical methods in Engineering*, vol. 12, p. 853-871.
- [16] MAZE R. (1975) – Application de résultats de mesures de courant à l'étude des ondes internes. *Annales Hydrographiques*, 5^{ème} série, vol. 3, fasc. 1, p. 7-16.
- [17] MAZE R. (1976) – Confrontations de quelques résultats expérimentaux avec la théorie des ondes internes dans la mer et dans l'atmosphère. *Annales Hydrographiques* 4, fasc. 2, n^o 744, 5^{ème} série, p. 43-52.
- [18] RENOARD D. (1976) – Ondes internes engendrées par le vent. Etude bibliographique et analytique. Construction d'une installation expérimentale. Thèse de Docteur-Ingénieur présentée à l'U.S.M.G.
- [19] SAENZ M. (1978) – "Simulation de la propagation des ondes longues. Etude de quelques schémas aux différences finies". Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Scientifique et Médicale de Grenoble.
- [20] SUBERVILLE J.L. – "Ondes internes en fluide tournant. Contribution théorique et expérimentale". Thèse de Docteur-Ingénieur présentée à l'U.S.M.G.

V – ETUDES THEORIQUES SUR LA DYNAMIQUE DES MERS

Bernard SAINT-GUILY

Muséum National d'Histoire Naturelle, 75005 PARIS

Laboratoire Arago, 66550 BANYULS SUR MER

Les études théoriques consacrées à la dynamique des mers ont porté sur des sujets variés qui peuvent se grouper suivant l'échelle : réponse de la mer aux actions météorologiques, propriétés spécifiques des ondes de basses fréquences et diffractions des ondes longues pour le domaine des échelles moyennes, comportement de la houle par faible profondeur pour le domaine des petites échelles.

L'analyse de la réponse transitoire du niveau moyen aux variations de pression atmosphérique a montré qu'en raison d'un ajustement de nature géostrophique, ce niveau peut s'écarter notablement du niveau statique. La différence est d'autant plus importante que la dimension de la perturbation est grande devant le rayon de déformation. L'action transitoire d'un champ de vent mobile sur un océan formé de deux couches d'eau superposées a été discutée en détail à l'aide de la transformation de Laplace. Le champ de vent produit un sillage lorsque sa vitesse de propagation est supérieure à la célérité des ondes internes. L'amplitude du sillage dépend à la fois de la vitesse de propagation, de la durée et de la dimension du champ de vent comparée à celle du rayon interne de déformation.

Les variations des courants marins sont liées en particulier à la présence d'ondes de seconde classe. Aussi plusieurs travaux ont porté sur l'analyse des mouvements périodiques dans le domaine des basses fréquences et des échelles moyennes. Les caractéristiques des ondes de cette espèce et leur propagation le long d'un talus continental ont été examinées. Le rôle de guide d'onde joué par les rotationnels de courant moyen a été confirmé à l'aide d'une solution non linéaire représentant un courant périodique bidimensionnel. Par ailleurs un modèle non linéaire d'exsurgence (upwelling), venant à l'appui de la nature inertielle des courants marins a été étudié.

Plusieurs travaux ont porté sur les conditions de propagation et la diffraction des ondes internes en milieu tournant, en présence d'obstacles : dièdre convexe, dièdre concave et barrière semi-infinie.

Les recherches sur la théorie des ondes de gravité ont eu pour thème la houle en eau peu profonde. Parmi les questions traitées il faut citer ; le passage d'une onde solitaire au-dessus d'une barrière immergée, la réflexion des ondes sur une plage, les interactions non linéaires en eau peu profonde, et l'approximation donnée par l'équation de Korteweg de Vries. Il faut également mentionner la diffraction d'une onde solitaire tridimensionnelle par une île circulaire et par un cap.

BIBLIOGRAPHIE

BEGIS D., CREPON M., MILLOT C. (1977) – Un problème d'environnement : modélisation de la dynamique océanique du plateau continental. *Rapp. Rech. I.R.I.A.* n° 236, 29 p.

BEGIS D., CREPON M. (1977) – Modélisation de la dynamique de la couche de surface de l'océan : justification et applications numériques. *Annales Hydrogr.* 5^e sér. 5 (1) : 207-214.

- CREPON M. (1975) – Sea level, bottom pressure and geostrophic adjustment. Woods Hole Oceanographic Institution, contr. n° 3208, p. 25
- CREPON M. (1977) – Niveau moyen, pression atmosphérique et ajustement géostrophique. *Annls hydrogr.*, 5^e sér., 5 (1) : 65-74.
- GERMAIN J.P., GULLI L. (1977) – Passage d'une onde sur une barrière verticale mince immergée en eau peu profonde. *Annls hydrogr.*, 5^e sér., 5 (1) : 7-11.
- GERMAIN J.P. (1978) – Etudes théoriques du passage des ondes en eau peu profonde sur les obstacles immergés. Revue "Océanologie" de l'Académie Polonaise des Sciences (sous presse).
- GULLI L. (1975) – Etude du passage d'une houle en eau peu profonde sur une barrière verticale immergée. Thèse de spécialité de l'Université de Grenoble.
- HUA L., CREPON M. (1977) – Réponse linéaire d'un océan bi-couche à une perturbation météorologique mobile. *Annls hydrogr.*, 5^e sér., 5 (1) : 135-147.
- ROSEAU M. (1977) – Ondes internes évanescentes à l'infini dans un fluide pesant limité par un dièdre convexe. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 284 : 517-520.
- ROSEAU M. (1977) – Sur certaines solutions des problèmes des ondes internes de seconde classe et la représentation des ondes de bord. *C.R. Acad. Sc. Paris* 284 : 567-570.
- ROSEAU M. (1977) – Ondes internes de première classe et condition de radiation de Sommerfeld ; résultat de non-unicité. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 284 : 629-632.
- ROSEAU M. (1977) – Diffraction d'ondes internes par une barrière semi-infinie, *C.R. Acad. Sc. Paris*, 284 : 711-714.
- SAINT-GUILY B. (1975) – Effets de la composante horizontale de la rotation terrestre sur les mouvements dans une mer homogène. *Annls Inst. Océanogr.*, 51 (2) : 135-142.
- SAINT-GUILY B. (1976) – Sur la propagation des ondes de seconde classe le long d'un talus continental. *C.R. Acad. Sc., Paris*, sér. B, 282 : 141-144.
- SAINT-GUILY B. (1977) – Perturbations mécaniques et thermiques dans une mer presque homogène. *Annls hydrogr.* 5^e sér., 5 (1) : 149-152.
- SAINT-GUILY B. (1977) – Sur les ondes non linéaires guidées par un front de courant marin. *Cr. Acad. Sc., Paris*, sér. B, 285 : 121-124.
- SAINT-GUILY B. (1978) – Propriétés caractéristiques des ondes planétaires dans l'océan (ondes de seconde classe). *Oceanologica Acta*, 1 (1) : 119-126.
- TEMPERVILLE A. (1977) – Interactions non linéaires dans la théorie de l'eau peu profonde. *Annls hydrogr.*, 5^e sér., 5 (1) : 13-16.

VI – OPTIQUE MARINE & TELEDETECTION

André MOREL

Laboratoire de Physique et Chimie Marines
06230 VILLEFRANCHE-SUR-MER

et

Jacqueline LENOBLE

Laboratoire d'Optique Atmosphérique
59000 LILLE

I – OPTIQUE MARINE

La constitution d'une collection importante de données relatives aux propriétés optiques des eaux et à la propagation du flux radiatif dans les océans avait débuté en 1970-71 lors des campagnes SCOR-UNESCO WG 15 et CINECA 2*. Pour être représentatives ces données doivent provenir de zones marines très diversifiées et cette préoccupation est à l'origine des mesures systématiques effectuées lors de diverses campagnes océanographiques : dans la région de l'upwelling de Mauritanie (campagne CINECA 5), du dôme de Guinée (GUIDOM), de l'Atlantique équatorial (CIPREA) et, également, dans les régions subantarctique et antarctique indiennes (ANTIPROD), pour citer les principales.

Ces mesures concernent l'évaluation des flux radiatifs descendants et ascendants à diverses profondeurs ; il s'agit, d'une part de déterminations globales pour l'ensemble du spectre "visible" (mesures en quanta pour la bande 400-700 nm) et, d'autre part, de l'analyse spectrale de rayonnements [48, 51, 52]. Ces mesures sont couplées à des levés de profils verticaux de température et du coefficient optique de diffusion (et/ou d'atténuation) [61, 64, 52]. Pour l'interprétation ultérieure, il est nécessaire d'exécuter des études complémentaires relatives à la teneur en pigments chlorophylliens, la concentration en seston [46] et en substances organiques dissoutes [49].

La constitution d'une telle banque de résultats est le préalable à l'établissement d'une classification optique des eaux qui ne soit pas purement phénoménologique mais au contraire raisonnée, c'est-à-dire où soient identifiées et quantifiées les causes des variations observables des propriétés optiques, entre autres, la nature du seston, l'activité biologique, les influences terrigènes, etc. . .

Ces interprétations s'appuient également sur des modèles théoriques [62] permettant, par simulation numérique des diffusions successives, d'évaluer les variations des coefficients K et R, d'atténuation et de réflexion diffuses depuis leurs valeurs en surface jusqu'aux valeurs limites, caractéristiques du régime asymptotique atteint à grande profondeur.

Diverses applications découlent des études d'optique proprement dites. L'étude des relations entre la production primaire océanique et l'apport énergétique sous forme radiative – indispensable à l'activité photosynthétique du phytoplancton – constitue un prolongement normal des mesures *in situ* du rayonnement [37]. En considérant successivement l'énergie disponible, celle qui peut être absorbée par les cellules et, enfin, celle qui est effectivement utilisée pour l'édification de molécules organiques (et qui se trouve donc "stockée" sous forme chimique), il est possible de définir et de calculer des rendements. Les variations de ceux-ci, en particulier du rendement quantique (nombre d'atomes de C transférés par quantum absorbé) à l'intérieur de la couche euphotique et dans diverses zones marines, ont pu être étudiées [53].

* Cooperative investigation of N.E. Central Atlantic.

Pour ces applications biologiques, la nécessité apparaît de connaissances précises sur le spectre d'absorption de l'ensemble des pigments du phytoplancton *in vivo* ; elle rejoint une autre préoccupation, celle d'interpréter la "couleur" de la mer et d'évaluer l'influence sur celle-ci de la biomasse végétale. A partir des mesures spectrales des flux ascendants et descendants, le facteur de réflexion diffuse pour la couche de surface peut être calculé [44]. Son spectre, très variable avec le contenu de la mer en substance dissoutes et particulaires, constitue une expansion physique de la couleur vraie de cette mer. Une analyse de ces variations pour diverses zones pélagiques, oligotrophes ou productives a été faite [45, 50] ; elle s'appuie sur un modèle théorique dont la validité a pu être vérifiée [60, 62] et constitue le préalable aux applications, telles que le levé continu à partir de navires de la biomasse ou la télédétection dans le visible [47].

II - TELEDETECTION

1 - Dans le domaine du rayonnement visible

D'un point de vue théorique, aussi bien en ce qui concerne le transfert radiatif dans l'air que dans l'eau, les études ont été largement avancées [72, 25, 65, 60, 62] pour permettre une modélisation des problèmes, modélisation d'une approximation très suffisante compte tenu de l'incertitude attachée à certains paramètres expérimentaux à introduire (teneur en aérosols, spectres de diffusion de ceux-ci, signatures spectrales spécifiques des diverses substances présentes dans la mer, . . .). A partir de ces modèles, des algorithmes ont été élaborés pour traiter de diverses manières les albédos de la mer mesurés à différentes longueurs d'onde et les interpréter en termes de concentration en chlorophylle et en sédiments [15, 21, 22, 72, 74, 47]. Un radiomètre aéroporté (longueurs d'onde : 460, 520, 550, 600 nm) a été mis au point et employé avec succès au cours de plusieurs campagnes (Cap Lopez, Golfe de Guinée, Mer du Nord) [73, 22, 23], mettant ainsi en évidence les variations spatio-temporelles des albédos dans le bleu et le vert liées à l'activité et la productivité d'un upwelling côtier (Cap Lopez) [73].

A partir d'avion, déjà, mais encore plus à partir de l'espace, la détermination de la "couleur" réelle de l'océan pose le problème d'estimer et d'éliminer l'effet - dominant en fait - de l'atmosphère sur le signal reçu. Cet effet, que des mesures spectroradiométriques exécutées depuis diverses altitudes permettent d'étudier [47], doit être prévu et calculé *a priori* lorsqu'il s'agit de corriger des signaux comme ceux par exemple délivrés par le capteur CZCS (de Nimbus 7). Moyennant certaines hypothèses sur la quantité et le comportement optique des aérosols, des algorithmes de correction ont pu être élaborés [25, 65].

Une information spectrale aussi complète et aussi bien corrigée n'est pas indispensable lorsqu'il ne s'agit que de la télédétection des zones turbides. Aussi, ce type d'étude est-il largement développé. Grâce à la mise au point de classification automatique et d'algorithmes de traitement, l'imagerie LANDSAT a pu être systématiquement utilisée pour la description des régions côtières et pour la cartographie des zones estuariennes, où la charge en sédiments est importante [1, 34, 35, 38, 41, 42, 43, 55, 57, 58, 59, 66, 70, 71, 68].

2) Dans le domaine infra-rouge et dans celui des micro-ondes.

La thermographie de la surface de la mer est une technique plus ancienne que la télédétection dans le visible, au moins pour les applications océanographiques ; les mesures obtenues à partir des satellites NOAA (expérience VHRR) ou celles obtenues à partir d'avion, notamment avec le radiomètre ARIES [40], ont été abondamment exploitées.

Un système de traitement des signaux de VHRR a été rendu opérationnel et des cartographies thermiques sont maintenant systématiquement produites [2, 4, 3] et permettent l'étude et le suivi de phénomènes hydrologiques [69, 5] importants. L'imagerie visible et

infra-rouge fournie par le satellite géostationnaire METEOSAT a été aussi utilisée pour la détermination des gradients thermiques de surface (26). Le radiomètre ARIES s'est révélé être un excellent moyen pour étudier les régimes en zone côtière et les fronts thermiques [13, 14].

La nécessité en océanographie d'avoir, en plus des gradients thermiques, une valeur correcte de la température de surface implique une bonne connaissance des effets de l'émission du gaz atmosphérique. Des méthodes de correction mono-canal ou différentielles [8, 36] ont été testées sur les données du radiomètre ARIES. Ces corrections peuvent en principe être faites à partir de radiosondages proches de la zone étudiée ; en leur absence, une correction, statistiquement établie à partir d'un échantillon caractéristique de radiosondages (effectués au point K, pour la bande 10,5 - 12,5 μ , à partir du navire météorologique stationnaire), a été étudiée, ainsi également qu'une méthode utilisant plusieurs bandes spectrales dans l'infrarouge [18, 19, 20, 56, 24], qui pourra être aussi appliquée à l'expérience AVHRR (satellite Tiros N).

L'utilisation des micro-ondes a fait l'objet d'études mettant en œuvre, soit des radars décamétriques cohérents installés à terre [10, 9], soit des radars (centimétriques) latéraux aéroportés à antenne synthétique ou réelle [32, 33, 29]. Ces derniers, pour lesquels les rides capillaires sont les causes de la rétrodiffusion, permettent en particulier de détecter les nappes d'hydrocarbures sur la mer et, également, d'obtenir une image des vagues [29] ; les ondes décamétriques sont utilisées pour la télédétection de l'état de surface de la mer et peuvent conduire à une estimation du champ des vents sur la zone couverte [9].

Sous l'égide conjointe du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et du Centre National pour l'Exploitation des Océans (CNEXO), un colloque s'est tenu à Brest, au début de 1978, sur le thème de "l'utilisation des satellites pour l'océanographie". Les problèmes évoqués ci-dessus ont été abordés mais d'autres aspects et d'autres applications ont fait également l'objet de communications, concernant par exemple l'aide à la pêche [54], les mesures altimétriques [6, 39] ou le programme SEASAT [28, 11]. D'autre part, dans un Rapport National sur les travaux français, certaines questions touchant à la fois à la thermique et à l'optique se trouvent traitées dans le texte relatif aux transferts énergétiques à travers la surface marine ; d'autres études, plus spécifiquement liées à l'optique atmosphérique et au rayonnement, sont présentées dans le rapport de la Section Météorologie et Physique de l'Atmosphère.

- [1] ALBUISSON M., DAMBRICOURT J., MILLOU A., MONGET J.M., THOMAS Y., VERGER F. (1976) - Télédétection multispectrale du littoral de la baie du Mont Saint-Michel. Journées de télédétection du GDTA. Toulouse, tome II, 649-662.
- [2] ALBUISSON M., MONGET J.M. (1976) - Températures de surface de la mer d'après les données de NOAA 4. Photo-interprétation, Editions Technip, n° 5, fasc. 4 a à 4b, 25-31.
- [3] ALBUISSON M., MONGET J.M. (1978) - Méthodes et moyens utilisés pour la mise en forme de données de satellites de télédétection : application à la cartographie thermique. Colloque CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978), Utilisation pour l'océanologie des satellites d'observation de la Terre. Public. CNEXO, Actes de Colloques, 5, 181-202.
- [4] ALBUISSON M., MONGET J.M., POISSON M. (1977) - Investigation of coastal and marine environments using NOAA digital data. In : Monitoring environmental change by remote sensing. Edited by J.L. Ban Genderen and W.G. Collins. The Remote Sensing Society, 41-46.
- [5] ALBUISSON M., MONGET J.M., CREPON M., MILLOT C. (1977) - Observation of transient upwellings in the Mediterranean Sea with the NOAA VHRR imagery. Journées de Télédétection du GDTA, St-Mandé, 85-95.
- [6] BALMINO G. (1978) - Traitement des mesures altimétriques de GEOS 3. Calcul de géoïdes locaux. Apport à la connaissance globale du champ gravitationnel terrestre. Coll. CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978). Utilisation pour l'océanologie des satellites d'observation de la Terre. Public. CNEXO, Actes de Colloques, 5, 203-220.
- [7] BECKER F. - Température superficielle de la mer et la transmission atmosphérique par radiométrie différentielle. *Ibid.*, 141-160.
- [8] BECKER F., IMBAULT D., PONTIER L. (mars 1977) - Sea surface temperature and atmospheric transmission : measurements by differential radiometry. Proc. of the First General Assembly of EARSEL, Strasbourg, 93.

