

SOCIÉTÉ  
GÉOLOGIQUE  
DU  
NORD

22 TOME 1988

**ACTUALISATION  
DE QUELQUES THÈMES GÉOLOGIQUES**  
—  
**CONFÉRENCES**

**ANNALES**

*Tome CVI (1986) 4<sup>me</sup> trimestre*

VOLUME PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS DE  
L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES  
LILLE FLANDRES-ARTOIS

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD  
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

Parution 1988

# SOCIETE GEOLOGIQUE DU NORD

## Extraits des Statuts

### Article 2.

— Cette Société a pour objet de concourir à l'avancement de la géologie en général, et particulièrement de la géologie de la région du Nord de la France.

— La Société se réunit de droit une fois par mois, sauf pendant la période des vacances. Elle peut tenir des séances extraordinaires décidées par le Conseil d'Administration.

— La Société publie des Annales et des Mémoires. Ces publications sont mises en vente selon un tarif établi par le Conseil. Les Sociétaires bénéficient d'un tarif préférentiel<sup>(1)</sup>.

### Article 5.

Le nombre des membres de la Société est illimité. Pour faire partie de la Société, il faut s'être fait présenter dans l'une de ses séances par deux membres de la Société qui auront signé la présentation, et avoir été proclamé membre au cours de la séance suivante.

## Extraits du Règlement Intérieur

§ 7. — Les Annales et leur supplément constituent le compte rendu des séances.

§ 13. — Seuls les membres ayant acquitté leurs cotisation et abonnement de l'année peuvent publier dans les Annales. L'ensemble des notes présentées au cours d'une même année, par un même auteur, ne peut dépasser le total de 10 pages, 1 planche simill étant comptée pour 2 p. 1/2 de texte.

Le Conseil peut, par décision spéciale, autoriser la publication de notes plus longues.

§ 17. — Les notes et mémoires originaux (texte et illustration) communiqués à la Société et destinés aux Annales doivent être remis au Secrétariat le jour même de leur présentation. A défaut de remise dans ce délai, ces communications prennent rang dans une publication postérieure.

§ 18. — Les mémoires sont publiés par fascicule après décision du Conseil.

## Avertissement

La Société Géologique du Nord ne peut en aucun cas être tenue pour responsable des actes ou des opinions de ses membres.

## Tirages à part

Conformément au paragraphe 14 du Règlement Intérieur (Tome LXXXI, p. 12), les tirages à part sont à la charge des auteurs qui doivent en faire par écrit la déclaration expresse en tête des épreuves du bon à tirer.

## Cotisations et Abonnements (à la date du 1<sup>er</sup>-1-1987)

	QUALITE	COTISATION	ABONNEMENT aux Annales	TOTAL
FRANCE et BENELUX	Personnes physiques <sup>(2)</sup> .....	30,00 F	140,00 FT.T.C.	170,00 F
AUTRES PAYS	Personnes physiques .....	30,00 F	155,00 FT.T.C.	185,00 F

Abonnement des non-membres: FRANCE: 315,00 F H.T. — ETRANGER: 370,00 F

## ANNALES DE LA SOCIETE GEOLOGIQUE DU NORD

La vente des Annales s'effectue par tomes entiers aux prix suivants. Exceptionnellement, et jusqu'à épuisement du stock, certains fascicules sont en vente séparément. Leur liste figure en fin de fascicule.

Tomes I à LXXIX (manquent I, II, V à IX, XVI, XXII, XXXIV à XXXVI, XXXIX à XLIII, XLV, XLVII à LVIII) .....	190,00 F H.T.
Tomes LXXX à XCV (manque XCI) .....	255,00 F H.T.
Tomes XCVI à CV .....	300,00 F H.T.
Tome CVI .....	350,00 F H.T.

## TABLES GENERALES DES ANNALES

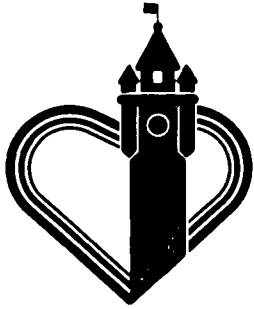
Table 1 (Tomes I à XX) - Table 2 (Tomes XX à XXX) - Table 3 (Tomes XXXI à XL) - Table 4 (Tomes XLI à LXXIX)...	50,00 F H.T.
Table 5 (Tomes LXXX à XCIX) .....	par table

Esquisse géologique du Nord de la France, par J. GOSSELET, Fascicule IV (Terrains quaternaires) ..... 29,00 F H.T.

Ecorché géologique infra-mésozoïque (extrait de « Contribution à la connaissance des géologies du Nord de la France », présentée par C.F.P. (M), COPESEP et S.N

(1) Modification adoptée lors de l'Assemblée Générale du 10 janvier 1974.

(2) Les étudiants qui en font la demande annuelle peuvent, par décision du Conseil, bénéficier



SOCIÉTÉ  
GÉOLOGIQUE  
DU  
NORD

**ACTUALISATION  
DE QUELQUES THÈMES GÉOLOGIQUES**  
—  
**CONFÉRENCES**

**ANNALES**

Tome CVI (1986) 4<sup>me</sup> trimestre

VOLUME PUBLIÉ AVEC LE CONCOURS DE  
L'UNIVERSITÉ DES SCIENCES ET TECHNIQUES  
LILLE FLANDRES-ARTOIS

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD  
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

Parution 1988

## CONSEIL D'ADMINISTRATION

— 1986 —

<i>Président</i> .....	M. M. WATERLOT
<i>Premier Vice-Président</i> .....	M. F. THIEBAULT
<i>Vice-Présidents</i> .....	M. I. GODFRIAUX
	M. P. CELET
<i>Conseillers</i> .....	M. V. PRUDHOMME
	M. A. DALINVAL
	M. J. CHARVET
	M. H. CHAMLEY
	M. C. DUPUIS
	M. B. MISTIAEN
<i>Secrétaire</i> .....	M. A. BLIECK
<i>Secrétaire-Adjoint</i> .....	M. Y. DESPEYROUX
<i>Directeur de la Publication</i> .....	M <sup>me</sup> Paule CORSIN
<i>Trésorier</i> .....	M. l'Abbé TIEGHEM
<i>Bibliothécaire</i> .....	M <sup>lle</sup> S. CRASQUIN

---

## COMITE DE LECTURE

— 1986 —

M<sup>me</sup> Paule CORSIN, Directeur de la publication  
M. J.M. CHARLET  
M. Ch. DELATTRE  
M. P. CELET  
M. I. GODFRIAUX

## Les eaux souterraines : Un problème d'échelle L'hydrogéologie : Une science d'interface

### Groundwater : A scale problem. - Hydrogeology : An interface science

par Norbert CRAMPON (\*)

*Résumé.* — Face à une sollicitation qui sera nécessairement de plus en plus importante des eaux souterraines, il importe que soient de mieux en mieux connues les réserves, les modalités de renouvellement, l'hydrodynamique, la qualité, la vulnérabilité à la pollution et les conditions de transport ou de rétention des produits solubles. L'Hydrogéologie relève de la Géologie en ce qui concerne les dimensions, la structure, la composition lithologique des aquifères et de leurs limites ; elle est aussi une branche particulière de l'Hydraulique, de la Mécanique des Fluides et de la Chimie. A l'échelle microscopique, les phénomènes d'interface interviennent largement et doivent être pris en compte pour la compréhension aussi bien de la perméabilité que des phénomènes de dispersion, de sorption et d'échanges d'ions. Devant la diversité des paramètres, leur variabilité spatiale et parfois temporelle, la qualification doit faire appel à des modèles de plus en plus sophistiqués avec, le plus souvent, calcul numérique. Face à la multiplicité des problèmes et des disciplines qu'il doit maîtriser, l'Hydrogéologue ne sera efficace que s'il garde l'esprit de synthèse du naturaliste devant la complexité des phénomènes naturels.

*Abstract.* — *Water, a main component in each living creature, is unceasingly renewed, which involves sufficient water resources with regard to quantity and quality ; but the more demography and human activities grow, the more important the needs are and, therefore, polluted water volumes too. French drinking water is withdrawn half from aquifers, half from surface water, whereas, in northern France, over 95 per cent of drinking water supply come from groundwater (mainly chalk aquifer).*

*Faced with a constantly growing groundwater demand, presence and storage, natural recharge processes, groundwater flow and fluctuations, quality, solute transport and sorption processes, vulnerability zonation need to be better and better known.*

*Hydrogeology is dependent on Geology with regard to sizes, structural and mineralogical features of underground reservoirs and their boundaries, but this science is a special application of Hydraulics, Fluids Mechanics and Chemistry too. At a microscopic scale, it is important to have a thorough knowledge of interface phenomena so as to understand hydraulic conductivity, dispersion, sorption, ionic exchanges.*

*As we are here in presence of many properties and their spatial and, sometimes, temporal variability, groundwater management needs more and more sophisticated models with, most of the time, numerical computation. The Hydrogeologist has to master many problems and subjects, but he will really be efficient in so far as he possesses a naturalistic synthesis mind in front of the complexity of natural phenomena.*

L'homme adulte est constitué, approximativement, de 60 % d'eau, 39 % de matière organique et 1 % de sels minéraux. Cette teneur en eau peut dépasser 90 % chez d'autres êtres vivants, comme certains végétaux.

Cette eau de constitution, sans laquelle nous n'existerions pas, se renouvelle sans cesse car elle est moyen d'échange d'une cellule à l'autre et entre l'organisme et son environnement. La relation entre l'eau et la vie

est devenue si évidente que les astronomes actuels recherchent désormais les planètes pouvant, par leur masse et leur température, contenir de l'eau liquide, avant de rechercher une quelconque trace de vie (Owen, 1981).

Sur terre, cette eau proviendrait du dégazage du magma : la croûte et le manteau contiendraient encore actuellement 20 fois plus d'eau que tous les océans

(\*) Université des Sciences et Techniques, Laboratoire d'Hydrogéologie, Villeneuve d'Ascq.  
Conférence présentée le 4 Juin 1986.

réunis (Copin-Montégut, 1976). Si l'eau est ainsi l'un des produits minéraux de l'évolution de notre planète, son étude relève donc bien des Sciences de la Terre.

Si les océans, qui constituent plus de 97 % de la masse d'eau totale (environ 1,4 milliard de milliards de tonnes), ont eu un rôle essentiel dans la genèse et l'évolution de la vie terrestre, l'homme et la plupart des êtres vivants continentaux ont un besoin vital d'eau douce.

Cette eau douce (2,4 % de la masse totale des eaux) est en grande majorité (87,2 %) glacée, mais son reliquat liquide est surtout constitué d'eaux souterraines : le volume d'eau douce contenu dans les aquifères (4,2 milliards de km<sup>3</sup>) représente plus de 30 fois celui des lacs et cours d'eau (Vaillant, 1977 ; Bouwer, 1978 ; Harrois-Monin, 1977).

Ces quantités exprimées en masse ou en volume représentent les réserves terrestres en eau (tabl. I). L'ensemble (1,4 milliard de km<sup>3</sup>) est considéré, à tort ou à raison, comme constant, tout au moins à notre échelle humaine de temps et compte tenu des méthodes de mesure.

A l'échelle régionale ou locale, la réserve en eau douce peut par contre s'épuiser rapidement, pour des raisons climatiques ou de surexploitation. On entre là, de plain-pied, dans l'aspect appliqué des Sciences de l'Eau dont l'Hydrogéologie constitue le lien avec les Sciences de la Terre. Il s'agit donc d'estimer au mieux le renouvellement d'un gisement donné (c'est la notion de *ressource* naturelle renouvelable) mais aussi les possibilités matérielles et économiques d'exploitation (notion de *ressource* exploitable) face aux besoins actuels ou prévisionnels (Castany, 1977 et 1982).

La plupart des nappes et toutes les eaux superficielles continentales sont soumises à un écoulement, à l'évapotranspiration et à une réalimentation, plus ou moins directe, par les précipitations ; bref, elles entrent dans le *cycle de l'eau* (fig. 1). C'est donc ce renouvellement, cette ressource, généralement exprimée en termes de débit, qui est prépondérant sur la réserve, cette dernière ayant surtout un rôle de tampon en cas de surexploitation temporaire.

Examinons de plus près cet aspect quantitatif du bilan : les besoins face aux ressources, à diverses échelles d'espace.

## I. — ASPECT QUANTITATIF ET HYDRODYNAMIQUE

### 1) Bilans.

#### a) Les besoins.

Nous choisirons l'année 1973, prise comme référence par le Ministère de l'Environnement (fig. 2).

— *France*. - Prélèvements : 23 milliards de m<sup>3</sup> (Bodelle et Tirat, 1977)

dont 78 % en provenance des eaux superficielles et 22 % des eaux souterraines.

En ce qui concerne l'alimentation en eau potable (A.E.P.) des collectivités, soit seulement 4 milliards de m<sup>3</sup> : les *eaux souterraines* l'assurent pour moitié.

— *Nord - Pas-de-Calais*. - Prélèvements (toujours en 1973) : 623 millions de m<sup>3</sup> (Beckelynck, 1981) dont 30 % en provenance des eaux superficielles et 70 % des eaux souterraines

mais l'eau potable provient à 97 % des aquifères.

#### b) Le renouvellement.

Face à ces prélèvements, le renouvellement par les précipitations (fig. 3) est le suivant :

— *France* (bilan sur 10 ans : 1958-1967), l'excédent (pluie-évapotranspiration) est de l'ordre de 43 % des précipitations, soit 225 milliards de m<sup>3</sup>. La totalité des prélèvements de 1973 est donc d'un peu plus de 10 % de la ressource naturelle renouvelable.

Domaine	Gisement	Volume en km <sup>3</sup> (1 km <sup>3</sup> = 10 <sup>9</sup> m <sup>3</sup> )	% total	Observations
ATMOSPHERE	- nuages et vapeur d'eau	13.000	0,001	100 % dans les 12 premiers km 90 % dans les 5 premiers
EAUX	- océans	1.360.000.000	97,22	Eaux salées
	- lacs salés - mers fermées	105.000	0,007	
DE	- lacs	125.000	0,009	Eaux douces
	- fleuves et rivières	1.250	0,0001	
SURFACE	- glaciers et calottes glaciaires	30.000.000	2,14	Eaux douces gelées
	- biomasse	50.000	0,004	Eau combinée
EAUX	- zone non saturée	65.000	0,005	Eaux douces en majorité
	- zone saturée à moins de 800 m	4.200.000	0,30	
SOUTERRAINES	- zone saturée entre 800 m et 4 km	4.300.000	0,31	Eaux souvent très minéralisées
TOTAL		1.400.000.000	100	

Tableau I. — Réserve en eau du globe terrestre.  
(d'ap. Bouwer, 1978 ; Harrois-Monin, 1977 ; Vaillant, 1977).

Table I. — Estimated distribution of world's water.

Pour les eaux souterraines, le prélèvement n'atteint que 3 % des eaux infiltrées.

— Nord-Pas-de-Calais (bilan sur 20 ans : 1956-1975), l'excédent pluviométrique n'est que de 25 % et les prélèvements 1973 atteignent 23 % de la ressource renouvelable (Beckelynck, 1981).

Les prélèvements en eaux souterraines dépassent 19 % des eaux infiltrées.

De ces premiers bilans, on peut tirer deux enseignements :

1° La ressource naturelle renouvelable n'est pas menacée par le taux de prélèvements, ni à l'échelle de la France, ni à celle du Nord-Pas-de-Calais ;

2° Toutefois, le Nord-Pas-de-Calais est la région française où les eaux souterraines sont le plus sollicitées, en particulier pour l'eau potable

mais si, globalement, le bilan est satisfaisant, il n'en est peut-être plus de même à des échelles différentes de temps et d'espace. En effet :

— la pluviométrie et l'évapotranspiration peuvent être très variables d'une année à l'autre. Elles varient,

de toutes façons, très fortement selon la saison : dans le Nord de la France, les précipitations ne réalimentent guère les nappes que d'octobre à mars ; pendant les six autres mois, elles maintiennent ou reconstituent seulement le stock d'eau des sols utilisable par la végétation ;

— le taux d'infiltration (par rapport à l'écoulement total) varie localement de 0 à 100 %, selon la nature plus ou moins perméable des affleurements, la pente des reliefs et le couvert végétal ;

— la concentration des captages engendre une sur-exploitation locale qui peut se traduire par une baisse sensible des niveaux :

- d'une soixantaine de mètres à Roubaix dans la nappe des calcaires carbonifères, entre 1945 et 1975,

- de 5 à 10 m dans la nappe de la craie dans la vallée de l'Aa (1965-1975).

Sans entrer dans le détail des bilans sectoriels, développés notamment par le B.R.G.M., il n'est peut-être pas inutile de rappeler quelques caractéristiques des aquifères régionaux.

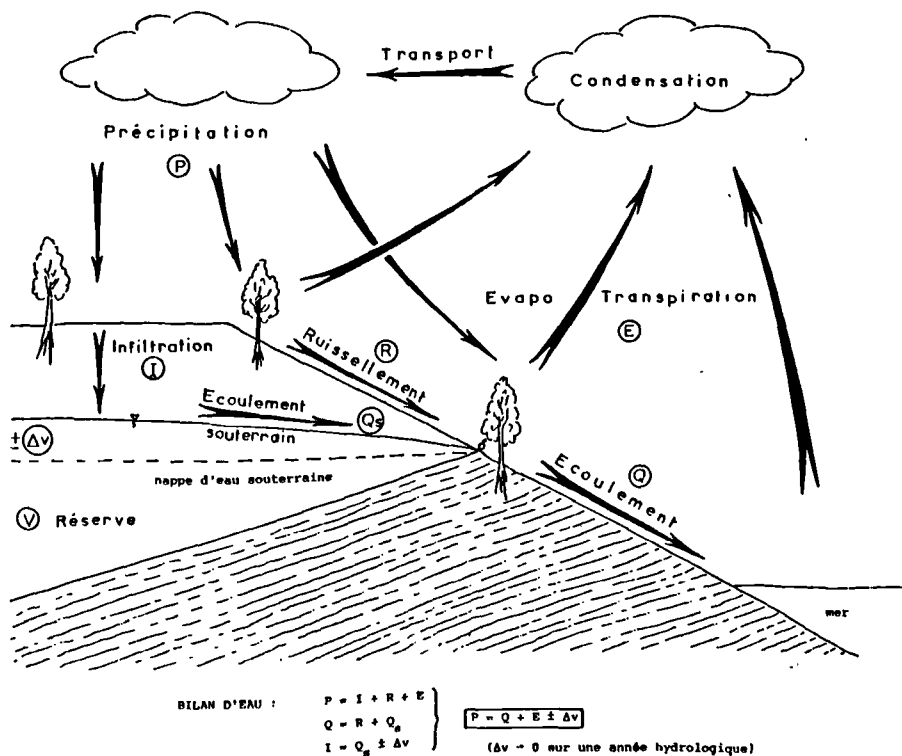


Fig. 1. — Le cycle de l'eau.

Fig. 1. — The hydrologic cycle.