- [9] BROCHE P. (1978) – Télédétection de l'état de surface de la mer par radar décimétrique cohérent. Coll. CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978). Utilisation pour l'océanologie des satellites d'observation de la Terre. Public. CNEXO, Actes de Colloques, 5, 295-308.
- [10] BROCHE P., DEMAISTRE J.C., CROCHET M. (1978) – Off-shore wind measurements by H.F. Doppler ground wave radar. *Boundary Layer Meteorology*, 13, 55-60.
- [11] CAVANIE A. (1978) – Evaluation et utilisation des données d'état de mer de Seasat A, Proposition du CNEXO dans le cadre de SURGE. Coll. CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978), Utilisation pour l'océanologie des satellites d'observation de la Terre. Public. CNEXO, Actes de Colloques, 5, 287-294.
- [12] CAZAUX J.C. – Mise en forme et diffusion des données des satellites de télédétection. *Ibid.*, 161-180.
- [13] DECHAMBENOY C., PONTIER L., SIROU F., VOUVE J. (1977) – Apport de la thermographie infra-rouge aéroportée à la connaissance de la dynamique superficielle des estuaires. *C.R. Acad. Sci.*, 284, série D, 1269-1272.
- [14] DECHAMBENOY C., LE FLOCH' J., PONTIER L., RAILLARD J., SIROU F. (1977) – Quelques résultats de mesures par navire et avion de la structure thermique superficielle de la mer au large de la Bretagne. *Rev. Hydrogr., Intern.*, LIV, 2, 135-152.
- [15] DELACROIX F., THOMAS Y.F., ZBINDEN R. (1977) – Application de la télédétection à l'étude de la couleur des eaux de la mer. In : Colloque sur les méthodes mathématiques appliquées à la géographie, Besançon, 6-7 oct. 1977. Cahiers de Géographie de Besançon.
- [16] DELACROIX F., THOMAS Y.F., VERGER F. (1977) – Classification des paysages à partir des données multispectrales de télédétection. In : Le traitement automatisé de l'image (Documentation et Recherches), Interphotothèque, 33-34, 329-338.
- [17] DESCHAMPS P.Y. (1978) – Présentation de l'expérience HCMM. Coll. CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978), Utilisation pour l'océanologie des satellites d'observation de la Terre. Public. CNEXO, Actes de Colloques, 5, 339-342.
- [18] DESCHAMPS P.Y. (1977) – Télédétection de la température de la surface de la mer par radiométrie infra-rouge. Thèse Doct. Etat, Univ. Lille I, n° 376.
- [19] DESCHAMPS P.Y., LECOMTE P., VIOLLIER M. (1977) – Observation à partir de l'espace de l'environnement marin côtier. Proc. Journées de Télédétection du GDTA, 119-125.
- [20] DESCHAMPS P.Y., PHULPIN T. (1978) – Elimination de l'effet de l'atmosphère et optimisation des bandes spectrales d'un radiomètre infra-rouge à un ou deux canaux pour la mesure de la température de surface des sols. Conf. Earth observation from space and management of planetary resources, Toulouse 1978. Proc. ESA, SP-134, 81-88.
- [21] DESCHAMPS P.Y., LECOMTE P., VIOLLIER M. (1977) – Télédétection de la chlorophylle, une nouvelle approche expérimentale du problème. Proc. 4^e Symp. Canadien sur la Télédétection, 543-549.
- [22] DESCHAMPS P.Y., LECOMTE P., VIOLLIER M. (1977) – Remote sensing of ocean color and detection of chlorophyll content. Proc. 11th Int. Symp. on Remote sensing of environment, 1021-1033.
- [23] DESCHAMPS P.Y., LECOMTE P., VIOLLIER M. (1978) – Remote sensing of chlorophyll in equatorial regions. *Remote Sensing of Environment*, n° 7, 235-248.
- [24] DESCHAMPS P.Y., PHULPIN T. (1978) – Correction atmosphérique des données obtenues par télédétection dans l'infra-rouge. Coll. CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978), Utilisation pour l'océanologie des satellites d'observation de la Terre. Public. CNEXO, Actes de Colloques, 5, 123-132.
- [25] DESCHAMPS P.Y., TANRE D. – Corrections atmosphériques pour la télédétection de la couleur de l'océan. *Ibid.*, 133-140.
- [26] FAVARD J.C. – Détermination des isothermes de surface à partir de satellites météorologiques géostationnaires. *Ibid.*, 53-62.
- [27] FONTANEL A. (1976) – Quelques problèmes d'interprétation en télédétection. In : Archives internationales de photogrammétrie. Reports and invited papers, Commission VII, Vol. 21, Part 5, XIII^e Congrès de la Société Internationale de Photogrammétrie, Helsinki, 11-23 juillet 1976.
- [28] FONTANEL A. (1978) – Proposition d'étude faite par l'IFP pour la participation au programme SEASAT. Coll. CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978), Utilisation pour l'océanologie des satellites d'observation de la Terre. Public. CNEXO, Actes de Colloques, 5, 283-286.
- [29] FONTANEL A. – Expériences d'études de l'état de la mer par radar latéral. *Ibid.*, 309-326.
- [30] FONTANEL A., LALLEMAND C., LEGENDRE G., RIVEREAU J.C., THOMAS G. (1976) – Comparaison des images et des classifications multispectrales obtenues à partir des satellites Landsat, Skylab et du scanner aéroporté Daedalus. In : C.R. des Journées d'études du GDTA, Toulouse, 26-28 octobre 1976.
- [31] FONTANEL A., RIVEREAU J.C. (1976) – Exploitation des thermographies en géologie. In : C.R. des journées d'études du GDTA, Toulouse, 26-28 oct. 1976.
- [32] FONTANEL A., ROUSSEL A. – La détection des nappes d'hydrocarbures sur la mer. In : C.R. des journées d'études du GDTA, Toulouse, 26-28 oct. 1976.

- [33] FONTANEL A. (1977) – Détection d'une nappe d'hydrocarbures par radar latéral aéroporté à antenne synthétique et à antenne réelle. In : Techniques avancées au service de la prévention et de la lutte contre la pollution des mers. OCEANEXPO, Bordeaux, 7 oct. 1977.
- [34] FRALIT (Equipe) (1977) – Télédétection du littoral océanique de la France. Collection de l'Ecole Normale Supérieure de Jeunes Filles, Montrouge, 11, 312 p.
- [35] GUERIN O.M., PINOT J.P. (1977) – La diffusion des eaux de la Loire dans le Golfe de Gascogne et les risques de pollution littorale, d'après les satellites artificiels, *Rev. Intern. d'Océanogr. Médicale*, XLVII, 1, 69-72.
- [36] IMBAULT D., SCOTT N.A., CHEDIN A. (1978) – Détermination de la température de surface de la mer à partir de mesures radiométriques dans deux fenêtres atmosphériques. Proc. of the Intern. Conf. on Earth Observation from Space and Management of Planetary Resources, Toulouse 6-11 mars 1978, 327.
- [37] JITTS H.R., MOREL A., SAIJO Y. (1976) – The relation of oceanic primary production to available photosynthetic irradiance. *Aust. J. Mar. Freshwater res.*, 27, 441-454.
- [38] JOLY G., THOMAS Y.F., VERGER F., ZBINDEN R. – Utilisation des données Landsat pour la connaissance des eaux du Goulet de Fromentine. In : Journées de Télédétection du GDTA, St-Mandé, 21-23 sept, 1977.
- [39] MOGNARD N., LAGO B. (1978) – Détermination de la hauteur moyenne des vagues et de la vitesse du vent au niveau de la mer à partir des données altimétriques du satellite GEOS 3. Coll. CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978), Utilisation pour l'océanographie des satellites d'observation de la Terre. Public. CNEXO, Actes de Colloques, 5, 327-338
- [40] MONGE J.L., SIROU F. (1975) – Aries : un radiomètre multicanal à balayage. Proc. of the Fifth Conf. on Space Optics of the CNES, Marseille, 14-17 oct. 1975, 411-420.
- [41] MONGET J.M., VERGER F. (1977) – La télédétection, outil de l'aménagement du territoire. Séminaire européen Aménagement du territoire et télédétection, Conseil de l'Europe, Toulouse 1977, 28-31.
- [42] MONGET J.M., SARRAT D., VERGER F. (1976) – Environmental mapping of the French Coastal zone by remote sensing. COSPAR Space Research XVII, VI, 10, 13-18.
- [43] MONGET J.P., VERGER F. (1976) – Un exemple d'assistance au traitement automatique des données de télédétection. Photo-interprétation, Editions Technip, n° 5, fasc. 1a à 1b, 1-13.
- [44] MOREL A., PRIEUR L. (1975) – Analyse spectrale des coefficients d'atténuation diffuse, de réflexion diffuse, d'absorption et de rétrodiffusion pour diverses régions marines. Centre de Recherches Océanographiques de Villefranche-sur-Mer, Rapp. n° 17, juillet 1975, 157 p.
- [45] MOREL A., PRIEUR L. (1975) – Analyse spectrale du coefficient de réflexion diffuse de la mer. IUGG, XVIe Assemblée Générale, 248 (Abstract).
- [46] MOREL A., PRIEUR L. (1976) – Mesure de la concentration pondérale du seston sec. Publications du CNEXO, série Résultats des CAMPAGNES à la Mer, Résultats de la Campagne CINECA 5 (J. CHARCOT, CAPRICORNE), n° 10, 1.1.9., 1-5.
- [47] MOREL A., PRIEUR L. (1978) – Mesures par télédétection de la teneur de la mer en chlorophylle. Possibilités et limites des méthodes. Coll. CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978), Utilisation pour l'océanologie des satellites d'observation de la Terre. Public. CNEXO, Actes de Colloques, 5, 67-92.
- [48] MOREL A., PRIEUR L. (1976) – Irradiation journalière en surface et mesure des éclaircissements sous-marins : flux de photons et analyses spectrales. Publications du CNEXO, Résultats de la campagne CINECA 5, n° 10, 1.1.10, 1-257.
- [49] MOREL A., PRIEUR L. (1976) – Analyse spectrale de l'absorption par les substances dissoutes ("substance jaune"). *Ibid.*, 1.1.11, 1-9.
- [50] MOREL A., PRIEUR L. (1977) – Analysis of variation in ocean color. *Limnol. and Oceanogr.*, 22, 4, 709-722.
- [51] MOREL A., PRIEUR L. (1977) – Energie radiative disponible pour la photosynthèse. Campagne GUIDOM, Série Résultats des Campagnes à la Mer, Publications du CNEXO, n° 13, fasc. 2, 33-62.
- [52] MOREL A., PRIEUR L., MATSUMOTO M. (1978) – Résultats des mesures d'optique marine, Campagne ANTIPROD 1977, Publications du CNEXO, Série Résultats des Campagnes à la Mer, n° 16, 39-72, et 99-141.
- [53] MOREL A. (1978) – Available, usable and stored radiant energy in relation to marine photosynthesis. *Deep-Sea Res.*, 25, 673-688.
- [54] NOEL J. (1978) – Utilisation des données thermiques de télédétection pour l'aide à la pêche. Coll. CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978). Utilisation pour l'océanographie des satellites d'observation de la Terre. Public. CNEXO, Actes de Colloques, 5, 63-66.
- [55] OLIVON P. (1977) – Cartographie de la bathymétrie et des formes sous-marines des lagunes méditerranéennes à partir des données numériques Landsat. *Photo-Interprétation*, 5, 29-41.
- [56] PHULPIN T. (1978) – Utilisation de la radiométrie infra-rouge multispectrale pour la détermination de la température de surface. Thèse de 3^e cycle, Université de Lille I, n° 727.
- [57] PIRAZZOLI P. (1976) – Mouvements de sédiments dans le NW de l'Adriatique : deux situations. *Photo-Interprétation*, 5, 32-38 bis.
- [58] PIRAZZOLI P. (1978) – Bathymétrie et turbidité dans la lagune de Venise (Italie), *Photo-Interprétation*, 3.

- [59] POISSON M. (1976) – Une classification automatique des données Landsat diachroniques : les estrans de l'île de Jersey. *Photo-Interprétation*, Editions Technip, 5, fasc. 2, 14-17.
- [60] PRIEUR L., MOREL A. (1975) – Relations théoriques entre le facteur de réflexion diffuse de l'eau de mer à diverses profondeurs et les caractéristiques optiques (absorption et diffusion). IUGG, XVI^e Assemblée Générale, 251 (Abstract).
- [61] PRIEUR L., MOREL A. (1976) – Mesure des coefficients de diffusion, d'atténuation et d'extinction à la longueur d'onde 546 nm. Publications du CNEXO, Série Résultats des Campagnes à la Mer (Campagne CINECA 5), 1.1.12, 1-29.
- [62] PRIEUR L. (1976) – Transfert radiatif dans les eaux de mer. Application à la détermination de paramètres optiques caractérisant leur teneur en substances dissoutes et leur contenu en particules. Thèse Doct. ès-Sciences, Université Paris VI, n° A.O.12187, 243 p.
- [63] PRIEUR L., MOREL A. (1977) – Irradiations journalière en surface. Publ. du CNEXO, sér. Résultats des Campagnes à la Mer, Campagne GUIDOM 1976, n° 13, fasc. 1, 81-87.
- [64] PRIEUR L., MOREL A. (1977) – Profils simultanés de la température et de la lumière dans la couche superficielle (0-100m). *Ibid.*, fasc., 1, 88-104.
- [65] TANRE D., HERMAN M. (1978) – Correction de l'effet de diffusion atmosphérique pour les données de télédétection. Conf. Earth observation from space and management of planetary resources, Toulouse 1978, Proc. ESA, SP-134 81-88.
- [66] THOMAS Y.F. (1976) – Télédétection par satellite et analyse des données : l'étude des turbidités des eaux littorales. In : Colloque sur les méthodes mathématiques appliquées à la géographie, Cah. de Géographie de Besançon.
- [67] THOMAS Y.F. (1978) – Intérêt de la télédétection de la couleur de l'eau de mer pour l'étude des suspensions marines. In : Twentieth Plenary Meeting of the COSPAR, Tel-Aviv 1977. Pergamon Press, Oxford and New-York 1978, 35-38.
- [68] THOMAS Y.F. (1978) – Utilisation des données Landsat pour la mise en évidence de la turbidité en zone littorale : limites des méthodes. In : Journées Nationales d'Etudes CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978), Actes de Colloques Satellites et Océanologie CNES-CNEXO, 5, Brest (France), 109-121.
- [69] TOURNIER B. – Détermination des températures de surface de la mer à partir des mesures radiométriques satellitaires. *Ibid.*, 33-52.
- [70] VERGER F. (1976) – Hydrologie et géomorphologie du Delta du Danube d'après des images Landsat 2. *Photo-Interprétation*, 5, 39-45.
- [71] VERGER F., JOLY G. (1974) – Cartographie diachronique à partir des données numériques de Landsat I. *Photo-Interprétation*, 6, 7-13.
- [72] VIOLLIER M. (1976) – Contribution à l'étude du rayonnement rétrodiffusé par l'océan. Application à la télédétection de la chlorophylle. Thèse de 3^e cycle, Université de Lille I, n° 610.
- [73] VIOLLIER M., LECOMTE P., BOUGARD M., RICHARD A. (1978) – Expérience aéroportée de télédétection (température et couleur de la mer) dans le détroit du Pas-de-Calais. *Oceanologica Acta*, Vol. 1, n° 3, 265-269.
- [74] VIOLLIER M., BEAUSSART N., LECOMTE P. (1975) – Interprétation de la signature spectrale des eaux marines. Conf. Earth observation from space and management of planetary resources, Toulouse 1978, Proc. ESA, SP-134, 81-88.
- [75] VIOLLIER M. (1975) – Expériences aéroportées de détermination de la couleur de l'océan. Colloque CNES-CNEXO (Brest, 6-8 fév. 1978), Utilisation pour l'océanologie des satellites d'observation de la Terre. Public. CNEXO, Actes de Colloques, 5, 93-108.

VII – Océanographie Côtière et Environnement

René BONNEFILLE
Electricité de France

Les travaux français en matière d'océanographie côtière et environnement marin exécutés de 1975 à 1978, se répartissent suivant les axes de recherche suivants :

Les estuaires :

Les études des phénomènes résiduels sont poursuivies en prenant pour éléments de comparaison les mesures de vitesse, salinité et turbidité dans la Gironde [7] ; les efforts s'orientent vers l'étude de la température résiduelle en vue d'estimer les conséquences des rejets d'eau chaude dans les estuaires. L'intérêt des chercheurs se concentre actuellement vers l'estuaire de la Loire [5] soit du point de vue aménagements et environnements (aquaculture, refroidissement des centrales électriques, navigation) [4, 37, 38, 39, 45], soit pour en améliorer les connaissances hydrologiques [19, 33, 34] ou bactériologiques, soit pour aborder les problèmes de pollution par le mercure [21, 22, 36]. Les études de l'évolution de l'estuaire de la Gironde sont poursuivies par l'Université de Bordeaux [47].

La géomorphologie littorale :

Dans ce domaine les chercheurs français exécutent de nombreuses missions de recherche de synthèse et de mise au point en différentes parties du globe terrestre [26 à 31] et surtout du plateau continental Sud Bretagne [15 à 18]. L'hydrodynamique et la sédimentation en milieu margino-littoral du Languedoc-Roussillon constitue le champ d'investigation du Centre de Recherche de Sédimentologie Marine de Perpignan [2, 3, 6, 9, 35, 44]. La morphologie et la sédimentologie de certains secteurs du prisme littoral de la côte Aquitaine ont été examinées par l'Institut de Géologie du Bassin d'Aquitaine [20, 51].

Les modèles mathématiques de dispersion des contaminants :

C'est dans ce domaine qu'ont été réalisés les plus gros progrès du fait des études de dispersion des différents contaminants thermiques, radioactifs, chimiques, etc., dans le milieu marin. Ce sont en général les grands laboratoires, travaillant sous contrat pour les Administrations, qui ont développé ces outils mathématiques. [10, 11, 12, 32].

Les études d'environnement :

Il s'agit des études des ouvrages de génie civil [23, 40] ou de mesures en nature [41, 46] ou de modèles de mathématique de transport des contaminants [24, 25] en vue de combattre les problèmes de pollution côtière.

La technique des traceurs radioactifs a été largement utilisée pour les études de la pollution des estuaires par les éléments métalliques [8, 13] et celles de l'action de la houle sur les mouvements sédimentaires [14] et le traçage des vases dans l'estuaire de la Gironde [1, 48].