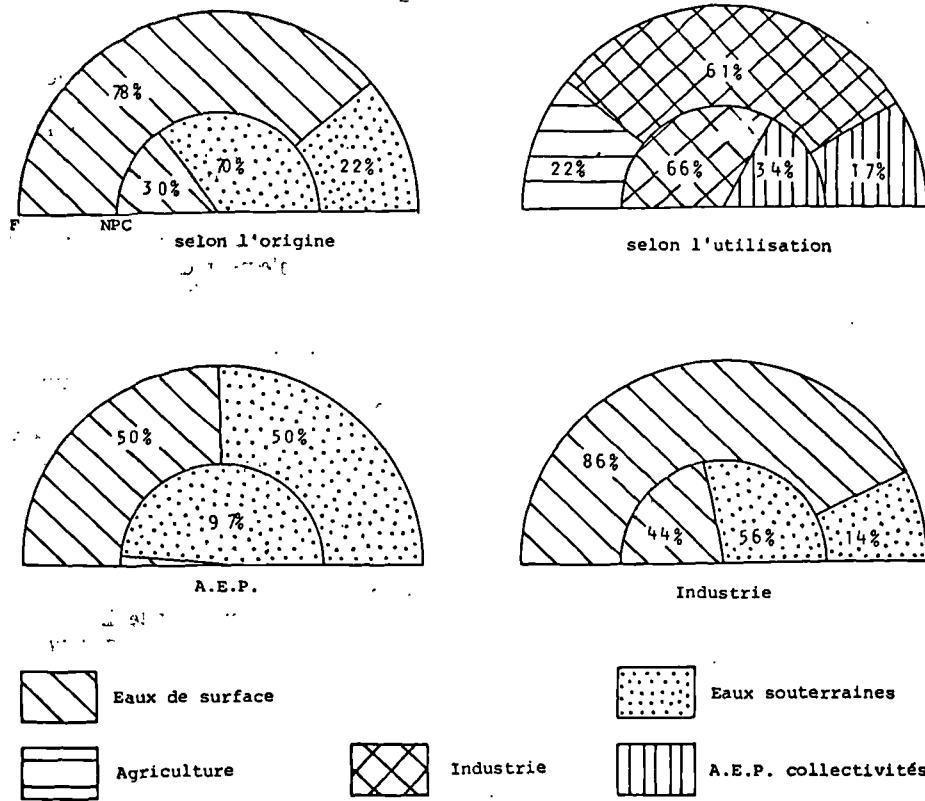


Fig. 2. — Prélèvements d'eau 1973.

Fig. 2. — French water supply in 1973 (whole France and northern France).

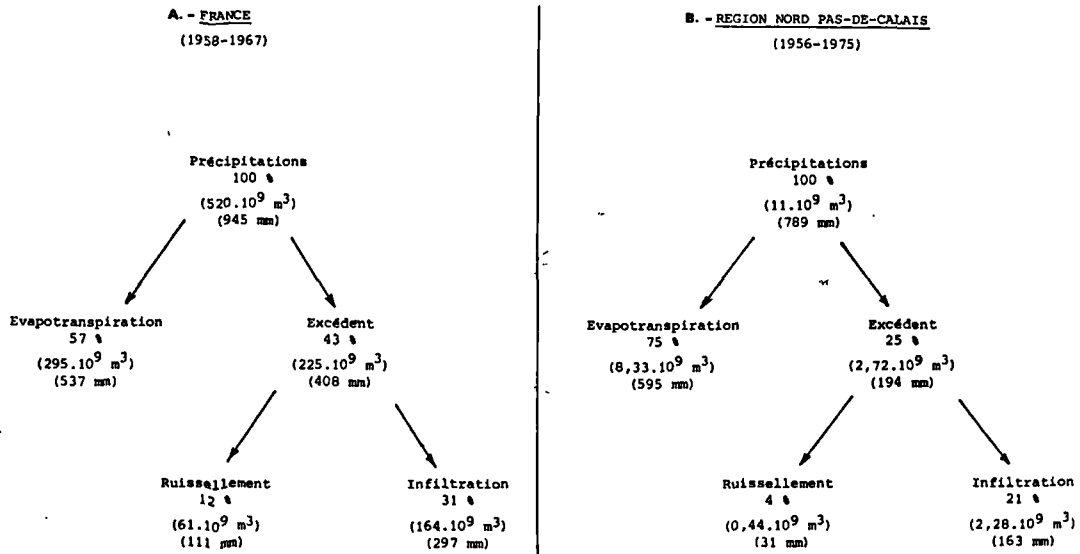


Fig. 3. — Renouvellement des ressources par les précipitations.

A. - D'après Castany (1977).

B. - D'après Beckelyncq (1981).

Fig. 3. — Water budget.



2) Aquifères du Nord - Pas-de-Calais.

a) La craie.

L'aquifère crayeux constitue le réservoir le plus important du Nord de la France, tant en raison de la grande extension du Crétacé supérieur, que de ses caractéristiques hydrodynamiques en faciès crayeux (Caulier, 1974 ; Mania, 1978).

Très schématiquement, la craie aquifère occupe près de 90 % de la surface du Nord - Pas-de-Calais : 64 % en nappe libre, 26 % en nappe captive. Le renouvellement annuel est de l'ordre de 1,4 milliard de m<sup>3</sup>. La réserve serait vraisemblablement comprise entre 3 et 6 milliards de m<sup>3</sup> (eau gravitaire seulement).

La qualité aquifère du Crétacé supérieur relève de deux facteurs essentiels :

- 1. — l'extension du faciès crayeux, qui varie régionalement ;
- 2. — le degré de fissuration de ce faciès.

Pour le premier point, rappelons que dans la partie centrale et orientale de la région, le faciès crayeux correspond au Turonien supérieur et au Sénonien, largement développé jusqu'à la Sambre. Plus à l'Ouest, dans le secteur de Fruges, l'aquifère se divise par suite d'un développement de faciès crayeux dans le

Cénomaniens supérieur. Dans le Calaisis, ce développement est tel que l'aquifère redevient unique, mais du Cénomaniens moyen au Sénonien (Mania, 1978).

La roche crayeuse, quel que soit son faciès, est très poreuse (40 % à Haubourdin) (Dorémus, 1978), mais aquiclude et peu perméable (de l'ordre de 10<sup>-7</sup> m/s).

Elle ne devient perméable en grand et donc aquifère que si elle est suffisamment fracturée et ouverte. Le développement de la fissuration suit les directions régionales majeures de la fracturation du socle primaire qui a rejoué à la fin du Crétacé et au début du Tertiaire (Colbeaux, 1975 et 1984 ; Colbeaux *et al.*, 1975 et 1978), mais plus que l'orientation, c'est la fréquence et l'ouverture des fractures qui conditionnent les perméabilités (qui peuvent varier de 10<sup>-8</sup> à 10<sup>-2</sup> m/s : 5.10<sup>-5</sup> à 5.10<sup>-4</sup> sur le site expérimental de Béthune). Enfin, la profondeur de fissuration active détermine l'épaisseur réelle de l'aquifère qui est, là aussi, très variable (Mania, 1978) :

- quelques mètres (3 à 10 m) en affleurement de plateau ;
- 5 à 10 m dans les vallées creusées en affleurement ;
- jusqu'à 30 ou 40 m en bordure et en début de recouvrement tertiaire.

Épaisseur active et perméabilité étant généralement difficiles à appréhender sur le terrain, la productivité sera mieux caractérisée par leur produit, c'est-à-dire la transmissivité, caractéristique obtenue par pompage d'essai ou par calage de modèles. Elle varie néanmoins de 10<sup>-4</sup> à 10<sup>-1</sup> m<sup>2</sup>/s, les meilleures se trouvant en début de recouvrement tertiaire et les moins bonnes lorsque ce recouvrement devient épais. A titre d'exemple, cette transmissivité est de 2.10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s sous 20 m de Landénien et à moins de 2 km des affleurements, sur le site expérimental de Béthune (Crampon *et al.*, 1982).

Ainsi, en nappe libre, la transmissivité augmente avec les zones de drainage et décroît, en nappe captive, avec l'éloignement de la limite de captivité et l'accroissement du recouvrement. C'est ainsi que la craie devient stérile dans les Flandres et dans le bassin d'Orchies. De même, par diminution d'épaisseur et modification de faciès, le Crétacé supérieur devient improductif dans l'auréole transgressive du socle primaire (Tournaisis et Avesnois).

Quant à l'emmagasinement, il peut varier de quelques pour cent en plateau, à 20 % en vallée (bassin de la Canche) lorsqu'il s'agit de nappe libre (porosité efficace), mais n'est que de 10<sup>-5</sup> à 10<sup>-3</sup> en nappe captive (4.10<sup>-4</sup> sur le site de Béthune).

Les modèles mathématiques sectoriels mis en œuvre à l'occasion d'études du B.R.G.M. et de thèses, ont permis de préciser la répartition de ces caractéristiques hydrodynamiques et de la piézométrie, mais aussi les échanges verticaux, dont la drainance à partir d'allu-

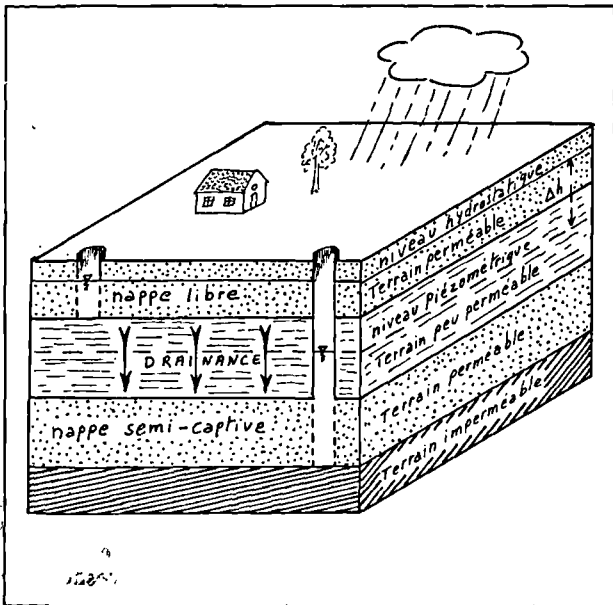


Fig. 4. — Echange par drainance entre une nappe libre et une nappe semi-captive.

Fig. 4. — Vertical recharge of leaky aquifer from unconfined aquifer above upper confining layer.

vions ou de sables landéniens ainsi que les échanges nappe-rivière, en particulier les pertes de canaux ou de cours d'eau.

La réalimentation ainsi induite provient généralement d'une surexploitation et peut avoir des conséquences néfastes sur la qualité des eaux souterraines captées. Il ne s'agit pas de phénomènes marginaux, puisqu'un pourcentage élevé de l'alimentation régionale provient de drainance ou de pertes : 25 % dans le Douaisis, près de 45 % dans la région lilloise, selon les travaux de Mania (1978).

b) *Le calcaire carbonifère de la région de Lille-Roubaix.*

La nappe du calcaire carbonifère s'étend du Hainaut occidental belge à l'agglomération lilloise.

En affleurement dans le Tournaisis, les terrains paléozoïques sont recouverts, en France, par des formations crétacées réduites et par des dépôts tertiaires dont l'épaisseur croît vers le NNW, ainsi que par les alluvions de l'Escaut.

Le réservoir calcaire est constitué de :

- 200 m environ de calcaires plus ou moins dolomitiques d'âge viséen ;
- 250 m environ de calcschistes et calcaires tournaisiens.

Ces terrains, fortement plissés et faillés, déterminent notamment un vaste *synclinal*, dit de *Roubaix*, d'axe WNW-ESE, se formant dans le secteur de Comines, et un *anticlinal* (Lille - Villeneuve d'Ascq - Tournai) (Besbes et Talbot, 1983).

Le caractère *fissural* de l'aquifère est bien développé :

- joints bien marqués N 50-70° et N 100-120° résultant de contraintes E-W ;
- joints peu marqués N 10-20° et N 160-170° associés à une contrainte N-S, selon Colbeaux (1975).

A cette fissuration se juxtapose un *système karstique* à distribution aléatoire connu à l'affleurement (carrières de Tournai) et rencontré en forages.

La *nappe est captive* sous les terrains crétacés de l'agglomération lilloise où des prélèvements importants sont effectués (de l'ordre du m<sup>3</sup>/s). Elle ne possède aucun exutoire naturel.

L'alimentation est assurée par :

- la pluie efficace sur les affleurements belges (Tournai-Leuze) ;
- des pertes : la Marque, canaux de l'Escaut et de la Deûle ;
- drainance descendante des alluvions et de la craie ;
- drainance ascendante d'eaux profondes dévoniennes.

Les *perméabilités* sont généralement meilleures dans le centre ( $7,5.10^{-4}$  à  $2,5.10^{-3}$  m/s) du *synclinal* qu'en bordure ( $2,5$  à  $7,5.10^{-4}$  m/s).

L'*emmagasinement* est de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-5}$  en nappe captive et peut atteindre 10 à 15 % en nappe libre dans le *synclinal*.

Les prélèvements français, de l'ordre de 40 millions de mètres cubes en 1966, sont passés à 25 ou 30 millions dans les années 80, mais la production totale (avec la Belgique) reste voisine de 85 millions de mètres cubes par an (Besbes et Talbot, 1983).

c) *Les aquifères paléozoïques de l'Avesnois.*

A l'Est de la Sambre, commencent à affleurer des formations paléozoïques plissées, correspondant à la bordure sud du *synclorium* de Dinant (fig. 5). Cette terminaison ardennaise comprend des assises s'étageant du Dévonien inférieur au Carbonifère, avec des dominantes tantôt carbonatées, tantôt schisteuses (Delporte, 1979 ; Carlier, 1983 ; Crampon *et al.*, 1987).

Les *formations aquifères* correspondent essentiellement :

— aux *calcaires givétiens* (350 m dans le Sud) auxquels on peut associer la partie supérieure du Couvinien (schistes calcareux et calcaires lenticulaires) soit 100 à 130 m de plus. Les épaisseurs se réduisent en direction du Nord ;

— aux *calcaires et dolomies dinantiennes* dont les épaisseurs varient de 200 m au Sud à 350 m au Nord.

En fonction de la *structure d'ensemble*, dont les plis sont orientés N 70-80°, les affleurements aquifères sont, du Nord au Sud :

- 5 *synclinaux* dinantiens, dont les deux premiers sont les plus importants :
  - *synclorium* de Bachant - Ferrière-la-Petite (60 % de l'A.E.P. de l'Avesnois) ;
  - *synclinal* de Dourlers - Sars-Poteries - Solre-le-Château ;
- le *monoclinal givétien* de Trélon (10 % de l'A.E.P. de l'Avesnois, qui était, en 1974, de l'ordre de 30 millions de m<sup>3</sup>).

Les principales *familles de fractures* qui ont permis le développement de l'aquifère sont N 70-100° et N 160-10°. A cette fracturation se superposent des phénomènes de *dissolution* qui, sans atteindre l'importance des karsts ardennais, confèrent à l'Avesnois un caractère de mini-karst avec pertes, exurgences à gros débit, relations rapides, effondrements actifs, mais aussi secteurs stériles.

Dissolutions et fracturation ouverte peuvent atteindre 50 à 100 m de profondeur avec des épaisseurs noyées de plus de 80 m (F III de Fontaine).

Les transmissivités varient de  $10^{-3}$  à  $4.10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  et les coefficients d'emmagasinement sont de l'ordre de  $10^{-3}$  à  $2.10^{-2}$ .

Les échanges nappe-rivière sont de rigueur, tant au niveau de la Sambre que de la traversée des affleurements calcaires par ses affluents de rive droite.

La vulnérabilité de la ressource est évidemment très grande, aussi y a-t-il des difficultés à concilier les activités habituelles de l'homme et la protection et la qualité des eaux qui lui sont nécessaires. C'est dans cette région que s'est, du reste, constitué un "syndicat anti-périmètres de protection".

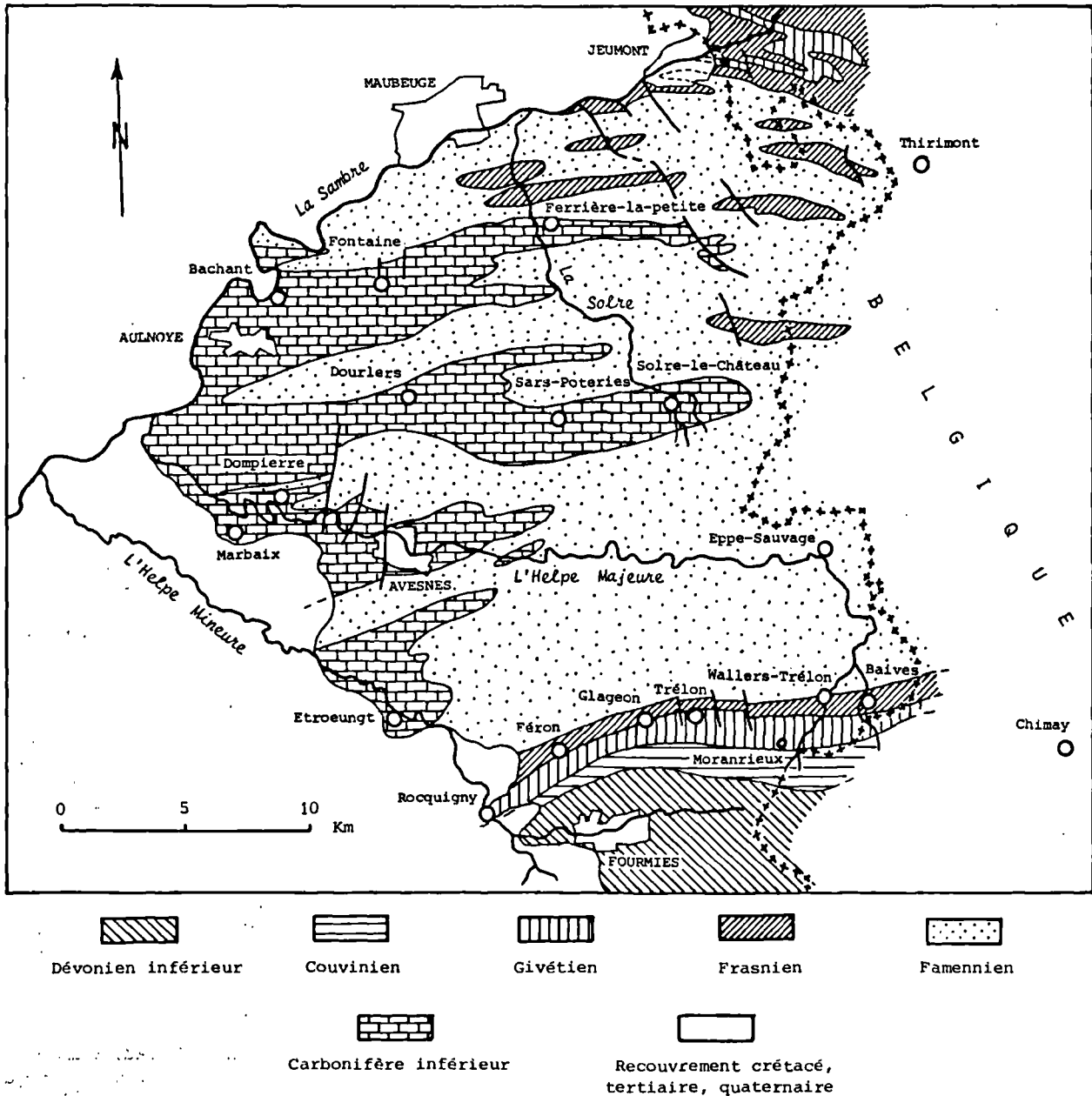


Fig. 5. — Carte géologique simplifiée de l'Avesnois.