Les études d'aménagement :

Les grands laboratoires français associés aux bureaux d'études ont soit mis au point des aménagements [42, 43, 50] ou participé aux grandes réalisations portuaires à l'étranger [49].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ALLEN G.P., CASTAING P., JOUANNEAU J.M. (1977) – Mécanismes de remise en suspension et de dispersion des sédiments fins dans l'estuaire de la Gironde. *Bull. Soc. Géol. France* (7), t. XIX, n° 2, p. 167-176.
- [2] ALOISI J.C. et CHARLET J.M. (1975) – Intérêt de la thermoluminescence dans l'étude de l'alimentation en quartz du Golfe du Lion. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn.* (12), vol. 17, fasc. 1, p. 23-38.
- [3] ALOISI J.C., MONACO A., THOMMERET J. et THOMMERET Y. (1975) – Evolution paléogéographique du plateau continental languedocien dans le cadre du Golfe du Lion. Analyse comparée des données sismiques, sédimentologiques et radiométriques concernant le Quaternaire récent. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dynam.* (2), vol. 17, fasc. 1, p. 13-22.
- [4] BARAILLER L., MONTAZ J.P. et CUNGE J.A. (1975) – Etudes sur modèles physiques et mathématiques de l'évolution des fonds dus à la marée dans les estuaires. 16^e Congrès de l'AIHR, Sao Paulo.
- [5] BARBAROUS L. (1977) – Variations d'emplacement de la zone de mélange eau-douce/eau-salée en fonction du débit et de la marée dans l'estuaire de la Loire. *J. Rech. Océanogr.*, vol. 11, n° 1, p. 4.
- [6] BARUSSEAU J.P. et JAGO C. (1978) – Modalités de l'évolution texturale sur une avant-côte de mer sans marée. Exemple du Golfe du Lion (France). X^e Congrès Int. de sédimentologie, Jérusalem.
- [7] BONNEFILLE R. (1978) – Residual phenomena in estuaries, application to the Gironde Estuaris. *Hydrodynamics of Estuaries and Fjords*, p. 187-195, Elsevier.
- [8] CAILLOT A., COURTOIS G., SAUZAY G. (septembre 1976) – Emploi des traceurs pour l'étude du transport et de la dispersion des sédiments ou des polluants en milieu marin. Publication Conseil International pour l'Exploitation des Mers, Copenhague.
- [9] CAUWÉT C. (1975) – Optimisation d'une technique de dosage du carbone organique des sédiments. *Chemical Geology*, 16, p. 59-63.
- [10] CHEVEREAU G. (1975) – Modèle mathématique de pollution par convection d'un traceur conservatif, son utilisation dans l'étude de l'assainissement du Golfe du Morbihan. 16^e Congrès AIRH, Sao Paulo.
- [11] CHEVEREAU G. (avril 1976) – Use of mathematical models as an approach to flow control problems. International Symposium on unsteady flow in open channels, Newcastle-upon-Tyne, England.
- [12] CHEVEREAU G., CUNGE J.A. et MONTAZ J.P. (1975) – Modèles mathématiques appliqués à l'étude de processus morphologiques et de propagation des polluants dans les zones côtières. Colloque Franco-Soviétique sur l'Océanographie, Grenoble.
- [13] COURTOIS G., CAILLOT A., SAUZAY G. (mars 1978) – Séminaire "La dispersion en milieu physique naturel". Société Française de Radioprotection, Cadarache.
- [14] COURTOIS G., MIGNIOT C., SAUZAY G. (19/23 juin 1978) – Etude par traceurs radioactifs de l'action des houles sur les fonds marins. Colloque International sur l'Hydrologie Isotopique, Neuherberg (RFA).
- [15] DELANOE Y., LEHEBEL L., MARGEREL J.P. et PINOT J.P. (1975) – La Baie de Concarneau est un bassin tectonique dans lequel d'épais dépôts du Lutétien supérieure ont été conservés. *C.R. Acad. Sci. Paris, sér. D*, t. 281, p. 1947-1950.
- [16] DELANOE Y., MARGEREL J.P. et PINOT J.P. (1978) – En Baie de Concarneau, l'Oligocène marin est discordant sur un Eocène ondulé, faillé et érodé, et l'aquitainien a voilé l'ensemble après une nouvelle pénéplanation. *C.R. Acad. Sci. Paris, sér. D*, t. 282, p. 29-31.
- [17] DELANOE Y. et PINOT J.P. (avril 1976) – Conséquences des mouvements tectoniques récents sur la géomorphologie de la plateforme continentale sud-armoricaine. *C.R. 4^e Réunion ann. Sci. de la Terre*, Paris, p. 128.
- [18] DELANOE Y. et PINOT J.P. (novembre 1978) – Rôle de la mobilité des sables dans la porphodynamique de la plateforme armoricaine. Colloque de Géomorphologie sous-marins OCEANIS, Paris.
- [19] DESAUBLIAUX G., FABLET A., FRENEL D., LE DOUAREC P., OTTMANN F. et QUERE J. (1978) – Conditions de mélange des eaux douces et salées dans l'estuaire externe de la Loire. Conséquences pour la pollution bactérienne. *J. Rech. Océanogr.*, vol. III, n° 1, p. 29-51.
- [20] DUPLANTIER F. (1977) – Etude sédimentologique de la zone côtière du proche plateau continental de la région de Capbreton. Paléogéographie et évolution actuelle. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, vol. 21, p. 87-114.
- [21] FRENET-ROBIN M. et OTTMANN F. (1978) – Comparative study of the fixation of inorganic mercury on the principal clay minerals and the sediments of the Loire Estuary. *Estuarine and Coastal Marine Sci. Academic Press*, 24/28 Oval Road, London, NW1.
- [22] FRENET M. (14 novembre 1978) – Difficultés d'échantillonnage et précautions à prendre pour l'étude des pollutions par le Mercure dans l'eau et les sédiments en milieu estuarien. Colloque "Estuaires et Deltas" U.O.F. Montpellier.
- [23] GAUTHIER M.F. et QUETIN B. (1976) – Utilisation des traceurs pour les études d'implantation des émissaires en mer. Houille Blanche n° 3/4.
- [24] GAUTHIER M.F. (1978) – Modèles de calcul des écoulements induits par le vent. 14^e Journées de l'Hydraulique, Société Hydrotechnique de France.
- [25] GAUTHIER M.F. (1977) – Modèles mathématiques de calcul des écoulements induits par le vent. 16^e Congrès de l'AIHR, Baden-Baden.

- [26] GUILCHER A. et BODERE J.C. (1975) – Formes de corrosion littorale dans les roches volcaniques aux moyennes et hautes latitudes dans l'Atlantique, *Bull. Ass. Geogr. Français*, n° 426, p. 179-185.
- [27] GUILCHER A. et PASKOFF R. (1975) – Remarques sur la géomorphologie de l'archipel maltais. *Bull. Ass. Geogr. Français* n° 427, p. 225-231.
- [28] GUILCHER A. (1976) – Les côtes à rias de Corée et leur évolution morphologique. *Ann. de Geogr.*, vol. 85, p. 641-671.
- [29] GUILCHER A. (1978) – Double and multiple barrier reefs in the world. *Studia Societatis Scientiarum Torunerises*, Torun, Polonia, vol. 8, Section C, n° 4-6, p. 85-89.
- [30] GUILCHER A. et MOIGN A. (1977) – Coastal conservation and coastal studies in France. *Geogr. Journal* (Londres), vol. 143, p. 378-392.
- [31] GUILCHER A. et MAREC A. (1978) – Le récif-barrière et la lagon du Grand Cul-de-Sac marin (Guadeloupe). *Geomorphologie et sédiments, Oceanologica Acta*, vol. 1, p. 435-444.
- [32] HOLLY F. et CUNGE J.A. (septembre 1975) – Prediction of time-dependent mass dispersion in natural streams. Conférence "Modeling 75", ASCE Hydraulics Division.
- [33] LE DOUAREC P. (1977) – Variation saisonnières du front de salinité dans l'estuaire de la Loire. *J. Rech. Océanogr.*, vol. II, p. 36.
- [34] LE DOUAREC P., OTTMANN F. (14 novembre 1978) – Les aspects prévisionnels dans l'estuaire de la Loire. Colloque "Estuaires et Deltas" U.O.F., Montpellier.
- [35] MARTIN R., GADEL F. et BARUSSEAU J.P. (1978) – The evolution of two lagons of Lion Coast (France) during the Holocene. X^e Congr. Int. de sédimentologie, Jérusalem.
- [36] OTTMANN F. et ROBIN M. (1976) – Etude comparative de la fixation du mercure sur les éléments estuariens et sur la kaolinite. *Rev. Int. Méd.* tomes XLI-XLII, p. 105-126.
- [37] OTTMANN F. et MABOUNDA G. (1977) – Etude granulométrique du matériel en suspension dans les eaux de mer et des estuaires par microtamisage sous l'eau. *J. Rech. Océanogr.*, vol. II, n° 1, p. 45.
- [38] OTTMANN F. (16-18 septembre 1977) – Problèmes géologiques et hydrologiques liés à la conversion des marais littoraux vers l'aquaculture. Fédération Thermale et Climatologique - 6^e Congrès de la Mer, La Baule.
- [39] OTTMANN F. – Aménagements des estuaires et préservation du milieu naturel. Colloque C.N.R.S. Franco-Japonais - Villes et Ports - Développement portuaire - Environnement littoral, 25 septembre, 8 octobre 1978.
- [40] PANTELOPOULOS J. et de BOUARD M.S. (1975) – Etude expérimentale de procédés permettant une dilution plus efficace des rejets polluants en mer. 16^e Congrès de l'AIHR, Sao Paulo.
- [41] PARISET E. (décembre 1977) – Laguna de Bay Water Resources Development. Journal of the Engineering Division, Proceeding of ASCE.
- [42] PARTHIOT F. et SOMMET J. (1975) – Efforts de la houle sur des structures immergées. *La Houille Blanche* n° 7/8.
- [43] PARTHIOT F. et SOMMET J. (1977) – Distance d'arrêt des grands navires en canal - Etude de l'extension du canal de Suez : essais sur modèle. *La Houille Blanche* 5/6.
- [44] PAUC H. et THIBAUT M. (1978) – L'hydrodynamique des matériaux en suspension en baie de Portman (province de Murcie, Espagne). *Bull. B.R.G.M.* (2), IV-3, p. 211-221.
- [45] PRIGENT D. (juin 1977) – Contribution à l'étude de la transgression flandrienne en Basse-Loire. Apports de l'Archéologie. Thèse 3^e cycle, Nantes.
- [46] QUETIN B. (septembre 1976) – Mesure des courants, de la dilution et de l'autoépuration des polluants en Méditerranée. 14^e Journées de l'Hydraulique, Société Hydrotechnique de France.
- [47] SAGOIS J.G., CASTAING P. (1978) – Les processus sédimentaires dans l'anse du Verdon (Estuaire de la Gironde). *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, p. 147-164.
- [48] SAUZAY G., JEANNEAU B., GOURLEZ P., ALLEN G., CASTAING P., JOUANNEAU J.M. (1977) – Tracer study of suspended sediment in a coastal plain estuary. XVIIth IAHR Congress Baden-Baden.
- [49] SIREYJOL P. (1977) – Transit littoral et conception des ports : l'exemple du port de Cotonou. *La Houille Blanche* n° 5/6, p. 401-408.
- [50] TOURMEN L. (mai-juin 1976) – Les plages artificielles. Séminaire sur l'aménagement des régions côtières, Nations Unies, DSE, Berlin.
- [51] WEBER O. (1978) – Evolution morphologique, granulométrique d'un profil littoral de la dune à la plage sous-marine à la Salie (Gironde) en fonction des saisons. *Bull. Inst. Géol. Bassin d'Aquitaine*, Bordeaux, vol. 23, p. 39-54.

VIII – GEOLOGIE ET GEOPHYSIQUE DES MARGES CONTINENTALES ET DES FONDS OCEANIQUES

Gérard Grau

Institut français du pétrole – 92500 RUEIL-MALMAISON

INTRODUCTION

Durant la période 1975-1978, l'activité des différents organismes de recherche océano-graphique a porté essentiellement sur les sujets suivants :

- . Etude et compréhension de plus en plus détaillée des marges continentales stables et actives.

- . Dépouillement et interprétation des informations recueillies lors de l'opération "FA-MOUS".

- . Cinématique et évolution des océans.

- . Etude des nodules polymétalliques dans leur environnement sédimentaire et hydrologique.

A cet effet, de nombreuses campagnes ont été entreprises mettant en œuvre des moyens directs, tels que dragages et forages dans le cadre du projet IPOD, et indirects tels que sismique réflexion multitrace, sismique réfraction lourde, magnétisme, gravimétrie et mesure du flux thermique.

Des ouvrages ou articles plus généraux ont été publiés sur ces différents sujets [41, 61, 76, 85, 87, 119, 122, 123].

A – GEOLOGIE ET GEOPHYSIQUE DES MARGES CONTINENTALES

1 – Marge continentale S-E du Groenland et mer de Norvège

Le CNEXO a entrepris, seul ou avec le CEPM plusieurs campagnes pour étudier la ride de Jan Mayen, la marge continentale SE du Groenland puis la transition continent-océan. Une synthèse des résultats est publiée [71].

2 – Marge continentale française

Cette zone s'étend de l'entrée de la Manche au golfe de Gascogne.

Après avoir publié une carte géologique de la Manche, le BRGM publie une carte géologique du plateau continental du golfe de Gascogne [44].

Sur la marge armoricaine, la sismique réfraction lourde a permis de situer la discordance de Mohorovi i c à une profondeur de 12 km à l'ouest des terrasses de Meriadzec et à 14 km plus au sud, ce qui implique la présence d'une flexure affectant la croûte continentale. Dans cette même zone, la sismique réflexion multitrace a mis en évidence une structure en horst et graben.

En ce qui concerne plus particulièrement le golfe de Gascogne, la synthèse des informations géophysiques et des résultats des forages du "GLOMAR CHALLENGER" a permis

de proposer un modèle d'évolution structurale d'une marge continentale stable. On montre notamment que le rifting a été sous-marin et non sub-aérien et que le style tectonique y est caractérisé par l'existence de blocs basculés, limités par des failles de rotation ayant affecté la partie supérieure fragile (6 à 8 km) de la croûte continentale [60].

3 – Marge Ouest ibérique

En 1975, le CNEXO et l'Université de Paris ont entrepris des campagnes sur les bancs de Galice. Ces bancs, situés à – 1500 m, correspondraient à un bloc continental effondré, séparé par un bassin profond du plateau ibérique.

Par la suite, CNEXO, IFP et Université de Paris ont préparé l'implantation des forages IPOD à l'aide de sismique réflexion multitrace faite par le navire océanographique "FLORENCE" de l'IFP.

Le dépouillement des enregistrements sismiques et les forages ont permis de mettre en évidence deux systèmes de rifting et plusieurs manifestations tectoniques. Au nord des bancs de Galice, la phase majeure est d'âge crétacé supérieur-éocène, provoquant des flexures sur les bancs de Galice et des discordances angulaires dans les séries sédimentaires de la plaine abyssale. Au sud, la phase principale est miocène et provoque un hiatus dans la série sédimentaire [15, 20, 111].

Des cartes géologiques des plateaux portugais et sud-Espagnol ont été dressées [42, 21].

4 – Marge continentale ouest-Gibraltar

Cette marge est constituée par la juxtaposition de deux marges tectonisées complexes appartenant à l'Ibérie et au Maroc. Des masses allochtones mises en place au Miocène recouvrent cette zone entre la "Ride de Cadix" et la vallée de Rabat. Cette "nappe de Gibraltar" s'étend vers l'ouest très au-delà des limites continentales [46].

5 – Marge continentale ouest-Afrique

Le CEPM a entrepris avec le "FLORENCE" de l'IFP deux campagnes sismiques réflexion multitrace (1976-1977) afin d'explorer cette marge sensu lato du Libéria à la Mauritanie.

6 – Marge Sud-Africaine – Ride de Walvis

En 1975, un parcours du "GLOMAR CHALLENGER" a montré une phase de stagnation générale au Crétacé inférieur dans les bassins d'Angola et du Cap et sur la ride de Walvis, ce qui implique alors une absence de communication franche avec l'océan [75]. En 1977, CNEXO et IFP, avec le nouveau navire "RESOLUTION" de l'IFP ont entrepris une campagne de sismique réflexion multitrace et de magnétisme sur la ride de Walvis afin de préparer une éventuelle campagne de forage du "GLOMAR CHALLENGER" dans cette région (phase II d'IPOD).

7 – Marge continentale S-E des Etats-Unis et du plateau du Blake

En collaboration avec l'USGS, l'IFP a effectué une étude par sismique réflexion Flexi-choc (48 traces), bouées réfraction et magnétisme de la région du plateau du Blake. En zone profonde, des profils ont été utilisés pour implanter un forage de la campagne 44 du DSDP. D'après ce forage, les sédiments les plus profonds atteints sont des marnes rouges du Jurassique supérieur [136].

8 – Marge nord de l'Amérique du Sud et bassins bordant l'arc des Antilles

En 1976 et 1978, l'IFP, dans le cadre du CEPM, a fait des campagnes de sismique réflexion multitrace sur la marge des Guyanes, dans les bassins bordant l'arc des Antilles, sur

la marge nord-vénézuélienne, puis sur la marge nord de l'Amérique du Sud jusqu'à la frontière du Costa Rica [40].

9 – Méditerranée

Durant ces 4 années, la Méditerranée a fait l'objet de nombreuses campagnes auxquelles ont participé, seuls ou en association, le CNEXO, le GEMC, l'IFP, l'IPG et la SNEA.

C'est surtout la zone occidentale qui a été étudiée, notamment la mer d'Alboran [17], la mer Tyrhénienne [146], la mer Ligure, la marge Maures-Estérel, la marge nord-Baléares [101] et la marge nord-africaine.

Ces travaux ont permis de préciser les étapes de l'ouverture et de l'évolution des bassins ligure, provençal et nord-Baléares, considérés comme bassins marginaux, la structuration et le recouvrement sédimentaire des marges, l'impact de l'épisode messinien et son évolution morpho-structurale [108]. Il a été montré, en particulier, que les dépôts infra-messinien et messinien au pied de la marge nord-africaine sont flexurés. Il en résulte une dépression comblée par du Plio-Quaternaire qui peut donner à penser que cette marge serait une marge active à son stade précoce [16]. Les relevés gravimétriques vont dans ce sens.

Une nouvelle carte bathymétrique du bassin occidental a pu être réalisée par le GEMC.

Des ouvrages de synthèse ont déjà été publiés [35, 36, 37] [38], ainsi que les communications présentées au Congrès de Split (oct. 1976) [52].