Fig. 5. — Simplified geological map of the Avesnois.

d) *Les aquifères jurassiques du Boulonnais.*

L'étendue des affleurements est trop faible pour engendrer des nappes importantes. A ceci s'ajoutent :

— la dominante argileuse (225 m sur 345 m) de la série jurassique du Bathonien inférieur au Portlandien supérieur où les aquifères restent peu épais (5 à 25 m),

— de nombreuses discontinuités dues à la fracturation et aux vallées.

Malgré cela, on note d'assez bons rendements de ces aquifères au niveau des vallées, lorsqu'ils sont recouverts d'alluvions elles-mêmes aquifères.

Il s'agit de (Mania, 1978) :

— grès du Kimméridgien et du Portlandien au Nord de Wimereux ;

— calcaires du Dogger au Sud de Marquise, en bordure de la vallée de la Slack ;

— et surtout des calcaires oxfordiens, dans le secteur de Saint-Léonard et à Hesdigneul dans la vallée de la Liane, où les épaisseurs varient de 16 m à plus de 24 m avec des transmissivités de l'ordre de  $2,4 \cdot 10^{-3}$  à  $4,5 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  et des emmagasineurs de  $4 \cdot 10^{-5}$  à  $2 \cdot 10^{-2}$  selon le caractère plus ou moins captif de la nappe (réalimentation par drainance à partir des alluvions et aussi des grès kimméridgiens). Une étude hydrologique très récente du S.H.C. souligne le faible rôle tampon des aquifères dans le régime des débits de la Liane (Kleinhaus, 1986).

e) *Les sables landéniens.*

Des affleurements sableux isolés s'étendent sur l'Artois, le Cambrésis et même l'Avesnois : ils peuvent être le siège de petites nappes locales pas ou peu exploitées. Mais l'essentiel des sables landéniens se répartit en deux grands bassins séparés par le dôme du Mélantois : les Flandres et le bassin d'Orchies (Mania, 1971).

— Dans les Flandres, l'écoulement s'effectue vers le Nord et la nappe devient rapidement captive sous les argiles des Flandres (Yprésien). Le faciès sableux peut atteindre 25 m sur le littoral et reste de l'ordre de 15 m dans la région lilloise. Les rares transmissivités connues ne dépassent pas  $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  (Lestrem).

— Dans le bassin d'Orchies, la nappe, généralement captive, devient libre sur les bords et peut se confondre avec celle des alluvions (Marque, Deûle, Scarpe, Escaut). Les perméabilités restent faibles ( $10^{-6} \text{ m/s}$ ) mais l'emmagasinement peut être important (5 à 10 %).

Si ces aquifères sableux sont peu ou pas exploités, nous avons vu que leur apport par drainance à la nappe de la craie peut être quantitativement important et, en conséquence, devenir gênant sur le plan de la qualité, notamment par apport de sulfate en provenance du gypse diagénétique des argiles de Louvil et d'Orchies.

f) *Les formations quaternaires.*

Nous ne citerons que pour mémoire :

— les sables flandriens de la plaine flamande ou "sables pissarts" renfermant une nappe dont le niveau n'est qu'à quelques décimètres sous celui du sol. Ces sables, très fins et homométriques, n'offrent un intérêt aquifère que strictement local (puits domestiques) par suite de l'hétérogénéité de la formation (niveaux tourbeux et argileux) ;

— les alluvions plus ou moins grossières ou argileuses des différents cours d'eau, qui jouent parfois un rôle tampon et d'épuration dans le processus de réalimentation de nappes plus profondes ;

— les dunes côtières dont la petite nappe d'eau douce repose sur un biseau salé d'eau de mer.

Malgré des surexploitations locales, il semble donc que l'eau souterraine ne viendra pas, de sitôt, à manquer en France, ni même dans le Nord - Pas-de-Calais. Mais c'est d'eau potable dont nous avons aussi besoin : les ressources en eau souterraine de qualité peuvent diminuer rapidement si nous ne les protégeons pas suffisamment.

## II. — LES PROBLEMES DE QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

### 1) Dans le Nord - Pas-de-Calais.

Depuis longtemps déjà, les captages sont l'objet de contrôles, mais les études systématiques d'hydrochimie souterraine ne remontent guère à plus d'une vingtaine d'années. Le report cartographique des valeurs des principaux paramètres physico-chimiques permet d'avoir une idée de l'état global de cette qualité, surtout lorsque des critères de qualité sont définis d'après la convergence de divers facteurs (voir les travaux de Lemoine en 1974 et Beckelynck en 1981).

Le résultat n'est pas des plus réjouissants puisque sur 515 ouvrages d'alimentation en eau potable, plus de 1/5 distribuent une eau de mauvaise qualité ( $\text{SO}_4^{--}$  et  $\text{Cl}^- > 250 \text{ mg/l}$  ;  $\text{NO}_3^- > 44 \text{ mg/l}$  ou  $\text{Th} > 50^\circ \text{ F}$ ), plus de la moitié une eau médiocre ou mauvaise, et seulement 47 % une eau correcte ou bonne (bonne : 3 %) (Beckelynck et Talbot, 1981).

En ce qui concerne la nappe de la craie et la répartition des teneurs en  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{--}$  et  $\text{NO}_3^-$ , on constate que l'essentiel des eaux souterraines de qualité médiocre ou mauvaise est compris dans la zone médiane de notre région ; en gros dans un quadrilatère : Bruay-Lille-Valenciennes-Cambrai, avec toutefois une amélioration entre Lille et Valenciennes (Beckelynck, 1981).

Il s'agit là d'un constat brut, qu'il faut analyser et critiquer avant d'interpréter : en particulier en ce qui concerne l'existence d'anomalies très localisées, qui peuvent également n'être que temporaires. La méthode

du krigeage (cartographie automatique de variables régionalisées) s'avère très fructueuse dans ce domaine, comme l'a récemment montré Droz dans le Valenciennois (1985).

Après cette critique et cette régionalisation des variables hydrochimiques, il faut rechercher les causes de la répartition obtenue, c'est-à-dire, en définitive, les *mécanismes d'acquisition d'un chimisme* particulier qu'il s'agisse de minéralisation naturelle ou de pollution des eaux souterraines.

Les conditions de contamination étant ainsi cernées, on pourra alors esquisser la *vulnérabilité* sectorielle d'une nappe, que cette vulnérabilité soit traduite cartographiquement ou quantifiée par étude de transferts (bilan, modèles, datation, traçages).

## 2) Acquisition d'une qualité chimique.

En ce qui concerne l'origine de la répartition actuelle des concentrations en éléments majeurs dans les eaux de la craie, on peut avancer quelques propositions générales :

a) *Les chlorures*, au-delà de 30 mg/l, sont essentiellement dus à l'activité humaine : pollution atmosphérique, salage hivernal des routes, pertes d'eaux usées. Cela est particulièrement net dans le bassin minier, du secteur de Béthune à celui de Carvin (Beckelync, 1981).

b) *Les sulfates*, dont les fortes teneurs, au-delà de 50 mg/l, apparaissent également liées aux zones urbanisées et industrielles (combustion, lessivage de schistes houillers : terrils ou remblais). Mais les minéralisations naturelles jouent un rôle plus important que pour les chlorures : présence de gypse diagenétique dans le Landénien et apport lent par drainance à la nappe de la craie, apport profond par contre d'eaux séléniteuses, à Saint-Ghislain et Saint-Amand-les-Eaux, en provenance d'évaporites dinantiennes. Ces origines sont étayées, non seulement par des bilans établis sur modèles qui nécessitent ces échanges verticaux, mais aussi par correspondance entre familles hydrochimiques et enfin par les valeurs des deltas de l'isotope 34 du Soufre (Droz, 1985). Cette minéralisation naturelle explique les teneurs relativement élevées en sulfates des eaux de la craie sous le bassin d'Orchies.

c) *Les nitrates*, dont la répartition fait également apparaître une correspondance entre les fortes teneurs et les zones à forte densité urbaine et industrielle, mais cela lorsque la nappe est libre. En nappe captive, les concentrations restent très faibles (moins de 5 mg/l dans le bassin d'Orchies). La simple lecture de cette carte montre qu'on ne saurait imputer les fortes teneurs en  $\text{NO}_3^-$  à la seule activité agricole : celle-ci n'y contribue actuellement pas beaucoup plus que la pluie (5 à 10 mg/l). L'étude isotopique des nitrates ( $^{15}\text{N}$ ) ne démontre du reste pas du tout une provenance d'engrais chimiques, ce qui ne signifie nullement l'inno-

cuité de ces derniers, mais montre que cette contamination relativement récente n'a pas encore atteint la nappe de la craie dans son ensemble. Les études réalisées en zone rurale de l'Artois-Cambrésis (Arnoult, 1981 ; Crampon, 1983) comme sur certains champs captants (Les Ansereuilles : Caron, 1985) soulignent une nette prédominance des rejets domestiques (15 g/jour /habitant) dans les apports d'azote en milieu souterrain. Plusieurs pollutions localisées de l'Artois-Cambrésis ont du reste vu leur origine confirmée par traçage.

Contrairement à ce qui se passe avec les sulfates, la réalimentation par drainance ne semble pas favoriser le transfert de nitrates (bassin d'Orchies, par ex.). Par contre, les pertes de rivières ou canaux pourraient largement contribuer à enrichir la nappe en nitrates. A noter toutefois, que sous alluvions, des phénomènes de réduction et de dénitrification bactérienne paraissent à l'origine d'une diminution des teneurs en nitrate (exemple : canal de la Deûle, aux Ansereuilles, selon Caron, 1985). Il convient cependant de souligner que le mécanisme précis de la disparition rapide des nitrates dès que la nappe de la craie devient captive relève de phénomènes encore mal cernés, qui font l'objet de recherches actives du B.R.G.M. et de certaines universités (Rennes).

Dans les processus de minéralisation de l'eau qui s'infiltré, de nombreuses transformations et échanges ioniques s'effectuent dans la zone non saturée où l'activité biologique peut être intense, mais où les minéraux argileux peuvent également jouer un rôle déterminant. Bernard (1979) a particulièrement étudié ces phénomènes sur le site expérimental de Sainghin-en-Mélantois. Dans ces processus, comme pour les transferts verticaux de pollution, la vitesse d'infiltration est déterminante. Dans les limons de Sainghin-en-Mélantois, elle est de l'ordre du mètre par an (0,8 à 1,2 m/an), valeur que l'on retrouve (Arnoult, 1981) dans l'Artois-Cambrésis, en datant les eaux d'une dizaine de forages (1 à 1,8 m/an) par le Tritium.

Connaître les mécanismes hydrochimiques de minéralisation et de pollution est évidemment nécessaire pour prévoir l'évolution de cette qualité et gérer au mieux la ressource actuelle tout en tenant compte de sa vulnérabilité.

## 3) Prévision de l'évolution de la qualité.

### a) La vulnérabilité.

La vulnérabilité d'une nappe à la pollution est actuellement encore une notion essentiellement qualitative : une nappe est plus ou moins exposée naturellement à un risque de transfert d'eaux polluées en provenance de la surface.

Traduite sur carte, cette vulnérabilité est représentée par des zones, dont les principaux critères sont (Beckelync, 1981) :

— la nature lithologique des affleurements : absence de nappe, nature de l'aquifère (nappe libre) ou de la couverture ;

— la profondeur de la surface libre ou épaisseur de zone non saturée ;

— les échanges nappe-rivière.

On peut également tenir compte, dans la mesure où on les connaît, des perméabilités verticales en zone non saturée et de la répartition des transmissivités dans les aquifères. Plus habituellement, on y reporte les directions d'écoulement, déduites de la piézométrie ou de traçages.

Si de tels documents sont indispensables pour éviter des décisions catastrophiques au niveau des aménagements, il faut aussi avoir conscience de leurs limites. La *prévision de l'évolution* de la qualité d'une eau captée doit pouvoir être *quantifiée*, qu'il s'agisse d'une contamination continue ou d'un déversement accidentel temporaire.

b) *Les modèles.*

C'est à ce stade qu'interviennent les *modèles prévisionnels mathématiques de transfert de masse* ou plus simplement de transport.

Nous pouvons en distinguer trois sortes :

— des modèles de *bilan* ;

— des modèles de *fonction de transfert*, dits aussi de "boîte noire" ;

— des modèles *conceptuels*.

Il convient de souligner que ces outils, relativement classiques en hydrologie et en hydrodynamique, sont encore d'application récente dans le domaine du transport en milieu souterrain.

Nous ne parlerons pas des *modèles "boîte noire"* prenant en compte des fonctions théoriques de transfert, telle la réponse impulsionnelle, modèles utilisés

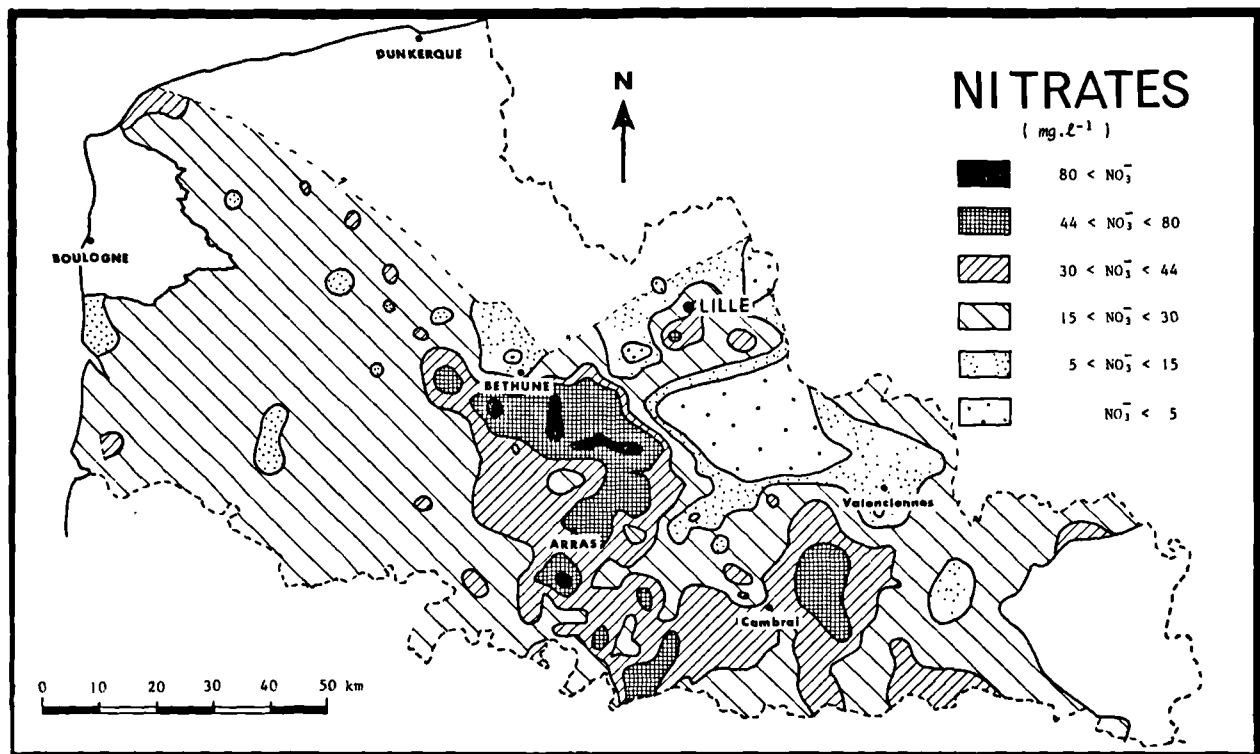


Fig. 6. — Teneurs en nitrates (année 1977) de la nappe de la craie.

Fig. 6. — Nitrate content map (1977) in chalk aquifer in northern France.

(after Beckelynck, 1981 ; re-drawn by Porel, 1987).

surtout par l'équipe du Centre d'Études Nucléaires de Grenoble (Guizerix et Margrita, 1976).

Les modèles aboutissant à l'équilibre d'un bilan entrées-sorties sont déjà beaucoup plus porteurs d'informations, dans la mesure de la précision des différentes composantes de ce bilan :

— les modèles hydrodynamiques, les désormais classiques "modèles de nappes" qui mettent en évidence un échange vertical nappe-rivière ou par drainage, contribuant quantitativement à la prévision des transports polluants du sol vers la nappe, si l'on connaît les concentrations de départ ;

— mais plus récemment, à partir d'un modèle mathématique global d'échanges entre réservoirs successifs dans un bassin versant, le B.R.G.M. a mis au point, en décembre 1985, un modèle de transfert de nitrates, le modèle "BICHE", qui tient compte de l'épandage au sol des engrais (masse par unité de surface et par époque ou pas de temps), de la consommation par le type de plantes, de la minéralisation dans le sol et, enfin, de la libération par les résidus de culture. Ce modèle ne donne toutefois l'évolution de la concentration qu'en un seul point : exutoire du bassin versant ou piézomètre (Thiery et Seguin, 1985).

Les modèles que l'on pourrait qualifier de *conceptuels*, tentent de reproduire les mécanismes physico-chimiques de transport, diffusion et sorption en utilisant les lois mathématiques qui paraissent les mieux adaptées (loi de Fick et coefficients de distribution liés aux isothermes de sorption). Actuellement, ces modèles sont essentiellement appliqués aux transferts en milieu saturé. On peut, là encore, en distinguer schématiquement deux catégories :

— les modèles numériques traduisent, pour chaque pas d'espace et chaque pas de temps, l'équation différentielle de transport, avec possibilité de faire varier spatialement les paramètres, afin de représenter des milieux anisotropes ou hétérogènes. Le modèle "WAT-QUA" appliqué à la nappe de la craie a ainsi permis de prévoir l'évolution des teneurs en nitrates dans un secteur au SE de Cambrai, sur une période de 20 ans et selon diverses hypothèses d'exploitation (Arnoult, 1981). Dans l'Avesnois, un modèle de convection-diffusion en milieu fissuré a été élaboré par Carlier (1983) pour reproduire et interpréter des traçages ;

— la deuxième catégorie de modèle "conceptuel" de transport correspond à l'utilisation d'une solution analytique de l'équation différentielle de transport. Leurs inconvénients correspondent aux conditions aux limites nécessaires pour obtenir la solution (mode d'injection, vitesse ou débit constant), mais aussi à la nécessité d'un milieu isotrope. Les avantages sont, par contre, la simplicité des calculs qui peuvent être réduits à l'utilisation d'abaques comme ceux proposés par Saüty (1977 et 1978) et notre propre équipe, notamment pour l'interprétation des traçages, la prévision des concentrations et des temps d'arrivée d'une pollution accidentelle (Crampon, 1982, 1983 et 1984).

c) *Les phénomènes hydrodispersifs.*

Plus fondamentalement, avec l'étude des phénomènes hydrodispersifs, c'est un volet nouveau de l'hydrogéologie qui s'ouvre depuis une dizaine d'années, grâce aux apports des mécaniciens des fluides, des physiciens et chimistes du sol.