B – GÉOLOGIE ET GEOPHYSIQUE DES FONDS Océaniques

1 – Océan Indien

Cet océan a surtout été étudié par l'I.P.G. Entre 1975 et 1978 le Laboratoire de Géophysique Marine de l'I.P.G. a réalisé, avec l'aide du C.N.E.X.O. (N.O. SUROIT) et des T.A.A.F. (MARION DUFRESNE), sept campagnes océanographiques.

Le dépouillement et l'interprétation des informations recueillies ont permis : d'expliquer la structure des dorsales est-indienne et ouest-indienne et en particulier de démontrer le fonctionnement du point triple de Rodriguez depuis au moins l'anomalie 30, de cartographier les anomalies MO à M 22 dans le bassin de Mozambique [134] et de reconnaître la nature (argilite et grès arkosique) et le rôle de la ride de Davie dans le canal de Mozambique [62, 135].

La structure et l'âge de l'océan Indien occidental font l'objet de plusieurs publications [129, 130, 131, 145].

Une nouvelle échelle chronologique des inversions du champ magnétique, obtenue en utilisant les résultats de forages profonds du "GLOMAR CHALLENGER" dans tous les océans, a été proposée pour le Crétacé supérieur et pour le Paléocène [132].

2 – Océan atlantique

a) Atlantique nord

L'histoire de l'Atlantique nord est liée au comportement de trois plaques : Amérique du Nord, Eurasie, Afrique. L'interaction entre les plaques Afrique et Eurasie est contrôlée par les structures de la ride Açores-Gibraltar. Depuis 80 millions d'années, le mouvement relatif Afrique/Eurasie est du type convergent dans le voisinage de Gibraltar. A l'ouest de cette zone, le mouvement a été de cisaillement vertical et se traduit actuellement par la faille de Gloria. Enfin, encore plus vers l'ouest, on observe un processus d'accrétion qui aurait produit le plateau des Açores [45, 69].

b) Atlantique sud

L'évolution cinématique de cette partie de l'Atlantique a été établie en utilisant le tracé des zones de fractures équatoriales, puis les isochrones déduites des données de magnétisme. Depuis le début de l'ouverture, 4 phases principales datées par des anomalies magnétiques ont été mises en évidence et corrélient avec les événements volcaniques et tectoniques identifiés à terre.

c) Dépouillement des résultats de l'opération "Famous"

Les résultats marquants sur le plan structural ont fait l'objet d'une publication dès 1975 [3]. Par ailleurs, les observations faites sur le fond de la vallée transformante fournissent des détails sur la zone de cisaillement, qui est étroite et intensément fracturée. La zone cisailante proprement dite n'est pas stable dans le temps et sa largeur totale a pu changer au cours des temps. Des réajustements verticaux majeurs se superposent au cisaillement horizontal.

L'étude des échantillons de basalte confirme l'hétérogénéité spatiale et temporelle de la croûte océanique avec une échelle de temps de l'ordre de 10 000 ans et une longueur d'onde de l'ordre du kilomètre. Malgré cette hétérogénéité, la diversité des types de lave est restreinte [4, 25, 26, 30].

3 - Océan Pacifique

La géodynamique du sud-ouest du Pacifique a fait l'objet d'un symposium international à Nouméa en 1976. Les communications sont publiées [144].

En ce qui concerne les nodules polymétalliques, ils font l'objet de nombreuses publications [32, 33, 34, 55, 58, 121].

Il convient de noter qu'ils se forment autour d'un nucléus constitué de débris variés (volcanique, organique, argile indurée, etc.) déposés sur des fonds marins bien oxygénés, à faible vitesse de sédimentation et situés près de zones volcaniques actives. La circulation profonde des eaux antarctiques et la topographie des fonds jouent également un rôle dans la nature et la distribution des nodules.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ANGELIER J., AUBOUIN J. et al. (1977) - Etude par submersible des canyons des Stoechades et de Saint-Tropez. *C.R. Acad. Sc.*, 284, p. 1631-1634.
- [2] APOSTOLESU V. (1977) - Présentation de la carte géologique de l'Antarctique au 1/2 500 000. *Rev. IFP*, XXXII, p. 665-670.
- [3] ARCYANA (1975) - Transform fault and rift valley geology by bathyscaph and diving saucer. *Science*, 190, p. 108-116.
- [4] ARCYANA (1977) - Rocks collected by bathyscaph and diving saucer in the "Famous" area of the Mid-Atlantic rift valley : petrological diversity and structural setting. *Deep-Sea Res.*, XXIV, n° 6, p. 565-589.
- [5] ARCYANA (1978) - Atlas photographique de la dorsale médio-atlantique expédition "Famous". Gauthier-Villars. Paris.
- [6] AUFFRET G.A., BERTHOIS L. et al. (1975) - Observations sur les rides sous-marines du plateau continental. *La Houille Blanche*, XXX, n° 7-8, p. 467-478.
- [7] AUFFRET G.A., BERTHOIS L. et al. (septembre 1976) - Intérêt de la connaissance des processus sédimentaires actuels sur la façade atlantique du plateau continental français pour le contrôle des rejets industriels. 14^e Journées de l'hydraulique, Paris.
- [8] AUFFRET G.A., DOUVILLE J.L. (1975) - Faciès sédimentaires actuels à la périphérie ouest et nord du craton armoricain. Relations avec les processus dynamiques. Ann. 9^e Congr. Int. Sédim., 5.1, p. 19-23, Nice.
- [9] AUFFRET G.A., KERBRAT R. et al. (1975) - Processus sédimentaires actuels dans le Vema Channel (Atlantique S), Ann. 9^e Congr. Sédim., 8, p. 1-5, Nice.
- [10] AUFFRET G.A., PASTOURET L. (1978) - Evolution sédimentaire comparée des marges armoricaines et de Blake Bahama depuis le Crétacé supérieur d'après les résultats des legs 48 et 44 du "GLOMAR CHALLENGER". *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, (à paraître).

- [11] AUFFRET G.A., PASTOURET L. – Upper cretaceous to quaternary sedimentary processes in the Bay of Biscay from textural, mineralogical and coarse fraction studies in : Initial Reports DSDP, U.S. Govt print. off., Washington, vol. 48 (à paraître).
- [12] AUFFRET G.A., PASTOURET L. et al. (1975) – Dynamique sédimentaire au bas de la marge continentale armoricaine : exemple de la ride Aegis. Ann. 9^e Congr. Sédim., 6, p. 1-5, Nice.
- [13] AUFFRET G.A., PASTOURET L. et al. (1975) – Observations sur les fonds marins de la marge continentale et de la plaine abyssale du Golfe de Gascogne. *Bull. O.O.F.*, 7, n° 3-4, p. 18.
- [14] AUFFRET G.A., PASTOURET L. et al. – Dredged rocks from the Armorican and Celtic margins in : Initial Reports DSDP, U.S. Govt print. off., Washington, vol. 48 (à paraître).
- [15] AUXIETRE J.L., DUNAND J.P. (1978) – Géologie de la marge ouest-ibérique (an N de 40° N). Le banc de Galice, les montagnes de Vigo, de Vasco de Gama et de Porto. Thèse 3^e cycle, Univ. P. et M. Curie, Paris.
- [16] AUZENDE J.M., BONNIN J. et al. (1975) – La marge nord-africaine considérée comme marge active. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, XVII, n° 4, p. 486-495.
- [17] AUZENDE J.M., REHAULT J.P. et al. (1975) – Les bassins sédimentaires de la mer d'Alboran. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, XVII, n° 1, p. 98-107.
- [18] AVEDIK F. (1975) – The seismic structure of the western approaches and the south armorican continental shelf and its geological interpretation, in Proc. Conf. on Petroleum and continental shelf of North-West Europe : the geology and environment, p. 29-43.
- [19] AVEDIK F., HOWARD D. – Preliminary results of a seismic refraction study in the Meriadzek-Trevelyan area, Bay of Biscay in : Initial Reports DSDP, U.S. Govt print. off., Washington, vol. 48 (à paraître).
- [20] BALDY P. (1977) – Géologie du plateau continental portugais (au S du cap de Sines). Thèse 3^e cycle, Université P. et M. Curie, Paris.
- [21] BALDY P., BOILLOT G. et al. (1977) – Carte géologique du plateau continental sud-portugais sud-espagnol. (golfe de Cadix). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XIX, n° 4, p. 703-724.
- [22] BALDY P., BOILLOT G. et al. (1975) – Structure géologique du plateau continental sud-portugais. *C.R. Ac. Sc.*, 281, D, n° 10, p. 613-616.
- [23] BELLAICHE G. (1975) – Naissance et objectifs du projet Famous. *Le courrier du CNRS*, n° 18, p. 25-31.
- [24] BELLAICHE G. (1975) – Sur l'origine et l'âge des levées sédimentaires profondes : cas du delta sous-marin du Rhône (Méditerranée occidentale). *Mar. Geol.*, XIX, n° 2, p. M1-M6.
- [25] BELLAICHE G. (1976) – L'opération Famous. Objectifs, principaux résultats et premiers bilans. *Bull. BRGM*, sér. 2, XI, n° 430, p. 253-262.
- [26] BELLAICHE G. (1977) – Généralités sur les fonds sédimentaires observés par submersibles dans le rift médio-atlantique et la faille transformante "A" (zone Famous). *Bull. BRGM*, sér. 2, IV, n° 4, p. 331-337.
- [27] BELLAICHE G., BLANPIED C. et al. (1977) – Diapirisme et volcanisme sur la plateforme pélagienne (côtes orientales de la Tunisie). *C.R. Ac. Sc.*, 284, D, n° 23, p. 2335-2338.
- [28] BELLAICHE G., CHEMINÉE J.L. (1975) – L'opération Famous : étude détaillée d'une fraction de la dorsale médio-atlantique. *Rev. Géogr. phys. et Géol. dyn.*, sér. 2, XVII, n° 3, p. 209-218.
- [29] BELLAICHE G., CHEMINÉE J.L. (1975) – Observations en bathyscaphe de formations volcano-sédimentaires aux environs de Madère. *Mar. Géol.*, XIX, n° 2, p. M7-M13.
- [30] BELLAICHE G., CHEMINÉE J.L. (1977) – Formes volcaniques observées au cours des plongées Famous dans le rift médio-atlantique et la faille transformante "A" *Bull. BRGM*, sér. 2, IV, n° 4, p. 311-329.
- [31] BELLAICHE G. et COUMES F. et al. (1978) – Structure des canyons sous-marins provençaux. Sédimentation diagenèse et érosion pendant le Quaternaire. *C.R. Acad. Sc.*, 286, D, n° 24, p. 1779-1782.
- [32] BIGNOT G., DANGEARD L. (1977) – Contribution à l'étude de la fraction biogène des nodules polymétalliques des fonds océaniques actuels. *Oceanis*, 3, n° hors série, p. 4-6.
- [33] BIGNOT G., DANGEARD L. (1977) – Résultats préliminaires de l'examen au MEB de nodules polymétalliques des fonds océaniques actuels. *Oceanis*, 3, n° hors série, p. 7-27.
- [34] BIGNOT G., DANGEARD L. (1978) – Traces nanobiotiques dans les nodules polymétalliques des fonds océaniques actuels. *Coll. Int.*, Gif-sur-Yvette.
- [35] BIJU-DUVAL B. (1977) – Commentaires à propos d'un essai de reconstitution de la genèse de la Méditerranée. *Rev. IFP*, XXXII, p. 545-548.
- [36] BIJU-DUVAL B., DERCOURT J. et al. (1976) – La genèse de la Méditerranée. *La Recherche*, n° 71, p. 811-822.
- [37] BIJU-DUVAL B., DEVAUX E. et al. (1975) – Apports de l'étude des images du satellite Landsat-1 à la connaissance de la structure du domaine méditerranéen. *Revue IFP*, XXX, p. 841-853.
- [38] BIJU-DUVAL B., LAMPEREIN C. et al. (1976) – Esquisse photogéologique du domaine méditerranéen. Grands traits structuraux à partir des images du satellite Landsat 1. Commentaires. *Revue IFP*, XXXI, p. 365-400.
- [39] BIJU-DUVAL B., LETOUZEY J. et al. – Variety of basins and continental margins in the Mediterranean in : Geological and Geophysical investigations of continental margins, memoir AAPG, n° 29 (à paraître).

- [40] BIJU-DUVAL B., MASCLE A. et al. (1978) – Seismic investigations in the Colombia, Venezuela and Grenada basins, and on the Barbados ridge for future IPOD drilling. *Geol. en Mijnbouw*, LVII, n° 2.
- [41] BOILLOT G. (1978/79) – Géologie des marges continentales. Masson, Paris.
- [42] BOILLOT G., DUPEUBLE P.A. et al. (1975) – Carte géologique du plateau continental nord-portugais. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, XVII, p. 462-480.
- [43] BOILLOT G., MUSELLEC P. (1975) – Origine de la Manche d'après une carte géologique au 1/1 000 000. *Phil. Trans Royal Soc. Lond.*, sér. A, 279, n° 1288, p. 21-27.
- [44] BOILLOT G. et al. (1976) – Le plateau continental du golfe de Gascogne. Carte géologique au 1/1 000 000e et sa notice explicative. *BRGM*.
- [45] BONNIN J. (1978) – Evolution géodynamique de la ligne Açores-Gibraltar. Thèse Dr. ès-Sciences Physiques, Université Paris VII.
- [46] BONNIN J., OLIVET J.L. et al. (1975) – Structure en nappe à l'ouest de Gibraltar. *C.R. Acad. Sc.*, 280, n° 5, p. 559-562
- [47] BOUGAULT H., CAMBON P. et al. (1978) – Evidence for variability of magmatic processes and upper mantle heterogeneity in the axial region of the mid-Atlantic ridge near 22 and 36° N. *Tectonophysics*, (à paraître).
- [48] BOUGAULT H., CAMBON P. et al. – Trace elements : fractional crystallization and partial melting process, heterogeneity of upper mantle material in : Initial Reports DSDP, U.S. Govt print. off. Washington. vol. 46 (à paraître).
- [49] BOURROUILH R., MAUFFRET A. (1975) – Le socle immergé des Baléares (Espagne) : données nouvelles apportées par des prélèvements sous-marins. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, XVII, n° 6, p. 1126-1130.
- [50] BRISEID E., MASCLE J. (1975) – Structure de la marge continentale norvégienne au débouché de la mer de Barentz. *Mar. Géoph. Res.* 2, n° 3, p. 231-241.
- [51] CHAIGNEAU M., HEKINIAN R. et al. (1978) – Magmatic gases extracted and analysed from ocean floor volcanics. *Bull. volcan.*, (à paraître).
- [52] Congrès (25ème) Com. Int. Expl. Méd., Split, Yougosl. 1976 in : Histoire structurale des bassins méditerranéens. Technip. Paris 1977.
- [53] CYAGOR (1978) – In situ sampling and observation of ocean mantle and crust on Gorrington Bank, S.W Portugal *Nature*, 273, n° 5657, p. 45-49.
- [54] DANGEARD L. (1977) – Quelques aspects des fonds méditerranéens de la marge continentale aux abysses. *Oceanis*, 3, n° 1, p. 1-12.
- [55] DANGEARD L. (1978) – A study on fields of polymetallic nodules with submarine photographs. Congrès Int. Sédim., Israel.
- [56] DANGEARD L. – Rôle des tremblements de terre dans l'évolution du relief sous-marin. Phénomènes de glissement. *Oceanis* (à paraître).
- [57] DANGEARD L., VANNEY J.R. (1975) – Essai de classification des dépôts glacio-marins d'après l'examen des photographies sous-marines. *Ann. Inst. Océan. nouv. série*, 51, n° 2, p. 143-153.
- [58] DANGEARD L., VANNEY J.R. (1976) – Contribution à l'étude des champs profonds de nodules polymétalliques. *C.R. Ac. Sc.*, 283, D, p. 323-325.
- [59] DANGEARD L., VANNEY J.R. et al. (1977) – Affleurements, courants et faciès dans la zone antarctique du Pacifique oriental (mers de Bellingshausen et d'Amundsen). *Ann. Inst. Océan.*, nouv. série, 53, n° 1, p. 105-124.
- [60] DE CHARPAL O., GUENOC P. et al. (1978) – Rifting, crustal attenuation and subsidence in the Bay of Biscay. *Nature*, 275, n° 5682, p. 706-711.
- [61] DES VALLIERES T., KUHN H. et al. (1978) – Test of various high resolution seismic devices in hard bottom areas. Proc. 10th annual Offshore Technology Conference, Houston, 3, n° OTC 3221, p. 1455-1466.
- [62] DELTEIL J.R., JACQUART G. et al. (1978) – Continental margins of South-Western Indian Ocean. Proc. 10th annual Offshore Technology Conference, Houston, 3, n° OTC 3264, p. 1835-1841.
- [63] DELTEIL J.R., RIVIER F. et al. (1976) – Structure and sedimentation of the continental margin of the Gulf of Benin, in : Continental Margins of Atlantic Type. An. Acad. Brasileira Cien., 48, sup., p. 51-65.
- [64] DOSSO L., VIDAL P. et al. (1978) – Age précambrien de dolérites de la dorsale Reguibat (Mauritanie). *C.R. Acad. Sc.*, D, (à paraître).
- [65] DUPEUBLE P.A., REHAULT J.P. et al. (1976) – Résultats de dragages et essai de stratigraphie des bancs de Galice et des montagnes de Porto et de Vigo (Marge continentale ibérique). *Mar. Geol.*, 22, n° 2, p. 37-49.
- [66] DUPONT J., LAUNAY J. (1975) – Données nouvelles sur la ride de Norfolk (sud-Ouest Pacifique). *C.R. Ac. Sc.*, 281, D, p. 605-608.
- [67] ESTOCADÉ (Groupe) (1978) – Messinian subaerial erosion of the Stoechades and St-Tropez canyons. A submersible study. *Mar. Geol.*, 27, n° 3-4, p. 247-269.
- [68] FANUCCI F., FIERRO G. et al. (1976) – The continental shelf of Sardinia : structure and sedimentary characteristics. *Boll. Soc. Geol. It.*, 95, p. 1201-1217.
- [69] FERAUD G., BONNIN J. et al. (1977) – Sur quelques datations du volcanisme alcalin de la ligne Açores-Gibraltar et leur contexte géodynamique. *C.R. Acad. Sc.*, 285, D, p. 1203-1206.