Ces différents spécialistes connaissent bien mieux que nous, chacun dans leur domaine, les phénomènes qui vont se superposer pour assurer :

— une rétention partielle ou totale, réversible ou non ;

— le transfert convectif dans les fissures ou les pores de l'aquifère ;

— la diffusion moléculaire en eau libre ou dans la matrice poreuse.

Mais c'est à nous, géologues, d'assurer la synthèse compréhensive de ces phénomènes dans le milieu naturel. Cela implique une étroite collaboration comme celle qui s'effectue actuellement autour du site expérimental de Béthune avec des géochimistes des isotopes, mécaniciens des fluides et informaticiens (LIMSI, Université de Paris-Sud).

La *raison des traçages* (outre leur utilité immédiate de mise en évidence de relations géométriques et de vitesses d'écoulements) est notamment de permettre la détermination des *paramètres de transport*.

Mais cette détermination n'est pas plus satisfaisante pour nous, que ne l'est pour le structuraliste, le relevé de pendages et de directions de couches ou de fractures. Ce que nous cherchons, c'est précisément les relations de causalité entre certaines caractéristiques géométriques du milieu poreux ou fissuré et les paramètres de dispersion : les premiers résultats ont été rendus publics en 1985 (Crampon, 1985).

Corollairement, si les traçages traduisent une certaine structure du milieu, leur confrontation avec les résultats d'autres méthodes, telles que bilan hydrique, rosaces ou stéréogrammes de fracturation, pompages d'essai, permet de corroborer l'anisotropie ou l'hétérogénéité d'une formation aquifère et même d'en souligner plus finement certaines nuances, comme nous l'avons montré en 1982 sur le site de Béthune avec Porel et plus récemment avec Carlier sur l'Avesnois dans une communication orale à la Société Géologique de France en janvier 1986 (Crampon, Carlier, Colbeaux, Droz et Lempereur, 1987).

### III. — CONCLUSION

Après ce panorama hydrogéologique que j'ai tenté de présenter de la façon la plus large possible, mais qui s'est achevé sur notre recherche universitaire lilloise, est-il encore nécessaire de revenir au double titre de cet exposé ?

— La *diversité des échelles* dans le domaine hydrogéologique est la même que pour toute autre discipline géologique, au moins dans l'espace. Si la tectonique des plaques ne paraît guère, a priori, avoir de rapport avec l'étude d'une nappe, les grands linéaments, les décrochements et les données de fracturation à l'échelle d'un continent ont une incidence fondamentale pour le développement des aquifères fissurés, karstiques ou non ; il n'est que de rappeler ici la récente analyse de Drogue (1986) sur la genèse des karsts chinois. Quant aux phénomènes de sorption ou de diffusion moléculaire, il est inutile d'insister sur le caractère ultramicroscopique des investigations qu'ils requièrent.

— Si j'ai parlé d'*interface*, c'est à double titre, chacun l'aura compris :

- l'hydrogéologie est la science des eaux contenues dans leur réservoir minéral naturel. Les processus d'écoulement, de rétention, de fixation, d'échange,

relèvent de *phénomènes d'interface entre les phases* en présence : solide-liquide principalement, mais aussi phase gazeuse en milieu non saturé ;

- l'hydrogéologie est aussi à l'*interface de nombreuses disciplines* dont elle utilise les connaissances et les outils : mathématiques, mécanique des fluides, informatique, chimie, science du sol, hydrologie, météorologie, géographie, économie et gestion. Mais n'est-ce pas aussi le lot des autres branches de la Géologie et de toutes les Sciences Naturelles finalement ?

Cette diversité des domaines interférents, c'est notre richesse, puisqu'elle exige un approfondissement très varié ; c'est notre force aussi, puisque c'est, en définitive, au naturaliste qu'incombe la difficile, mais combien passionnante tâche, d'établir la synthèse explicative des phénomènes naturels qui nous entourent.

## BIBLIOGRAPHIE

- 1) ARNOULT Ph. (1981). — Gestion quantitative et qualitative des eaux souterraines en zone agricole. Application à la nappe de la craie de l'Artois et du Cambrésis. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Lille, 182 p.
- 2) BECKELYNCK J. (1981). — Traitement régionalisé des paramètres contribuant à la gestion des nappes. Application à la modélisation de la nappe de la craie dans le bassin de l'Aa et de la moyenne Lys (Région Nord - Pas-de-Calais). Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Lille, 138 p.
- 3) BECKELYNCK J. et TALBOT A. (1981). — Mémoire et exploitation des données chimiques dans le groupement de bassins Artois-Picardie. Années 1975, 1976, 1977. Rapport B.R.G.M. n° 81 SGN 371 NPC.
- 4) BERNARD D. (1979). — Contribution à l'étude hydrogéochimique de la nappe de la craie dans le Nord de la France. Etat et acquisition du chimisme de l'eau. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Lille, 179 p.
- 5) BESBES M. et TALBOT A. (1983). — L'alimentation en eau potable de la métropole du Nord. Rapport de synthèse. Doc. Soc. des Eaux de la Métropole du Nord. E.N.S.M. de Paris et B.R.G.M., 44 p.
- 6) BODELLE J. et TIRAT M. (1977). — Utilisation des eaux souterraines en France. Rapport général, Thème 2, Coll. "Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France", Nice, oct. 1977 et *Bull. B.R.G.M.*, (2<sup>e</sup> sér.), sect. III, 4, 1979, p. 415-437.
- 7) BOUWER H. (1978). — *Groundwater Hydrology*. McGraw Hill, 480 p.
- 8) CARLIER E. (1983). — Influence de la fracturation sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif des calcaires paléozoïques de l'Avesnois (Nord). Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Lille, 224 p.
- 9) CARON C. (1985). — Les apports azotés dans le champ captant des Anseruilles (Nord). *Mém. D.E.A.*, Lille, 57 p.
- 10) CASTANY G. (1977). — Ressources en eau souterraine de la France. Rapport général, Thème I, Coll. "Les eaux souterraines et l'approvisionnement en eau de la France", Nice, oct. 1977 et *Bull. B.R.G.M.*, (2<sup>e</sup> sér.), sect. III, 4, 1979, p. 401-414.
- 11) CASTANY G. (1982). — Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod Université, 238 p.
- 12) CAULIER P. (1974). — Etude des faciès de la craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Lille, 156 p.
- 13) COLBEAUX J.P. (1975). — Géométrie et cinématique de la fracturation en Boulonnais. Extension vers l'Est. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Lille, 141 p.
- 14) COLBEAUX J.P. (1984). — L'évolution structurale du Sud de la Belgique et du Nord de la France : sa relation avec la dérive des continents. Quelques hypothèses. *Bull. Soc. belge de Géol.*, 93, 1/2, p. 71-78.
- 15) COLBEAUX J.P., DEBRABANT P., LEPLAT J. et ROBASZYNSKI F. (1975). — Les craies de Sainghin-en-Mélantois (Nord) : faunes du passage turonoconiacien, tectonique cisailante, physico-chimie. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XCV, p. 17-35.
- 16) COLBEAUX J.P., LEPLAT J., PAEPE R. et SOMME J. (1978). — Tectonique récente dans le Nord de la France et le Sud de la Belgique. Exemple de la plaine de la Lys (Feuille d'Hazebrouck à 1/50.000). *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XCVIII, p. 179-188.
- 17) COPIN-MONTEGUT Cl. et G. (1976). — Le laboratoire marin. *Sciences et Vie*, hors sér., n° 115, p. 24-33.