- [70] FRANCHETEAU J., CHOUKROUNE P. et al. (1976) – Oceanic fracture zones do not provide deep-section in the crust. *Can. J. Earth Sc.*, 13, n° 9, p. 1223-1235.
- [71] GAIRAUD H., JACQUART G. et al. (1978) – The Jan Mayen ridge, synthesis of geological knowledge and new data. *Oceanologica Acta*, 1, n° 3, p. 335-358.
- [72] GENNESSEAUX M., BIZON G. et al. (1977) – Un affleurement de marnes bathyales serravalliennes sur le plateau occidental des Bouches de Bonifacio (Corse). *C.R. Acad. Sc.*, D, 284, n° 24, p. 2459-2462.
- [73] GENNESSEAUX M., REHAULT J.P. (1975) – La marge continentale corse. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, XVII, n° 4, p. 506-518.
- [74] GERARD J.P., BOILLOT G. (1977) – Geology of the North Irish continental shelf. *Mar. Geol.*, 23, n° 1-2, p. M1-M9.
- [75] GOSLIN J., SIBUET J.C. (1975) – Geophysical study of the easternmost Walvis ridge. South Atlantic. Deep structure. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 86, n° 12, p. 1713-1724.
- [76] GRAU G. (1978) – Seabed reconnaissance by seismic methods. Offshore Brazil, Rio de Janeiro, p. OB-78.01.1 à 01.8.
- [77] HEKINIAN R. et al. (1978) – Volcanics from the Sierra Leone rise. *Nature*, 275, n° 5680, p. 536-538.
- [78] HEKINIAN R., FEVRIER M. (1978) – Comparison between deep-sea hydrothermal deposits recovered from recent spreading ridges. *Cahiers du CNRS*, (à paraître).
- [79] HEKINIAN R., MOORE J.G. et al. (1976) – Volcanic rocks and processes of the mid-Atlantic rift valley near 36° 49' N. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 58, p. 83-110.
- [80] HEKINIAN R., ROSENDALH B.R. et al. (1978) – Hydrothermal deposits and associated basement rocks from the Galapagos spreading center. *Oceanologica Acta*, 1, n° 4, p. 473-482.
- [81] HOFFERT M., KARPOFF A.M. et al. (1978) – Néofonnations et altérations dans des niveaux volcanosédimentaires. *Oceanologica Acta*, 1, n° 2, p. 187-202.
- [82] HOFFERT M., PERSEIL R. (1978) – Hydrothermal deposits sampled by diving saucer in transform fault "A" near 37° N on the mid-Atlantic ridge, Famous area. *Oceanologica Acta*, 1, n° 1, p. 73-86.
- [83] JORON J.L., BRIQUEU L. et al. – Leg 54 : East Pacific rise, Galapagos spreading center and Siqueiros fracture zone. Hydromagmaphile elements : a comparison with the North Atlantic in : Initial Reports DSDP, U.S. Govt print. off., Washington, vol. 54 (à paraître).
- [84] KUMAR N., GAMBOA L.A.P. et al. (1977) – Geologic history and origin of Sao Paulo plateau (Southeastern Brazilian margins), comparison with the Angolan margin and the early evolution of northern South Atlantic in : Initial reports DSDP, Amsterdam to Cape Town. US Govt print. off., Washington, 34, p. 927-945.
- [85] LE PICHON X. (1977) – 1967/1977 : ten years of marine geology and geophysics. *Nature*, 267, n° 5614, p. 765-769.
- [86] LE PICHON X., FRANCHETEAU J. (1978) – A plate tectonic analysis of the Red Sea. Gulf of Aden area. *Tectonophysics*, 46, n° 3-4, p. 369-406.
- [87] LE PICHON X., PAUTOT G. (1976) – Le fond des océans. PUF, Paris.
- [88] LE PICHON X., PAUTOT G. (1976) – Création de la lithosphère océanique. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, 18, n° 4, p. 789-947.
- [89] LE PICHON X., SIBUET J.C. et al. (1977) – The fit of the continents around the North Atlantic ocean. *Tectonophysics*, 38, n° 3-4, p. 169-209.
- [90] LEFORT J.P., SEGOUFIN J. (1978) – Etude comparée des structures profondes et des anomalies magnétiques allongées reconnues en Manche occidentale et en baie d'Audierne : existence possible d'une suture cryptique au N-O du massif armoricain (France). *Tectonophysics*, 46, p. 65-76.
- [91] LIMOND W., PATRIAT P. (1975) – The accuracy of determination of seismic interval velocities from variable angle reflection (disposable sonobuoy) records. *Geoph. J.R. Astr. Soc.*, 43, n° 3, p. 905-938.
- [92] MALOD J., MASCLE J. (1975) – Structures géologiques de la marge continentale à l'Ouest du Spitzberg. *Mar. Geoph. Res.*, 2, n° 3, p. 215-229.
- [93] MASCLE A., BISCARRAT P.A. – The Subu sea, a marginal basin in South East Asia in : Geological and geophysical investigations of continental margins, memoir AAPG, n° 29 (à paraître).
- [94] MASCLE J. (1975) – Les structures diapiriques du Delta du Niger. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, XVII, n° 4, 502.
- [95] MASCLE J. (1975) – Géologie sous-marine du Golfe de Guinée. Thèse de Doctorat d'Etat, Université P. et M. Curie, Paris.
- [96] MASCLE J. (1975) – Atlantic continental margin : two basic structural types. *Symp. on Atlantic Type Continental Margins*. Sao Paulo.
- [97] MASCLE J. (1977) – Le Golfe de Guinée (Atlantique sud) : un exemple d'évolution de marges atlantiques en cisaillement. *Mém. Soc. Géol. Fr.*, nouvelle sér., LV, n° 128, p. 1-102.
- [98] MASCLE J., MELGUEN M. et al. (1975) – A North-South structural profile across the Westernmost Rio Grande Rise : preliminary interpretation. *Symp. on Atlantic Type Continental Margins*, Sao Paulo.
- [99] MASCLE J., RENARD V. (1976) – The marginal Sao Paulo plateau, comparison with the Southern Angolan margin. *An. Acad. Bras. Ci.*, 48, p. 179-190.

- [100] MASCLE J., SIBUET J.C. (1975) – Submarine geology and evolution of the Gulf of Guinea. Symp. on Atlantic Type Continental Margins, Sao Paulo.
- [101] MAUFFRET A. (1976) – Etude géodynamique de la marge des îles Baléares. Thèse Doctorat Sc., Université P. et M. Curie, Paris.
- [102] MAUFFRET A., MONTADERT L. et al. (1978) – Geological setting of Site 372. Geological and geophysical setting of DSDP 372 (Western Mediterranean) in : Initial Reports DSDP, U.S. Govt print. off., Washington, vol. 42, pt1 p. 889-896.
- [103] MELGUEN M., DEBRABANT P. et al. (1978) – Influence des courants profonds sur les faciès sédimentaires du Vema Channel (Atlantique Sud) à la fin du Cénozoïque. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, XX, n° 2, p. 121-136.
- [104] MELGUEN M., LE PICHON X. et al. (1978) – Paléoenvironnement de l'Atlantique Sud. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, XX, (à paraître).
- [105] MOLNAR P., FRANCHETEAU J. (1975) – The relative motion of hot spots in the Atlantic and Indian Oceans during the Cenozoic. *Geoph. J. Royal Astr. Soc.*, 43, p. 763-774.
- [106] MOLNAR P., FRANCHETEAU J. (1975) – Plate tectonics and paleomagnetism : implications for the age of the Deccan traps and the magnetic anomaly time scale. *Nature* 255, n° 5504, p. 128-130.
- [107] MONTADERT L., LETOUZET J. (1975) – Structure de la marge méditerranéenne d'après les études de détail effectuées pour le leg 42 du "GLOMAR CHALLENGER". *Bull. Soc. Géol. Fr.*, XVII, n° 4, p. 519-520.
- [108] MONTADERT L., LETOUZEY J. et al. (1978) – Messinian event : seismic evidence in : Initial Reports DSDP, XLII, pt 1, p. 1037-1050.
- [109] MONTADERT L., ROBERTS D.G. et al. (1977) – From Brest to Aberdeen "GLOMAR CHALLENGER" sails on leg 48. *Geotimes*, p. 19-23, 1976 et trad. française in : *Revue IFP*, XXXII, p. 549-560.
- [110] MONTADERT L., ROBERTS D.G. et al. (1977) – Rifting and subsidence on passive continental margins in the North East Atlantic. *Nature*, n° 5618, p. 305-309.
- [111] MOUGENOT D. (1976) – Géologie du plateau continental portugais (entre le cap Carvoeiro et le cap Sines). Thèse Doctorat 3^e cycle, Université de Rennes.
- [112] NOEL D., MELGUEN M. (1978) – Nannofacies of Cape Basin and Walvis ridge sediments lower cretaceous to Pliocene (leg 40). in : Initial Reports DSDP U.S. Govt print. off., Washington, vol. 40, p. 487-524.
- [113] PASTOURET L., AUFFRET G. (1976) – Observations sur les micro-faciès des roches sédimentaires prélevées sur la marge armoricaine. *Revue IFP*, XXXI, n° 3, p. 401-425.
- [114] PASTOURET L., AUFFRET G. (1978) – Microfacies of some sediments from the Western North-Atlantic - Paleocceanographic implications. in : Initial Reports DSDP, U.S. Govt print. off. Washington, vol. 44, p. 477-501.
- [115] PASTOURET L., AUFFRET G. (1976) – Observations sur les micro-faciès des roches sédimentaires prélevées sur la marge armoricaine. *Revue IFP*, XXXI, n° 3, p. 401-425.
- [116] PASTOURET L., CHAMLEY H. et al. (1978) – Late quaternary climatic changes in western tropical Africa deduced from deep-sea sedimentation off Niger Delta. *Oceanologica Acta*, 1, n° 2, p. 217-232.
- [117] PASTOURET L., OLIVET J.L. et al. (1975) – Particularités de la sédimentation plio-quaternaire en mer d'Alboran. *Commis. Int. Explor. Sc. Mer Médit.*, Monaco XXII, n° 4A, p. 247-248.
- [118] PAUTOT G. (1975) – Marges actives : Pérou et autres exemples. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, XVII, n° 4, p. 529-543.
- [119] PAUTOT G. (1975) – Tectonique et sédimentation sur les marges continentales. Ann. 9^e Congrès Sédim., Nice.
- [120] PAUTOT G., HOFFERT M. et al. (septembre 1978) – Le bassin de Tiki (Pacifique sud central) : relations entre composition-distribution des nodules et profondeur-morphologie du fond. Colloque du CNRS, Gif-sur-Yvette.
- [121] PAUTOT G., MELGUEN M. (1975) – Courants profonds, hiatus sédimentaires et nodules polymétalliques. Ann. 9^e Congrès Sédim., Nice, 8, p. 57-64.
- [122] POULET M. (1977) – Mécanismes de formation des bassins sédimentaires de marge stable. *Bull. Centres Rech. Elf-Aquitaine*, 1, n° 1, p. 131-145.
- [123] POULET M., MONTADERT L. et al. (1975) – Tectonique globale et évolution structurale des bassins sédimentaires in : 9th World Petroleum Congress Proc., 2, PD 1 (2), p. 19-32.
- [124] REcq M., REHAULT J.P. et al. (1976) – Unités structurales de la marge continentale sous-marine de Cannes à Menton d'après la sismique réfraction. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 28, n° 3, p. 323-330.
- [125] REHAULT J.P., REcq M. et al. (1975) – Nouvelles données de sismique réfraction obtenues dans la région de Nice in : *Commis. Int. Explor. Sc. Mer Médit.*, Monaco, XXII, n° 4a, p. 45-46.
- [126] Réunion annuelle des Sciences de la Terre, Montpellier Avril 1975.
- [127] Réunion annuelle des Sciences de la Terre, Paris avril 1976.
- [128] RIFFAUD C., LE PICHON X. (1976) – Expédition "Famous". Albin Michel, Paris.
- [129] SCHLICH R. (1975) – Structure et âge de l'océan Indien occidental. *Soc. Géol. Fr.*, mém. hors série, n° 6, p. 1-103.
- [130] SCHLICH R. (1976) – Searching for Gondwana. *CNRS Res.*, n° 4, p. 17-25.

- [131] SCHLICH R. (1976) – Structure and age of the Western Indian ocean - results of deep sea drilling. 25^e Int. Geol. Congress, Sydney. Print. Union offset, 3, p. 935 (résumé).
- [132] SCHLICH R. (1978) – Echelle chronologique des inversions du champ magnétique terrestre à l'Éocène, le Paléocène et le Crétacé supérieur. Comm. présentée au Coll. Int. en honneur Pr. E. THELLIER, Paris.
- [133] SEGOUFIN J. (1975) – Structure du plateau continental armoricain *in* : A discussion on the geology of the English channel, *Phil. Trans. Royal Soc. London*, ser. A, 279, n° 1288, p. 109-122.
- [134] SEGOUFIN J. (1978) – Anomalies magnétiques mésozoïques dans le bassin de Mozambique. *C.R. Acad. Sc.*, 287, D, n° 3, p. 109-112.
- [135] SEGOUFIN J., LECLAIRE L. et al. (1977) – Les structures du canal de Mozambique. Le problème de la ride de Davie. *Ann. Soc. Géol. Nord*, 47, p. 309-314.
- [136] SHERIDAN R.E., PASTOURET L. et al. (1978) – Seismic stratigraphy of the Blake-Bahama basin related to lithofacies *in* : Initial Reports DSDP, U.S. Govt print. off., Washington, vol. 44, p. 629-646.
- [137] SIBUET J.C., BERTHOIS L. (1978) – Dominant structural trends on western continental margin of Iberia : implications on initial rifting *in* : Initial Reports DSDP. U.S. Govt print. off., Washington, leg 47 B, (à paraître).
- [138] SIBUET J.C., DE CHARPAL O. et al. (1978) – Mouvements verticaux dans la région des bancs de Galice (Atlantique N-E) d'après les résultats du leg 47 B. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 7, XX, (à paraître).
- [139] SIBUET J.C., MASCLE J. (1978) – Plate kinematic implications of Atlantic equatorial fracture zone trends. *J. Geoph. Res.*, 83, n° B7, p. 3041-3421.
- [140] SIBUET J.C., RYAN W.B.F. (1978) – Site 398 : evolution of the west Iberian passive continental margin in the framework of the early evolution of the North Atlantic ocean *in* : Initial Reports DSDP, U.S. Govt print. off., Washington, leg 47 B, (à paraître).
- [141] SIBUET J.C., RYAN W.B.F. et al. (1978) – Geophysical data collected underway on "GLOMAR CHALLENGER", leg 47 B *in* : Initial Reports DSDP, U.S. Govt print. off., Washington, leg 47 B, (à paraître).
- [142] SIBUET J.C., VEYRAT-PEINEY B. (1976) – Interprétation gravimétrique des zones de fractures. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 4, p. 937-939.
- [143] SUBBARAO K.V., VISWANATHA R.V. et al. (1975) – Mid-ocean ridges, oceanic trenches and geodynamics, IUGG Meeting, Grenoble.
- [144] Symposium int. sur la géodynamique du S-O Pacifique, Nouméa 1976, *Technip*, Paris. 1977.
- [145] TISSEAU J. (1978) – Etude structurale du Golfe d'Aden et du bassin de Somalie (océan Indien occidental N). Thèse 3^e cycle, Université Paris Sud.
- [146] VIARIS DE LESEGNO L., GENNESSEAUX M. et al. (1978) – La tectonique néogène et les séries sédimentaires dans le bassin nord-Tyrrhénien. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.* sér. 2, XX, n° 1, p. 29-42.
- [147] VOLAT J.L., PASTOURET L. (1978) – Pacifique est-équatorial : précisions sur la biostratigraphie du Pléistocène supérieur. *C.R. Acad. Sc.*, D, 286, p. 559-562.
- [148] WOOD D.A., VARET J. et al. – The petrology, geochemistry and mineralogy of North Atlantic basalts : a discussion based on IPOD leg 49 *in* : Initial Reports DSDP, U.S. Govt print. off., Washington, vol. 49 (à paraître).

IX — LES RECIFS CORALLIENS

André GUILCHER

Université de Bretagne Occidentale,
Section Géographie, 29000 BREST

Les recherches françaises sur les récifs coralliens ont maintenu le niveau d'activité de la période antérieure. D'une part on a traité de problèmes généraux, d'autre part on s'est livré à des recherches nouvelles dans les divers domaines récifaux, c'est-à-dire dans les Océans Pacifique, Indien et Atlantique en leurs régions intertropicales.

PROBLEMES GENERAUX

Les chercheurs français concernés ont tenu des réunions visant à unifier et à clarifier la terminologie récifale. De ces réunions est sorti un volume de belles présentations, signé de 24 noms [3] contenant des listes de termes en français, anglais et allemand, avec définitions, et très abondamment illustré de façon à lever toute équivoque sur la signification des termes. Une bibliographie sélectionnée est incluse.

F. BOURROUILH [4] s'appuie sur divers cas d'atolls émergés pour présenter une explication des lagons d'atolls, déjà soutenue par d'autres, par karstification subaérienne, et non par subsidence selon la théorie classique de Darwin.

Le problème des doubles et multiples barrières récifales a été examiné par A. GUILCHER [12], qui propose des explications, séparées ou combinées, à cette disposition relativement rare. M. PICHON [21] a signalé un nouvel exemple de double barrière à Bohol (Philippines).

OCEAN PACIFIQUE

La thèse d'Etat de J. COUDRAY [8] contient une description interprétative détaillée du forage effectué dans le récif du Grand Ténia, sur la barrière néo-calédonienne : seul grand forage de barrière réalisé jusqu'ici. Quatre complexes récifaux superposés correspondent à quatre pulsations transgressives majeures. Sur le même sujet, voir COUDRAY [9].

La Polynésie Française bénéficie de stations de recherches en ce domaine [24, 25]. L'étude de ses récifs a été poursuivie ; des descriptions de l'atoll fermé de Taiaro (Tuamotus) et des récifs des Marquises ont été publiées [5, 7]. La rareté, bien connue, des récifs de ce dernier archipel, est précisée (étude des récifs qui cependant existent) et discutée, et des explications en sont proposés [5, 6]. D'autre part, le forage principal de l'atoll de Mururoa (Tuamotus) a été analysé en grand détail [22]. Une autre équipe [14] a étudié en plongée la pente du récif du Nord-Ouest de Moorea (Iles de la Société) et en a caractérisé l'étagement. La connaissance des Madréporaires des Philippines a été améliorée [20].

OCEAN INDIEN

Les récifs de Mascareignes (La Réunion, Maurice, Rodrigue), jusque là peu décrits, ont été l'objet de travaux très détaillés [10, 11, 16, 17, 18, 23]. C'est un ensemble relativement peu développé, mais qui est désormais bien connu. L'atoll de Farquhar, dans l'Ouest de l'Océan Indien, présente des particularités très curieuses dans sa topographie de surface, sur l'origine desquelles on ne peut encore faire que des hypothèses [1]. Le récif de Tuléar, fort bien étudié un peu antérieurement par l'Equipe d'Endoume, a vu certains de ses caractères analysés [26, 27].

OCEAN ATLANTIQUE

Plusieurs récifs des Antilles françaises ont retenu l'attention de chercheurs français, notamment ceux qui comportent une barrière récifale à la Guadeloupe [13] et à la Martinique [2]. LABOREL [15], dont la thèse antérieure (1969) était relative aux récifs du Brésil, a porté son attention sur les récifs de Vermétides et leur récent déclin en ces eaux (1977). En Floride, les récifs actuels ont un aspect décadent, mais ont prospéré entre 5700 ans et 4400 ans B.P. [19]. Au Yucutan, des Madréporaires à 28 m de profondeur ont été datés de 28 000 ans B.P. [19].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BATTISTINI R. (1977) - Un atoll à morphologie énigmatique : Farquhar (Seychelles). *Bull. Ass. Géogr. Fr.*, n° 444, p. 195-204.
- [2] BATTISTINI R. - sous presse. Les récifs coralliens de la Martinique : comparaison avec ceux de l'Océan Indien. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*
- [3] BATTISTINI R., BOURROUILH F., CHEVALIER J.P., COUDRAY J., DENIZOT M., FAURE G., FISHER J.C., GUILCHER A., HARMELIN-VIVIEN M., JAUBERT J., LABOREL J., MONTAGGIONI L., MASSE J.P., MAUGE L.A., PEYROT-CLAUSADE M., PICHON M., PLANTE R., PLAZIAT J.C., PLESSIS Y.B., RICHARD G., SALVAT B., THOMASSIN B.A., VASSEUR P., WEYDERT P. (1975) - Eléments de terminologie récifale indo-pacifique. *Téthys*, vol. 7, n° 1, spécial, 111 p.
- [4] BOURROUILH F. (1975/1977) - Géomorphologie de quelques atolls dits "soulevés" du Pacifique W et SW, origine et évolution des formes récifales actuelles. Sec. Symp. Int. Coraux et récifs fossiles, *Mém B.R.G.M.* n° 89, p. 419-439.
- [5] BROUSSE R., CHEVALIER J.P., DENIZOT M., SALVAT B. (1978) - Etude géomorphologique des îles Marquises. *Cah. du Pacif.*, n° 21, p. 9-74.
- [6] CHEVALIER J.P. (1978) - Les coraux des îles Marquises. *Cah. du Pacif.*, n° 21, p. 243-284.
- [7] CHEVALIER J.P., SALVAT B., RICHARD G., POLI G., BAGNIS R. (1976) - Etude géomorphologique et biologique de l'atoll fermé de Taïaro (Tuamotus). *Cah. du Pacif.*, n° 19, p. 169-288.
- [8] COUDRAY J. (1975) - paru 1976. Recherches sur le Néogène et le Quaternaire marins de la Nouvelle-Calédonie. Thèse d'Etat Montpellier, In : Expédit. Franç. Récifs Corall. Nouv. Cal., Edit. Fondat. Singer-Polignac, Paris, vol. 8, p. 1-276.
- [9] COUDRAY J. (1975/1977) - Sédimentation et diagénèse des formations récifales périphériques à la Nouvelle-Calédonie durant le Quaternaire : contrôle tectonique et climatique. Sec. Symp. Int. Coraux et récifs fossiles, *Mém. B.R.G.M.*, n° 89, p. 407-418.
- [10] FAURE G. et MONTAGGIONI L. (1975) - Le récif corallien de l'île Rodrigue : géomorphologie et répartition des peuplements. *Rec. Trav. St. Mar. Endoume*, h. sér., suppl. 10, p. 271-284.
- [11] FAURE G. et MONTAGGIONI L. (1976) - Les récifs coralliens au vent de l'île Maurice : géomorphologie et bionomie de la pente externe. *Mar. Geol.*, vol. 21, p. M9-M16.
- [12] GUILCHER A. (1976) - Double and multiple barrier reefs in the world. *Studia Soc. Sci. Torunensis*, Torun, vol. 8, sect. C, n° 4-6 (Mélanges Galon), p. 85-99.
- [13] GUILCHER A. et MAREC A. (1978) - Le récif-barrière et le lagon du Grand Cul-de-Sac Marin (Guadeloupe, Antilles Françaises). Géomorphologie et sédiments. *Oceanologica Acta*, vol. 1, p. 435-444.
- [14] JAUBERT J., THOMASSIN B.A., VASSEUR P. (1976) - Morphologie et étude bionomique préliminaire de la pente externe du récif de Tiahura, Ile de Moorea (Polynésie Française). *Cah. du Pacif.*, n° 19, p. 299-323.

- [15] LABOREL J. (1977) – Are reef-building Vermetids disappearing in the South Atlantic ? *Proc. Third Int. Symp. Coral Reefs*, p. 234-237.
- [16] MONTAGGIONI L. (1975) – Histoire géologique des récifs coralliens de l'archipel des Mascareignes. *Cah. Centre Univ. Réunion*, n° 6, spéc. sci., p. 97-110.
- [17] MONTAGGIONI L. (1975/1977) – Structure interne d'un récif corallien holocène (Ile de la Réunion). Sec. Symp. Int. Coraux et récifs fossiles, *Mém. B.R.G.M.*, n° 89, p. 456-466.
- [18] MONTAGGIONI L. (1978) – Les récifs coralliens des îles de La Réunion et de Maurice. Thèse d'Etat Université Aix-Marseille (non publié).
- [19] NESTEROFF W. (1975/1977) – Estimation au C^{14} des époques d'installation des récifs coralliens en Floride et au Yucatan, Mexique. Sec. Symp. Int. Coraux et récifs fossiles, *Mém. B.R.G.M.*, n° 89, p. 492-496.
- [20] PICHON M. (1977) – Recent studies on the reef corals of the Philippine Islands and their zoogeography. *Proc. Third Int. Coral Reef Symp.*, Miami, p. 149-154.
- [21] PICHON M. (1977) – Physiography, morphology and ecology of the double barrier reef of North Bohol (Philippines). *Proc. Third Int. Coral Reef Symp.*, Miami, p. 261-267.
- [22] REPELLIN P. (1977) – Contribution à l'étude d'un récif corallien : le sondage "Colette", atoll de Mururoa (Polynésie Française). *Cah. du pacif.*, n° 20, p. 1-210.
- [23] ROBERT R. (1978) – Situation, géomorphologie, bionomie du récif frangeant de l'Etang-Salé dans le Sud-Ouest de l'île de la Réunion. Madagascar, *Rev. de Géogr.*, n° 32, p. 41-54.
- [24] SALVAT B. (1976) – Un programme interdisciplinaire sur les écosystèmes insulaires en Polynésie Française. *Cah. du pacif.*, n° 19, p. 397-406.
- [25] SALVAT B. (1977) – "Antennes" du Museum d'Histoire Naturelle et de l'Ecole Pratique des Hautes Etudes en Polynésie Française. *J. Soc. Océanistes*, vol. 31, n° 48, p. 301-310.
- [26] WEYDERT P. (1974) – (paru 1975). Morphologie et sédimentologie de la pente externe de la partie Nord du Grand Récif de Tuléar (Sud-Ouest de Madagascar) : nature et répartition des éléments organogènes libres. *Mar. Geol.*, vol. 17, p. 299-338.
- [27] WEYDERT P. (1975/1977) – Relations entre les variations de la direction des vents dominants et la genèse d'une barrière récifales : l'exemple du Grand Récif de la baie de Tuléar (côte Sud-Ouest de Madagascar). Sec. Symp. Int. Coraux et récifs fossiles, *Mém. B.R.G.M.*, n° 89, p. 467-479.

X – Océanographie Chimique

Pierre COURTOT

Institut d'Etudes Marines,
Université de Bretagne Occidentale, 29000 BREST

La situation de l'océanographie chimique en France en 1975 était caractérisée par un nombre très restreint de laboratoires travaillant dans ce domaine. Un effort sérieux a été réalisé pendant cette période, permettant aux laboratoires de se développer, d'intensifier leur coopération internationale, et d'étendre leurs contacts avec des chimistes non marins, qui se sont tournés vers cette discipline en pleine expansion. Le Centre National de la Recherche Scientifique a favorisé ce développement en finançant 3 actions thématiques programmées (en 1974, 1976 et 1977) portant sur l'océanographie chimique et le Centre National pour l'exploitation des Océans a de son côté fourni les moyens à la mer nécessaires, et un certain nombre de contrats de recherche.

Un Colloque rassemblant la plupart des chercheurs français dans ce domaine s'est tenu à Paris les 7 et 8 décembre 1978 [4]. Il a fait le point des recherches menées dans le cadre des ATP "océanographie chimique" et un recueil des publications sera disponible début 1979 [4].

Les efforts sont déployés dans deux grandes directions :

- la recherche d'une méthodologie qui s'emploie à trouver de nouvelles méthodes d'analyse, à les perfectionner pour les rendre plus sensibles et mieux adaptées au travail en mer, en tendant vers la plus grande automatisation possible ;
- la chimie des océans, qui utilise tous les moyens chimiques à notre disposition pour élucider les réactions compliquées qui se déroulent dans le milieu marin.

Méthodologie Analytique

1 – Métaux lourds

Les métaux lourds font l'objet de nombreux travaux. Le problème de leur concentration absolue est posé, mais aussi celui de la forme chimique sous laquelle ils existent dans le milieu, qui pourra conditionner leur utilisation par les organismes vivants : la complexation d'un métal par un composé organique (ligand) lui confère des propriétés différentes de celles de ses dérivés minéraux.

Deux types de méthodes sont principalement utilisés :

- La spectrophotométrie à absorption atomique

Grâce à la technique d'atomisation sans flamme, de très grande sensibilité, le dosage direct de certains éléments est possible, sans extraction préalable : sensibilité de $0,05 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ pour le zinc [8].

- La redissolution anodique par polarographie à impulsions (mode différentiel)

Cette méthode permet de doser jusqu'à $0,005 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ de mercure directement dans l'eau de mer. Pour le zinc et le cadmium, la sensibilité est de $0,02 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$, et de $0,04 \mu\text{g} \cdot \text{l}^{-1}$ pour le cuivre [5].

2 – Sels nutritifs

La méthode automatique d'analyse des sels nutritifs est bien au point maintenant [10], et elle permet de suivre en temps réel des phénomènes aussi variables que les systèmes d'upwellings [23]. Les dernières améliorations concernent le dosage de l'ammonium [10].

3 – Acides gras

La chromatographie gazeuse permet de suivre les variations individuelles de ces composés dans le milieu, et d'obtenir leur concentration totale [12, 14, 15]

– hydrocarbures

La chromatographie gazeuse est la plus utilisée [12, 13, 16]. Des améliorations ont été apportées, en utilisant les colonnes capillaires [16]. Le couplage chromatographie gazeuse-spectrométrie de masse permet une détermination plus complète.

La méthode de dosage global la plus sûre est la spectrophotométrie infra-rouge [16].

La catastrophe de l'Amoco-Cadiz [24] a entraîné la mise en route d'un programme de recherche de l'évolution des hydrocarbures pétroliers dans l'eau, le sédiment [16], et les organismes vivants.

Il est possible d'identifier certains hydrocarbures polycycliques aromatiques à l'aide de la fluorescence quasi-linéaire à 4K [4b].

4 – Détergents

L'absorption atomique a permis de mettre à la disposition des analystes une méthode de dosage des détergents des différentes classes dans l'eau de mer et dans l'eau douce [9].

CHIMIE DES OCEANS

1 – Les réactions et les échanges aux interfaces

Interface air-mer

Il a été montré que la mer, par l'intermédiaire de la microcouche de surface, joue un rôle important dans l'enrichissement en métaux lourds de l'aérosol marin [3]. De même, les acides gras et les hydrocarbures peuvent subir deux modes de transfert : l'éjection et l'évaporation [22].

Le cycle du soufre est en partie lié aux transferts du sulfure de diméthyle qui représente plus de 30 % du flux total des composés soufrés [17, 18].

Interface eau-sédiment

La minéralisation du glucose à l'interface eau-sédiment a été étudiée à l'aide de glucose marqué au carbone – 14 [2].

L'étude minéralogique et géochimique de la couche superficielle de sédiments a mis en évidence l'importance des phénomènes de bioturbation [11].

L'absorption des éléments traces dissous dans l'eau de mer, sur des particules minérales en suspension, a été étudiée en utilisant des traceurs comme le zinc – 65 et le sélénium – 75 : les substances organiques présentes jouent un rôle important dans ce processus [7].

2 – Substances chimiques et production primaire

Plusieurs campagnes interdisciplinaires CINECA ont montré le rôle important joué dans la production primaire intense des systèmes d'upwellings au large du Sahara occidental, par

certaines composés chimiques [23]. La mesure automatique des sels nutritifs dans ces systèmes très variables permet leur étude détaillée beaucoup mieux que ne peuvent le faire les approches globales température-salinité.

La mise en solution importante d'acides gras dans les eaux de la rade de Brest lors des blooms phytoplanctoniques a été élucidée pour la première fois [14, 15].

3 – Substances organiques d'origine marine

Les efforts ont porté :

- soit sur l'extraction et la détermination de structure de substances d'intérêt pharmacologique potentiel ;
- soit sur des essais d'activité pharmacologique d'extraits d'algues, sans recherche systématique de structure ;
- soit sur des déterminations de structures de composés organiques présents dans le sédiment.

Dans la première catégorie, on peut citer :

- les prostaglandines [4a] ;
- les composés bromés [1] ;
- les guanidines [21].

Dans la deuxième catégorie, on trouve les travaux sur l'activité antibiotique et antimotique d'algues [25], ou antifongiques et antibiotiques de diatomées [19].

Dans la troisième catégorie, on peut citer les travaux sur les stéroïdes aromatiques.

4 – Physico-chimie de l'eau de mer

Un effort est mené, et il semble avoir abouti, pour décrire une équation de l'état de l'eau de mer qui permette d'améliorer la précision des mesures de salinité par conductimétrie, en étalonnant à l'aide de mesures de densité [20].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] BRUNEAU Y., CODOMIER L., COMBAUT G. et TESTE J. (1978) – Etude comparative de composés halogénés du *Falkenbergia rufolanosa* et de l'*Asparagopsis armata*. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 286, 603.
- [2] CAHET G. et GADEL F. – Observations sur les transformations de glucose marqué à l'interface eau-sédiment d'un milieu lagunaire méditerranéen. Voir réf. 4.
- [3] CHESSELET R., PINTA M., BUAT-MENARD P., BARON D. – Accumulation et transfert de métaux en traces à l'interface air-mer. Voir réf. 4.
- [4] CNRS (1979) – Recueil des conférences et communications présentées au Colloque ATP "Océanographie Chimique", Paris (à paraître).
- [4a] CRABBE P. – Isolement de prostaglandine PGA 2 des coraux. Modifications structurales. Etude stéréochimique. Voir réf. 4.
- [4b] EWALD H., LAMOTTE M., JOUSSOT-DUBIEN J. – Identification de marqueurs géochimiques dans les extraits de sédiments marins par leur spectre de fluorescence quasi-linéaire à 4K. Voir réf. 4.
- [5] FUKAI R. et HUYNH-N'GOC (1976) – Direct determination of mercury in sea water by anodic stripping voltammetry with graphite electrode. *Anal. Chim. Acta*, 83, 375.
- [6] GENTIAN P. (1977) – Dosage des alcanes dans la rade de Brest. Variations saisonnières et facteurs extérieurs. Thèse de Spécialité, UBO, Brest.
- [7] JAFFREZIC-RENAULT N., HUNTER K.A., LAMBERT C. et CHESSELET R. – Etude in vitro de l'absorption du Zn - 65 et du Se - 75 sur des particules d'aluminium dans l'eau de mer. Voir réf. 4.
- [8] LE BIHAN A. et COURTOT-COUCPEZ J. (1975) – Détermination directe du zinc dans l'eau de mer par spectrophotométrie d'absorption atomique sans flamme. *Analisis*, 3, 559.

- [9] LE BIHAN A. et COURTOT-COUCPEZ J. (1977) – Détermination de traces de détergents anioniques et non-ioniques par spectrométrie d'absorption atomique sans flamme. *Analytical Letters*, 10, 759.
- [10] LE CORRE P. et TREGUER P. (1976) – Dosage de l'ammonium dans l'eau de mer : comparaison entre deux méthodes d'analyse automatique. *J. Cons. Intern. Explor. Mer*, 36, 289.
- [11] MONACO A., LAMBERT C., CHESSELET R. et BUAT-MENARD P. – Etude critique de la minéralogie et de la géochimie de l'interface eau-sédiment en Atlantique Equatorial. Voir réf. 4.
- [12] MARTY J.C., SALIOT A. et TISSIER J.M. (1977) – Inventaire, répartition et origine des hydrocarbures oliphatiques et polyaromatiques dans l'eau de mer, la microcouche de surface et les aérosols marins en Atlantique Tropical Est. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 286 D, 833.
- [13] MARTY J.C. et SALIOT A. (1976) – Hydrocarbons (normal alkanes) in the surface microlayer of sea water. *Deep sea Res.* 23, 863.
- [14] MARTY Y. et COURTOT P. (1977) – Variations de la concentration des acides gras libres dissous en rade de Brest. *Actualités Bioch. Marine*, 101.
- [15] MARTY Y. (juin 1976) – Méthode de dosage des acides gras libres dissous dans l'eau de mer. Application à l'étude de leurs variations dans les eaux de la rade de Brest. Thèse de spécialité, UBO, Brest.
- [16] MOREL G. et COURTOT P. (1978) – Résultats préliminaires de la pollution pétrolière par l'Amoco-Cadiz. Teneurs en hydrocarbures totaux dans les eaux de mer de la rade de Brest au Cotentin (mars-avril 1978). *Publications du CNEOX*, Actes de Colloques, n° 6.
- [17] NGUYEN B.C. et BONSANG B. (1977) – Echanges entre l'océan et l'atmosphère de composés soufrés gazeux et particulaires. *J. Rech. Océanogr.*, 2, 43.
- [18] NGUYEN B.C., GAUDRY A., BONSANG B. et LAMBERT G. (1978) – Reevaluation of the role of dimethylsulphide in the sulfur budget. *Nature*, 275, 637.
- [19] PESANDO D., GNASSIA-BARELLI M., GUEMO E., RINAUDO R. et DEFAYE J. – Isolement, étude structurale et propriétés antibiotiques et antifongiques d'un composant polysaccharidique de la diatomée marine. *Chaetoceros Landeri*. Voir réf. 4.
- [20] POISSON A. (1978) – Relation conductivité électrique-salinité-masse volumique de l'eau de mer. Influence des variations de composition ionique. Thèse d'Etat, Université Paris VI.
- [21] ROBIN Y. et GUILLOU Y. (1977) – An ion-exchange chromatographic method for the isolation of octopine from *Sepia officinalis* muscle. *Anal. Biochem.* 83, 45.
- [22] SALIOT A. et MARTY J.C. – Etude chimique de l'interface air-mer : Constituants organiques de l'eau sous-jacente, la microcouche de surface, l'écume et les aérosols. Voir réf. 4.
- [23] TREGUER P. et LE CORRE P. (1976) – Contribution à l'étude des sels nutritifs et de la matière organique dissoute dans l'eau de mer. Caractéristiques chimiques du Golfe de Gascogne et des upwellings côtiers de l'Afrique du Nord-Ouest. Thèse de Doctorat d'Etat, UBO, Brest.
- [24] Université de Bretagne Occidentale. Institut d'Etudes Marines. Catastrophe de l'Amoco-Cadiz. Rapport préliminaire, juin 1978.
- [25] VERBIST J.F. et coll. – Algues fixées de la côte Atlantique française contenant des substances antibiotiques et antimittotiques. Voir réf. 4.

XI — LA GEOCHIMIE DES OCEANS

Roger CHESSELET et Claude LALOU
Centre des Faibles Radioactivités, 91190 GIF SUR YVETTE

Nous avons considéré dans ce rapport, les travaux effectués en France dans le domaine de la géochimie des océans, traitant principalement de l'étude de la "*dynamique des échanges de matière*" dans l'hydrosphère marine ; les lieux critiques de ces phénomènes étant les *interfaces* : continent-océan, océan-atmosphère, et océan-sédiment. Nous compléterons ce rapport par quelques considérations sur les données récemment acquises sur le paléo-environnement marin.

Interface : Continent-Océan

Cette interface correspond à la zone de mélange des eaux fluviales et marines ; elle est caractérisée par des gradients physico-chimiques très marqués et très divers concernant non seulement les éléments naturels, mais aussi les éléments introduits par l'homme. Cette zone est essentiellement caractérisée par des apports à l'océan.

Le rôle majeur du transport particulaire pour la plupart des éléments chimiques (à l'exception des alcalins, alcalino-terreux, quelques métalloïdes. .) a été établi. Le flux global (dissous + particulaire) mesuré dans les grands fleuves a été comparé au flux théorique correspondant à la quantité de matière produite lors de l'érosion des continents. Cette comparaison montre que le flux mesuré est équivalent au flux théorique pour la plupart des éléments. Cependant un excès (flux mesuré, flux théorique) de Br, Sb, Pb, Cu, Zn a été mis en évidence. Un flux additionnel d'origine atmosphérique a été invoqué pour équilibrer cet excès d'éléments chimiques introduits dans l'estuaire [1, 2].

En ce qui concerne les processus de désorption, ceux-ci semblent limités à quelques estuaires partiellement mélangés de la zone européenne [3]. Par ailleurs certains éléments (U, F, Mg, etc. . .) ne sont pas affectés par leur transit dans l'estuaire [4].

Les études en milieu estuarien ont été complétées par celles effectuées en milieu littoraux et lagunaires [5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12a, 12b]. Les éléments : Pb, Zn, Cu, Cd, Hg ont été principalement étudiés et l'on a suivi ces éléments dans les différentes phases : dissoute, colloïdale, solide ou figurée [13, 14, 15, 16].

Interface : Océan-Atmosphère

Il est reconnu depuis peu que les apports à l'océan en provenance de l'atmosphère sont, dans de nombreux cas, aussi importants que ceux provenant des fleuves. Ceci concerne l'un des aspects critiques des mécanismes de pollution du plein océan. De plus, cette interface est caractérisée par des mécanismes d'*échanges* de matière très importante entre l'océan et les continents via l'atmosphère.

L'océan est un puits pour les importantes quantités de SO_2 produites sur les continents par l'oxydation naturelle des substances biologiques (ou l'activité industrielle). Il a cependant été montré que l'injection par l'océan est responsable d'environ 50 % de la totalité du soufre présent dans l'atmosphère marine et que l'oxydation du SO_2 d'origine marine représente la moi-

tié de ce flux qui serait en grande partie issu de l'oxydation du DMS (dyméthyl sulphure) accumulé dans la microcouche océanique [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27]. Le cycle des halogènes, Cl, Br, I à l'état gazeux dans l'atmosphère sous forme organique ou inorganique est gouverné, lui aussi, par l'intensité de la source océanique. L'océan est aussi un puits très actif vis-à-vis de la vapeur d'HCl produite par l'interaction du SO₂ avec les aérosols marins. Il n'en est pas de même pour Br et I à l'état gazeux d'origine marine qui paraissent pouvoir pénétrer dans les hautes couches de l'atmosphère et même dans la stratosphère [28, 29].

Les concentrations relatives très élevées en certains métaux lourds comme Zn, Cu, Pb, Hg, Se, observées dans l'atmosphère marine ne peuvent être reliées directement à la présence de poussières d'origine continentale. On détecte au contraire l'existence d'un "bruit de fond" d'aérosols très enrichis en ces éléments [30, 31]. L'origine première de la composition de ces aérosols reste à élucider, mais on évoque à ce propos l'importance de la source volcanique [32].

On a pu mettre en évidence le fait que la mer elle-même joue un rôle non négligeable dans l'enrichissement en métaux lourds de l'aérosol collecté au-dessus de l'océan, loin de toute source immédiate de pollution [33, 34], cependant que l'apport atmosphérique en métaux lourds exerce une influence certaine sur la chimie des métaux en trace dans l'océan [35].

Interface : Océan-Sédiment

Cette interface se trouve, comme l'interface continents-océans, dans une zone extrêmement critique au point de vue de l'existence de gradients conduisant à des échanges intenses entre le milieu solide et le milieu liquide. Se surajoutent à ces échanges, les apports volcaniques dont on cherche à mieux comprendre les mécanismes et l'intensité, pour mieux évaluer les ressources minérales océaniques. En termes de budget, cette interface est caractérisée par des apports et des départs.

Le flux de particules marines en transit vers les grands fonds marins équilibre l'apport atmosphérique avec une constante du temps de l'ordre de quelques semaines. Les particules marines sont donc un vecteur important des métaux trace injectés dans l'océan par l'atmosphère.

On a montré que la quasi totalité des argiles en suspension dans l'Atlantique tropical, avaient une source atmosphérique ; que la quasi totalité du plomb particulaire en suspension avait une origine industrielle mais qu'il n'en était pas de même pour le sélénium pour lequel l'activité volcanique serait l'origine principale [36].

Par ailleurs, les mécanismes de transport et de dissolution des carbonates et de baryte sous forme de fines particules ont été étudiés [37, 38, 39]. A l'interface eau-sédiment, on a étudié deux types de perturbations qui affectent cette interface : la remise en suspension du sédiment par des phénomènes hydrodynamiques : on a montré que même dans des endroits très calmes de la plaine abyssale de l'Atlantique Nord, et par plus de 5000 mètres de fond où la vitesse des courants est inférieure à 1 cm/sec, il existe une remise en suspension qui affecte surtout les argiles en les remontant jusqu'à environ 1000 mètres du fond. On a pu expliquer ce phénomène par la turbulence à l'approche de la surface eau-sédiment [40]. On a pu montrer par ailleurs, dans la plaine abyssale de l'Atlantique équatorial, que le sédiment était remanié jusqu'à plusieurs centimètres de profondeur par l'activité biologique qui trie certains constituants et enfouit les minéraux en fonction de leur taille [41].

L'existence de ces perturbations explique en partie le fait que les enrichissements observés dans la matière en suspension près du fond ne sont pas retrouvés dans le sédiment lui-même [42]. Dans ce contexte, la géochimie du fer et du manganèse particuliers en suspension à l'approche de sédiment et dans les premières couches de celui-ci a été étudiée [43, 44, 45, 46].

La géochimie de la matière organique à l'interface océan-sédiment depuis les talus continentaux jusqu'au sédiment pélagique a fait l'objet d'études intensives [47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56].

Au cours de l'ensemble des campagnes ORGON (I, II, III, IV) (Mer de Norvège, Bassin de Cariaco, et cône de l'Amazonie et Atlantique nord-est) la géochimie organique des sédiments marins profonds a été étudiée [57].

Les lipides, en particulier les acides gras saturés et insaturés, les stérols et les hydrocarbures saturés et polyaromatiques ont été dosés qualitativement et quantitativement par chromatographie en phase gazeuse et chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse, dans l'eau sus-jacente au sédiment et l'eau interstitielle.

Les résultats indiquent :

- l'originalité de l'interface eau de mer - sédiment marquée par une discontinuité de composition entre l'eau de mer et le sédiment,
- dans certaines zones où les courants de fond sont faibles, des transferts de matériel dissous et particulaire entre l'eau de mer et le sédiment,
- la richesse des eaux interstitielles en marqueurs liés à l'activité des microorganismes du sédiment. De plus, la recherche de traceurs de l'origine marine ou terrestre de la matière organique a été développée, voir détail des références en [57].

Il faut rappeler par ailleurs ici que l'étude du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ du carbone organique du plancton marin a montré que le fractionnement isotopique entre le tissu organique du plancton et le carbone minéral utilisé par photosynthèse était partiellement contrôlé par la température des eaux et ne pouvait être corrélé aux variations de PCO_2 des eaux de surface. Par ailleurs, la constante de ce rapport dans une masse d'eau superficielle bien définie a été notée, ainsi que la stabilité dans la matière particulaire jusqu'à la surface du sédiment. Ces deux propriétés font du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ du carbone organique un indicateur potentiel de l'origine du carbone organique particulaire dans l'océan [58].

À l'interface eau-sédiment se forment des concrétions polymétalliques. Bien que les mesures de décroissance d'éléments radioactifs dans les couches d'oxyde semblent montrer des vitesses de croissance lente, il a été nécessaire de les remettre en question en raison de nombreuses observations ou mesures qui ne peuvent être expliquées dans un contexte de croissance lente [59, 60, 61, 62, 63, 64, 65]. On a d'une part, montré que les mesures de Be^{10} et Al^{26} confortaient les vitesses de croissance lente, alors que dans le même échantillon les caractéristiques structurales venaient à l'encontre d'une croissance lente. On a pu de même dans cet échantillon mettre en évidence un gradient de ^{232}Th de forme exponentielle, mais qui ne peut en aucun cas être attribué à une décroissance radioactive [66, 67, 68].

Il n'existe qu'une source répondant aux caractéristiques de surconcentration et d'existence épisodique, c'est le volcanisme ou l'hydrothermalisme sous marin. C'est pourquoi des études de dépôts hydrothermaux connus ont été entreprises et, plus spécialement en 1978, l'étude de la zone de fracture de La Romanche. Dans cette zone, on a prélevé des échantillons sur la dorsale de la Sierra Leone, au nord de la Fosse de la Romanche et trouvé qu'une phase éruptive avait eu lieu, il y a 45 millions d'années, dans cette zone.

On a aussi pu montrer par l'étude de dépôts polymétalliques interstratifiés dans des carottes de l'océan Atlantique que les sédiments au contact des dépôts étaient marqués par une forte empreinte hydrothermale alors que, pendant les épisodes sans dépôts polymétalliques on avait une sédimentation calcaire normale [69, 70, 71, 72, 73, 74].

Par ailleurs, l'environnement volcano-sédimentaire d'origine récente a été étudié en particulier dans le site de Vulcano en Méditerranée [75, 76, 77, 78].

Paléoenvironnement marin. L'étude comparative de la variation du rapport $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de foraminifères benthiques (sensibles à la variation de la composition isotopique de l'eau)

et pélagiques (sensibles à ces mêmes variations, mais en plus, théoriquement, aux variations de température) a montré qu'en fait les foraminifères pélagiques n'étaient pas de bons enregistreurs des conditions thermiques superficielles, ce qui a conduit à développer une étude nouvelle sur la composition isotopique des diatomées.

Cependant, la comparaison des foraminifères benthiques et pélagiques a permis d'apporter certains éléments de paléocéanographie et de paléocourantométrie, dont les principaux sont :

- Pendant les périodes glaciaires, l'océan Atlantique Nord (Mer de Norvège) ne fonctionnait plus comme source d'eau profonde alimentant toute la circulation océanique [80].
- On a montré que les foraminifères pélagiques, dans les zones d'apport d'eau douce, pouvaient refléter les variations de pluviosité sur le continent voisin. Une telle étude sur l'embouchure du Niger a été terminée et a conduit à entamer le problème de l'évolution de la Mousson [81].
- Après avoir mis au point, au cours des dernières années la méthode d'extraction et d'analyse de la composition isotopique de l'oxygène des diatomées, une première application a été faite sur une carotte du Pacifique, en comparant les compositions isotopiques des foraminifères et des diatomées qui a démontré la possibilité d'utiliser les diatomées comme indicateur paléoclimatique [82].

L'analyse palynoplantologique de trois carottes prélevées dans la plaine abyssale au large des îles britanniques, a permis d'observer outre des pollens et des spores, une importante fraction organique composée de kystes de dinoflagellés.

D'un point de vue quantitatif, l'évolution verticale de la population des dinoflagellés montre une décroissance des valeurs de la base au sommet de l'Holocène. La productivité de ces micro-organismes phytoplanctoniques étant liée à la disponibilité de sels minéraux dissous dans les eaux de surface, ces dernières devaient être plus riches en nitrates, phosphates et vitamines dans la première partie de l'Holocène que dans le présent. Ainsi est-on amené à envisager, entre 10.000 ans BP et 5.000 ans BP environ, un renouvellement actif des matières nutritives dans la zone considérée. La cause principale pourrait en être la remontée en surface d'eau intermédiaire ou du fond par résurgence ou "up-welling". Selon les lois de l'hydrodynamique générale, la manifestation du phénomène d'up-welling à l'ouest des îles britanniques nécessite des conditions météorologiques engendrant une situation permanente à semi-permanente de vents de secteur est à nord-est. Ce type de temps est caractérisé par une dorsale anticyclonique centrée sur les îles Féroé, la Grande-Bretagne et une grande partie de l'Europe de l'Ouest. Cette situation aurait persisté durant la première partie de l'Holocène puis se serait modifiée jusqu'à la position moyenne actuelle déterminée par une zone de basse pression centrée à la latitude des Açores [83, 84].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] MARTIN J.M. and MEYBECK M. (1978) - Elemental mass-balance of material carried by world major rivers *Marine Chemistry* (sous presse).
- [2] MARTIN J.M. and MEYBECK M. (1978) - Major elements content in river dissolved and particulate loads in "Biogeochemistry of estuarine sediments" E.D. Goldberg Ed. UNESCO PRESS (sous presse).
- [3] MARTIN J.M., HØGDAHL O., PHILIPPOT J.C. (1976) - Rare earth elements supply to the ocean. *J. Geophys. Research* 81, 18, 3119-3124.
- [4] MARTIN J.M., NIJAMPURKAR V., SALVADORI F. (1978) - Uranium and thorium isotopes behaviour in estuarine systems. In "Biogeochemistry of estuarine sediments" E.D. Goldberg Ed. UNESCO PRESS (sous presse).
- [5] GOULEAU D. (1975) - Les premiers stades de la sédimentation sur les vasières littorales atlantiques. Rôle de l'émersion. Thèse d'Etat, Nantes.
- [6] GOULEAU D. (1976) - Ascension capillaire et variations de la teneur en eau de la pellicule superficielle des vasières découvrantes, (Baies de Bourgneuf, de l'Aiguillon et d'Oléron). *J. Rech. Océanogr.*, vol. 1, n° 3, p. 19-34.
- [7] GOULEAU D. (1976) - Le rôle des diatomées benthiques dans l'engraissement rapide des vasières atlantiques découvrantes. *C.R. Acad. Sci. Paris, sér. D*, t. 283, p. 21-23.

- [8] GOULEAU D. (avril 1976) – Rôle de l'évapo-ascension capillaire sur les propriétés chimiques des eaux interstitielles de la pellicule superficielle des vasières littorales découvrantes. *C.R. 4^e réunion ann. Sci. de la Terre*, Paris, p. 205.
- [9] BARBAROUX L. (avril 1976) – Approche sédimentologique et géodynamique globale de la transition continent-océan. Essai de modèle analogique général. *C.R. 4^e Réunion ann. Sci. de la Terre*, Paris, p. 29.
- [10] GOULEAU D., ROBERT J.M. (1977) – Confirmation expérimentale du rôle d'une diatomée benthique, *Navicula ramosissima* (Agardh) Cleve, dans la production de formations mucilagineuses stabilisatrices des vasières marines littorales. *C.R. Acad. Sci. Paris*, sér. D, t. 284, p. 1915-1918.
- [11] MONACO A. (1977) – Géochimie des milieux d'estuaire : comparaison entre les suspensions fluviales et les dépôts prodeltaïques de l'Aude. *Chemical Geology*, 20 : 45-55.
- [12a] ALOISI J.C., CAUWET G., GADEL F., GOT H., MONACO A., PAGNON M., VILE F. (1975) – Sédimentologie et géochimie des dépôts superficiels du Golfe du Lion septentrional. Participation du Rhône à l'alluvionnement récent. 3^e session annuelle des Sciences de la Terre, Montpellier.
- [12b] ALOISI J.C., CAUWET G., GADEL F., GOT H., MONACO A., VILE F., CAUSSE C., PAGNON M. (1976) – Contribution à l'étude de la sédimentation récente et de la pollution sur le plateau continental du Golfe du Lion entre For-sur-Mer et Sète. *Bull. B.R.G.M.*, IV, 2, 69-83.
- [13] OTTMANN F., ROBIN M. (1976) – Etude comparative de la fixation du mercure sur les sédiments estuariens et sur la kaolinite. *Rev. Int. Méd.* tomes XLI - XLII, 1976, p. 105-126.
- [14] FRENET-ROBIN M. et OTTMANN F. (1977) – Phénomènes de fixation et désorption du mercure sur la vase en suspension dans l'estuaire de la Loire. *J. Rech. Océanogr.*, Vol. II, n° 3, p. 11-20.
- [15] FRENET-ROBIN M. et OTTMANN F. (1978) – Comparative study of the fixation of inorganic mercury on the principal clay minerals and the sediments of the Loire Estuary. *Estuarine and Coastal Marine Sci.* Academic Press. 24-28 Oval Road, London, NW1.
- [16] DESAUBLIAUX G., FABLET A., FRENEL P., LE DOUAREC P., OTTMANN F., QUERE J. (1978) – Conditions de mélange des eaux douces et salées dans l'estuaire externe de la Loire. Conséquences pour la pollution bactérienne. *J. Rech. Océanogr.*, vol. III, n° 1, p. 29 à 51.
- [17] BONSANG B. (1974) – Contribution à l'étude du cycle et de la répartition des composés du soufre dans la basse atmosphère. Thèse de Doctorat 3^e cycle, Paris.
- [18] NGUYEN B.C., BONSANG B., LAMBERT G. (1974) – The atmospheric concentration of sulfur dioxide and sulfate aerosols over antarctic, subantarctic areas and ocean. *Tellus*, vol. 26, n° 1, 2, p. 241-249.
- [19] NGUYEN B.C., BONSANG B., LAMBERT G., PASQUIER J.L. (1975) – Résidence time of sulfur dioxide in the marine atmosphere. Présenté à : European Geophysical Society Meeting. Trace substances in the atmosphere from source to sink Septembre 1974, Trieste (Italie). *Pure and Applied Geophysics*, vol. 123, p. 489-500.
- [20] BONSANG B., NGUYEN B.C., PAUGAM J.Y. (1976) – Sur la formation de gaz sulfurés et de noyaux d'Aitken dans l'atmosphère le long du littoral. *C.R. Acad. Sc. Paris*, série D. n° 11, T. 283, p. 1285.
- [21] NGUYEN B.C., BONSANG B., LAMBERT G. (1976) – The skin of the ocean and its influence on atmospheric sulfur compounds. In : *The skin of the ocean*. JOA Edinburgh, Book of Abstracts, Food and Agriculture Org. of the United Nations, Rome.
- [22] NGUYEN B.C., BONSANG B., GAUDRY A. and LAMBERT G. (1977) – Oxidation processes of sulfur components in the atmosphere. IAGA/IAMAP Joint assembly, juillet/aout Seattle, USA.
- [23] BONSANG B., NGUYEN B.C., GAUDRY A. and LAMBERT G. (1977) – Variation of the chemical composition of marine aerosols in a high biological productivity area. Ninth International Conference on Atmospheric Aerosols condensation and Ice Nuclei. Galway, Ireland Proceedings, Pergamon Press, (sous presse).
- [24] PAUGAM J.Y., NGUYEN B.C., BONSANG B. et FONGANG S. (1977) – Production de noyaux Aitken et de composés sulfurés dans l'air au-dessus d'une zone littorale. *Chemosphere*, n° 6, p. 333-339.
- [25] NGUYEN B.C., BONSANG B., (1978) – Transport of continental sulfur compounds over the Mediterranean. Proceedings of the 13th International Colloquium, Paris, France. 25-28 avril 1978, *Studies in Environmental Science*. Vol. 1 - Elsevier Scientific Publishing Company; Amsterdam.
- [26] BONSANG B. et NGUYEN B.C. (1978) – Sulfur dioxide measurements in marine atmosphere at concentrations lower than PPB. Proceedings of the 13th International Colloquium, Paris, France 25-28 avril 1978, *Studies in Environmental Science*, vol. 1 - Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam.
- [27] NGUYEN B.C., GAUDRY A., BONSANG B., LAMBERT G. (1978) – Reevaluation of the role of dimethyl sulphide in the sulphur budget. *Nature*, vol. 275, p. 637-639.
- [28] RANCHER J. (1978) – Contribution à l'étude du cycle du chlore, du brome et de l'iode dans l'atmosphère au-dessus de l'Océan. Thèse de Doctorat de Spécialité (3^e cycle) Université Paris VII.
- [29] KRITZ M.A., RANCHER J. (1978) – Cycle of halogens in the tropical marine atmosphere. *EOS*, 59, 12.
- [30] BARON D. (1977) – Le cuivre, le nickel, le plomb dans les aérosols et dans les particules en suspension de l'Atlantique Nord. Thèse de Doctorat de Spécialité (3^e cycle), Université P. et M. Curie, Paris VI.
- [31] BUAT-MENARD P., LESTY M. et CHESSELET R. (1978) – Chimie des éléments en trace dans l'aérosol au-dessus de l'Atlantique. in : "The tropospheric transport of pollutants and other substances to the ocean", National Academy of Sciences, Washington DC.

- [32] BUAT-MENARD P. and ARNOLD M. (1978) – The heavy metal chemistry of atmospheric particulate matter emitted by Mount Etna volcano. *Geophys. Res. Lett.* 5, 245-248.
- [33] CHESSELET R., BUAT-MENARD P., LESTY M. and JEHANNO C. (1976) – Heavy metals in oceanic microlayer derived aerosols, in : The skin of the ocean, JOA, Edinburgh, Book of Abstracts, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- [34] CHESSELET R., PINTA M., BUAT-MENARD P. et BARON D. (1978) – Accumulation et transfert de métaux en trace à l'interface air-mer. Numéro spécial, *Revue OCEANIS* (sous presse).
- [35] BUAT-MENARD P. and CHESSELET R. (1977) – Marine aerosols control on deep ocean heavy metals particulate chemistry, Proc. 9th Intern. Conf. on Atmospheric Aerosols, condensation and ice nuclei, Galway, Ireland (Pergamon Presse), in press.
- [36] BUAT-MENARD P. and CHESSELET R. (1978) – Variable influence of the atmospheric flux on the trace metal chemistry of oceanic suspended matter, Earth and Planetary Science Letters. (sous presse).
- [37] AUBEY O. (1976) – Contribution à l'étude de la dissolution des particules de carbonate de calcium en suspension dans les eaux profondes océaniques. Thèse de 3^e cycle, université Paris VII.
- [38] AUBEY O. and CHESSELET R. (1977) – Distribution of suspended coccoliths and CaCO₃ debris in the central Argentine. *Basin, EOS*, 58, 410.
- [39] CHESSELET R., JEDWAB J., DARCOURT C. and DEHAIRS F. (1976) – Barite as discrete suspended particles in the Atlantic ocean. *EOS*, 57, 255.
- [40] CHESSELET R. and LAMBERT C.E. (1977) – L'aluminium, le fer et le manganèse dans les particules en suspension à l'approche de l'interface eau-sédiment dans l'Atlantique et le Pacifique. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 19, 235-240.
- [41] MONACO A., LAMBERT C.E., CHESSELET R. et BUAT-MENARD P. (1978) – Etude critique de la minéralogie et de la géochimie de l'interface eau-sédiment en Atlantique Equatorial. *Revue OCEANIS* (sous presse).
- [42] CHESSELET R. (1975) – Deep ocean suspended matter chemistry. *THALASSIA JUGOSLAVICA*, 11, 1/2, 135-138.
- [43] CHESSELET R., SPENCER D.W., BISCAYE P.E. (1976) – Element transport by particles : the aluminium, manganese, iron system in Atlantic suspended matter. *Geochemistry and Ocean mixing Symp.* JOA, Edinburg, Book of abstracts, Food and Agriculture Org. of the United Nations, Rome.
- [44] LABEYRIE L.D., LIVINGSTON H.D. and BOWEN V.T. (1976) – Comparison of the distribution in marine sediments of transuranium nuclides in the environment International Atomic Energy Agency, Vienna, 121-137.
- [45] LABEYRIE L. (1976) – Utilisation du Fer 55 des retombées radioactives comme traceur de la géochimie du fer stable dans les océans. 4^e Réunion Annuelle des Sciences de la Terre. Paris, avril.
- [46] LABEYRIE L. (avril 1976) – Importance des phénomènes de remobilisation du fer en surface des sédiments océaniques. 4^e Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, Paris.
- [47] CAHET G. et GADEL F. (1975) – Minéralisation et intégration de composés glucidiques simples dans les dépôts superficiels lagunaires. Journées Techniques Association des Géologues du Sud-Ouest Bordeaux. *Bull. Centre Recherches SNPA*. Pau, 10, 1, 173-192.
- [48] CAUWET G. (1975) – Optimisation d'une technique de dosage du carbone organique des sédiments. *Chemical Geology*, 16, 59-63.
- [49] SALIOT A. (1975) – Acides gras, stérols et hydrocarbures en milieu marin : Inventaire, applications géochimiques et biologiques. Thèse de Doctorat d'Etat, Université P. et M. Curie, p. 167.
- [50] MESTRE R., CAUSSE C., DUBOUL-RAVAZET C. et GADEL F. (1975) – Etude des résidus d'hydrocarbures dans les sédiments du plateau continental languedocien en Méditerranée. *Trav. Soc. Pharm. Montpellier*, 35, 137-142.
- [51] GADEL F. (1975) – Distribution de la matière organique sur le plateau continental catalan : le carbone et l'azote. *Vie et Milieu*, 25, (1B), 141-156.
- [52] CAHET G. et GADEL F. (1976) – Bilan du carbone dans les sédiments lagunaires et marins méditerranéens. Effets des processus biologiques saisonniers et diagénétiques. *Archiv. für Hydrobiologie*, 77, 1, 109-138.
- [53] CAMBON-VILE F. (1977) – Relations entre les alcalinoterreux et les substances humiques dans le domaine marin. Thèse de spécialité, Université P. Sabatier, Toulouse.
- [54] DASTILLUNG M., DEBYSER Y. et GADEL F. (1977) – Organic geochemistry of marine and lacustrine recent sediments. 8^e Congrès Intern. de Géochimie organique - Moscou.
- [55] SALIOT A. (1977) – Etude comparative des acides gras de l'eau et de l'eau interstitielle à l'interface eau de mer profonde/sédiment *C.R. Acad. Sc. Paris*, 285 D, 857-860.
- [56] CAUWET G. (1978) – Organic chemistry of seawater particulates. Concepts and developments. *Oceanologica Acta* 1 (1), 99-105.
- [57] DEBYSER Y. et GADEL F. (1976) – Mission ORGON I - Etude géochimique des composés humiques et des kérogènes. Ed. CNRS.
- SALIOT A. et TISSIER M.J. (1977) – Interface eau-sédiment : acides gras et hydrocarbures dissous et particulaires dans l'eau de mer. In : Géochimie organique des sédiments marins profonds, ORGON I, Mer de Norvège, Ed. CNRS.

- TISSIER M.J. et SPYCKERELLE C. (1977) – Hydrocarbures polyaromatiques des sédiments. *In* : Géochimie organique des sédiments marins profonds, ORGON I, Mer de Norvège, Ed. CNRS.
- SALIOU A., TISSIER M.J., FEVRIER A., TUSSEAU D., EWALD M. et BOUSSUGE C. (1978) – Inventaire et dynamique des lipides à l'interface eau de mer-sédiment. I. Matériel et méthodes. *In* : Géochimie organique des sédiments marins profonds, ORGON II, Atlantique N-O, Brésil, Ed. CNRS.
- SALIOU A. et BOUSSUGE C. (1978) – Inventaire et dynamique des lipides à l'interface eau de mer - sédiment. I. Matériel et méthodes. *In* : Géochimie organique des sédiments marins profonds, ORGON II, Atlantique N-O, Brésil, Ed. CNRS.
- SALIOU A. et TISSIER M.J. (1978) – Inventaire et dynamique des lipides à l'interface eau de mer-sédiment. IV. Hydrocarbures aliphatiques et alicycliques de l'eau de mer et de l'eau interstitielle. *In* : Géochimie organique des sédiments marins profonds, ORGON II, Atlantique N-O, Brésil, Ed. CNRS.
- TISSIER M.J. et DASTILLUNG M. (1978) – Inventaire et dynamique des lipides à l'interface eau de mer-sédiment. V. Hydrocarbures polyaromatiques des sédiments, de l'eau de mer et de l'eau interstitielle. *In* : Géochimie organique des sédiments marins profonds. ORGON II, Atlantique N-O, Brésil, Ed. CNRS.
- DEBYSER Y., GADEL F., LEBLOND C. et MARTINEZ M.J. (1978) – Etude géochimique des composés humiques et des kérogènes. *In* : Géochimie organique des sédiments marins profonds, ORGON II, Atlantique N-O, Brésil, Ed. CNRS.
- TUSSEAU D., BARBIER M. et SALIOU A. (1978) – Inventaire et dynamique des lipides à l'interface eau de mer-sédiment. IV. Stéroïdes de l'eau de mer et de l'eau interstitielle. *In* : Géochimie organique des sédiments marins profonds, ORGON II, Atlantique N-O, Brésil, Ed. CNRS.
- [58] FONTUGNE M. et DUPLESSY J.C. (1978) – Carbon isotope ratio of marine plankton related to surface water masses. *Earth and Planetary Science Letters*, 41, 365-371.
- [59] BONTE P., MOLLE J.F., BRICHET E., REYSS J.L., LALOU C. (1975) – Etude de nodules de manganèse (superficiels et enfouis) et de leur environnement sédimentaire dans la fosse de la Manche. 3^e Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, Montpellier 23-25 avril.
- [60] BRICHET E., LALOU C. (1975) – Etude radiochimique et structurale d'un nodule de l'Océan Pacifique. 3^e Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, Montpellier 23-25 avril.
- [61] HOFFERT M., LALOU C., BRICHET E., BONTE P., JEHANNO C. (1975) – Présence en Atlantique Nord de Nodules de manganèse à noyaux d'attapulgite et de phillipsite. *C.R. Acad. Sc. T 281, série D*, 231-233.
- [62] LALOU C., REYSS J.L., BRICHET E., GUICHARD F., KU T.L., YOKOYAMA Y. (1976) – Etude radiochimique d'une croûte de manganèse par ^{230}Th , ^{231}Pa , ^{26}Al et ^{10}Be . 4^e Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, Paris, avril.
- [63] LALOU C., BRICHET E., BONTE P. (août 1976) – Some new data on the genesis of manganese nodules. Monograph on manganese ore deposits, publiée par IAGOD à l'occasion du Congrès International de Géologie, Sydney.
- [64] BONTE P., LALOU C., BRICHET E. (avril 1976) – Relations encroûtement de manganèse-sédiment dans des carottes du bassin des Canaries. 4^e Réunion Annuelle des Sciences de la Terre, Paris.
- [65] LALOU C., BRICHET E., BONTE P. (1976) – Do manganese nodules represent the slowest phenomenon ever known or a very fast episodic reaction. JOA Edinburgh, Late abstracts, Symposium S9.
- [66] LALOU C. et BRICHET E. (1976) – On some relationship between the oxide layers and the cores of deep sea manganese nodules. *Mineralium Deposita*, vol 11, 267-277.
- [67] LALOU C., BRICHET E. (1977) – On some relationship between the oxide layers and the cores of deep sea manganese nodules. *A reply. Mineralium Deposita*, vol. 13, 139-145.
- [68] LALOU C., BRICHET E., BONTE P. (1977) – Structure des nodules : genèse et croissance. *OCEANIS*
- [69] LALOU C., KU T.L., BRICHET E., POUPEAU G., ROMARY P. (1979) – Techno incrustation Part I Radiochemical study. Colloque Int. du CNRS n° 289 - CNRS Publ.
- [70] LALOU C., BRICHET E., JEHANNO G. (1979) – Techno encrustation Part II. Structural and chemical study. Colloque Int. du CNRS, n° 289 - CNRS Publ.
- [71] LATOUCHE C., MAILLET N., BOULE P. (1979) – Relations entre les caractéristiques minéralogiques des sédiments et les dépôts polymétalliques entre la zone de fracture Kane et le Grand Météor. Colloque Int. du CNRS n° 289 - CNRS Publ.
- [72] LALOU C., BRICHET E., POUPEAU G., ROMARY P., JEHANNO C. (1978) – Growth rates and possible age of a north Pacific manganese nodule. *In* : Marine Geology and Oceanography of the Central Pacific manganese province. Ed. Piper, J.
- [73] LALOU C., BRICHET E., KU T.L., JEHANNO C. (1977) – Radiochemical scanning electron microscope (SEM) and X ray dispersive (EDAX) studies of FAMOUS hydrothermal deposit. *Marine Geology* 24, 245-258.
- [74] LONGUEMARD J.P. et MONACO A. (1978) – Propriétés géotechniques et minéralogiques d'une carotte des fonds à nodules (Pacifique Nord). *Oceanologica Acta*, sous presse.
- [75] VALETTE J.N. (1977) – Etude des processus sédimentaires et géochimiques en milieu volcanique marin : le modèle de Vulcano (Italie). Thèse d'Etat, Perpignan, 778 p.
- [76] MONACO A. et VALETTE J.N. (1976) – Présence de "micronodules" de manganèse dans les sédiments marins récents de Vulcano (Iles Eoliennes - Italie). *C.R. Acad. Sc., Paris*, 282, 2135-2138.

- [77] MONACO A., VALETTE J.N., HOFFERT M., PICOT P. (1978) – Héritage et néoformation dans les dépôts volcano-sédimentaires et hydrothermaux avoisinant l'île de Vulcano. *Oceanologica Acta* Sous presse.
- [78] MONACO A. et VALETTE J.N. (1978) – Etude des produits d'altération fumerolienne et météorique à Vulcano. *Clay Minerals*, 13, 1, 79-91.
- [79] BE A.W.H. et DUPLESSY J.C. (1976) – Subtropical convergences fluctuations and quaternary climates in the middle latitudes of the Indian Ocean, *Science*, vol. 194, 419-422.
- [80] KELLOG T.B., DUPLESSY J.C. and SCHACKLETON N.J. (1978) – Planktonic foraminiferal and oxygen isotopic stratigraphy and paléoclimatology of Norwegian Sea deep-sea cores, *Boreas*, vol. 7, 61-73.
- [81] PASTOURET L., CHAMLEY H., DELIBRIAS G., DUPLESSY J.C., THIEDE J. (1978) – Late quaternary climatic changes in western tropical Africa deduced from deep-sea sedimentation of the Niger delta, *Oceanologica Acta*, vol. 1, n° 2.
- [82] MIKKELSEN N., LABEYRIE L. and BERGER W.H. (1978) – Silica oxygen isotopes in diatoms : 20,000 yr record in deep-sea sediments. *Nature*, 271, 536-538.
- [83] LATOUCHE C. et PARRA (1976) – Minéralogie et géochimie des sédiments quaternaires de l'océan Atlantique Nord-oriental (Mer de Norvège - Golfe de Gascogne). Essais d'interprétations sédimentologiques. Marine Geology. Amsterdam 33-39.
- [84] GROUSSET F. (1977) – Etude géologique du quaternaire terminal de la zone Merriaded - Trevelyan (Golfe de Gascogne), Thèse de Doctorat de Spécialité, 3^e cycle, Université de Bordeaux.

IMPRIMERIE LOUIS-JEAN

Publications scientifiques et littéraires

TYPO - OFFSET

05002 GAP - Téléphone 51-35-23 -

Dépôt légal 480-1979