- 18) CRAMPON N. (1982). — Détermination de la zone contaminée ou susceptible de l'être dans quelques cas d'écoulement et de mode d'injection. 3<sup>e</sup> Coll. d'Hydrologie en Pays calcaire, Neuchâtel (Suisse), 7-10 oct. 1982. *Ann. Sc. Univ. Besançon*, mém. n° 1, p. 77-87.
- 19) CRAMPON N. (1983). — Abaques de détermination rapide des caractéristiques hydrodispersives lors de traçages par injection brève. *Hydrogéol. Géol. de l'Ing.* 4, p. 287-292.
- 20) CRAMPON N. (1983). — Qualité de la nappe de la craie dans les zones rurales de l'Artois et du Cambrésis. Essai de typologie de la pollution azotée. Rapport Univ. des Sc. et Techn. de Lille, 68 p.
- 21) CRAMPON N. (1984). — Prévision rapide de l'extension d'une pollution dans quelques cas d'écoulement et de mode d'injection. *J. of Hydrol.*, 70, (1/4), p. 149-165.
- 22) CRAMPON N. (1984). — Prévision du temps d'arrivée et éventuellement de passage d'une pollution en eau souterraine. *Hydrogéol. Géol. de l'Ing.*, 3, p. 233-240.
- 23) CRAMPON N. (1985). — Relationships between hydrodispersive characteristics (kinematic porosity and dispersivity) and structure of fractured medium. IUTAM Symposium (Single- and multi-phase fluid flow through heterogeneous permeable materials), Lower-Hutt (New Zealand), nov. 1985.
- 24) CRAMPON N., DROZ B. et POREL G. (1982). — Complémentarité des traçages d'essai et des études hydrodynamiques pour la connaissance de la répartition spatiale des caractéristiques d'un milieu calcaire fissuré. Exemple de la craie sur le site expérimental de Béthune. Coll. "Les milieux discontinus en Hydrogéologie". Orléans, nov. 1982, *Doc. B.R.G.M.*, n° 45, p. 233-252.
- 25) CRAMPON N., CARLIER E., COLBEAUX J.P., DROZ B. et LEMPEREUR R. (1987). — Guides structuraux de l'écoulement souterrain dans les formations paléozoïques carbonatées de l'Avesnois (Nord de la France). *Bull. Soc. géol. de France* (8), t. III, n° 4, p. 783-796.
- 26) DELPORTE B. (1979). — Traitement de l'information hydrogéologique, socio-économique et économique. Application au bassin de la Sambre (Nord de la France). Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Lille, 202 p.
- 27) DOREMUS C. (1978). — Les craies du Nord de la France. Corrélations entre la lithostratigraphie, la microtexture et les propriétés mécaniques. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Lille, 132 p.
- 28) DROGUE Cl. (1986). — Fracturing in the paleozoic carbonate formations of southern China (Guangxi fracture area): interpretation within the tectonic context of eastern asia. *Tectonophysics*, 121, p. 295-302.
- 29) DROZ B. (1985). — Influence de la structure et de la nature des terrains du Valenciennois sur la qualité de la nappe de la craie (Nord de la France). Apport du kriegeage à l'hydrochimie régionale. Gestion qualitative des eaux souterraines. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Lille, 205 p.
- 30) GUIZERIX J. et MARGRITA R. (1976). — Méthodologie d'étude par traceur des transferts de masse. *La Houille Blanche*, 3/4, p. 187-196.
- 31) HARROIS-MONIN F. (1977). — L'eau et nous. *Science et Vie*, hors série, n° 120, p. 108-117.
- 32) KLEINHANS M. (1986). — Bassin versant de la Liane. Rapport de synthèse. Service Hydrologique centralisateur du Bassin Artois-Picardie, 20 p.
- 33) LEMOINE B. (1974). — Essai de classification et de cartographie de la qualité chimique des eaux souterraines. Rapport B.R.G.M., n° 74, SGN 404 AME, 37 p.
- 34) MANIA J. (1971). — Contribution à l'étude de la nappe des sables landéniens en Flandres franco-belges et dans le bassin d'Orchies. Thèse de 3<sup>e</sup> cycle, Lille, 161 p.
- 35) MANIA J. (1978). — Contribution à l'étude des systèmes aquifères. Leurs influences sur la gestion des ressources en eau dans le Nord de la France. Thèse Sc., Lille, *Soc. géol. Nord*, Mém. n° XV, 228 p.
- 36) OWEN T. (1981). — Le secret de la vie: le printemps de la Terre. *Sciences et Vie*, Hors série, n° 137, p. 135-138.
- 37) SAUTY J.P. (1977). — Contribution à l'identification des paramètres de dispersion dans les aquifères par interprétation des expériences de traçage. Thèse Doct.-Ing., Grenoble, 157 p.
- 38) SAUTY J.P. (1978). — Identification des paramètres du transfert hydrodispersif dans les aquifères par interprétation de traçages en écoulement cylindrique convergent ou divergent. *J. of Hydrol.*, 39, p. 69-105.
- 39) THIERY D. et SEGUIN J.J. (1985). — Modélisation globale des transferts de nitrates dans un bassin hydrogéologique pour prévoir l'évolution des concentrations dans les eaux souterraines. Rapport B.R.G.M., n° 85, SGN 663 EAU, 182 p.
- 40) VAILLANT J.R. (1977). — Accroissement et gestion des ressources en eau. Collection du BCEOM. Eyrolles.



## Modèles de chambres magmatiques

### De la théorie à l'expérience et de l'expérience à la réalité :

schémas et fonctionnement des réservoirs ; conséquences volcanologiques et pétrologiques

### Models of magma chambers. - From theory to experiment and reality :

sketches and activity of reservoirs ; volcanological and petrological implications

par Christian LEFEVRE (\*)

**Résumé.** — La nature des produits émis lors de l'activité volcanique, les dynamismes éruptifs eux-mêmes, résultent de mécanismes physico-chimiques qui affectent les magmas stockés dans des chambres magmatiques situées à l'aplomb des volcans. De nombreuses expériences ont été réalisées en laboratoire pour modéliser le comportement de différents liquides évoluant dans ces réservoirs.

Les expériences sur le *fractionnement des liquides* concluent à un comportement distinct des magmas tholéitiques et des magmas calco-alcalins, aboutissant dans les deux cas à envisager des chambres magmatiques chimiquement zonées (soit à leur base, soit dans leur partie supérieure) et pouvant présenter des discontinuités majeures de composition à certains niveaux du réservoir.

Les modèles expérimentaux sur la *convection* suggèrent, du point de vue dynamique, une structure spatiale des chambres en trois zones : une partie supérieure, fortement agitée et instable ; une partie centrale convective, chimiquement homogène ; une partie inférieure, isolée de la zone convective et stable.

Les données expérimentales sur la *réalimentation* des chambres magmatiques montrent que des magmas, distincts des points de vue physiques et chimiques, évoluent dans un premier temps chacun pour leur compte dans le réservoir. Au cours de leur différenciation, si leurs caractères physico-chimiques deviennent proches, ils peuvent devenir miscibles.

Les processus physico-chimiques observés dans les expériences ont des *implications magmatologiques* dont on retrouve parfois des témoins dans les laves aussi bien tholéitiques que calco-alcalines ; ainsi peuvent s'expliquer des gradients de composition chimique des produits, des hétérogénéités de composition chimique ou minéralogique, des déséquilibres minéralogiques, la présence de cumulats magmatiques divers.

Sont abordées également les interactions qui peuvent exister entre le mode de fonctionnement de la chambre, établi par les modèles, et les *mécanismes éruptifs* eux-mêmes. Ces relations concernent, pour un volcan déterminé, la nature et le volume des produits émis, la fréquence des éruptions et les intervalles de temps séparant deux émissions.

**Abstract.** — *The composition of the volcanic products and the effusive dynamisms themselves, are related to physical mechanisms that affect magmas inside magmatic chambers that are located beneath the volcanoes. Numerous laboratory experiments have been attempted in order to model the behaviour of the different melts that evolve inside those reservoirs.*

*Experiments concerning fractional crystallisation of liquids conclude to a different behaviour for tholeiitic and calc-alkaline magmas, leading in both cases to consider chemically zoned magmatic chambers (either at thinbottom or at thintop), where major discontinuities may be encountered at different levels.*

*Experimental models on convection suggest spatial subdivision of the chambers into three zones in terms of dynamisms : respectively an upper zone, highly stirred and unstable, a central convective chemically homogeneous one and a lower zone that is isolated from the convective zone and which is stable.*

*Experimental data on magmatic chambers replenishment indicate that physically and chemically distinct magmas evolve first independently inside the reservoir. Then, during their differenciation their physico-chemical character may become sufficiently close to permit miscibility.*

---

(\*) Université des Sciences et Techniques, Laboratoire de Pétrographie, Villeneuve d'Ascq.  
Conférence présentée le 8 Octobre 1986.

*The physico-chemical processes acting during the experimentation bear magmatological implications some evidence of which may sometimes be found in the tholeiitic as well as in the calc-alkaline lavas. Chemical composition gradients of the products mineralogical or chemical heterogeneity, mineralogic disequilibrium or the existence of varied magmatic cumulates may thus be explained.*

*Inter connections that may exist between the way magma chambers operate (as described by models) and the effusive mechanisms proper are also examined. These relations concern the nature and volume of the erupted magmas, eruptions frequencies and intervals between two separate emissions.*

## I. — PRESENTATION DU SUJET

On désigne par volcanisme l'ensemble des phénomènes liés à la montée et à l'épanchement sur la surface de la Terre de magmas. Cette activité peut être, soit effusive, soit explosive.

Les roches qui découlent de ces activités peuvent être très diverses. La diversité des produits émis dépend essentiellement de deux facteurs :

- 1° la nature du magma originel,
- 2° des processus de différenciation qui ont affecté ces magmas.

Trois types principaux de magmas primaires ont été reconnus : les magmas basaltiques tholéiitiques, les magmas basaltiques alcalins et les magmas andésitiques. L'origine de ces magmas résulte de mécanismes de fusion partielle du Manteau Supérieur à des profondeurs comprises entre 20 et plus de 100 km. Ces magmas, entre leur lieu de genèse et leur effusion à la surface terrestre ont donc à parcourir des dizaines de kilomètres ; autant dire qu'ils arrivent rarement à leur état initial à la surface. Ils peuvent et ils subissent très souvent au cours de leur ascension (même si celle-ci est rapide), des processus de contamination avec l'encaissant, des mécanismes de cristallisation qui font que le liquide qui s'épanche n'a pas la même composition que le liquide initial. D'autre part, dans de nombreux cas, ces magmas peuvent s'arrêter au cours de leur ascension à des niveaux plus ou moins superficiels dans la croûte et être stockés dans ce que l'on dénomme des *chambres magmatiques* (ou *réservoirs*) ; là, ils vont pouvoir évoluer, se différencier et donner naissance à une succession de liquides de compositions diverses qui, s'ils sont émis, donneront naissance à une succession de laves différentes. Ces laves *cogénétiques* constituent ce que l'on appelle une *série comagmatique*. Une série magmatique est donc caractérisée par la nature du magma initial et par les produits qui résultent de la différenciation de ce magma.

On distingue trois grandes séries magmatiques :

- *La série tholéiitique* : basaltes, ferrobasaltes, rhyolites.
- *La série alcaline* : basaltes alcalins, hawaïtes, mugéarites, benmoréites, rhyolites, trachytes, phonolites.
- *La série calco-alcaline* : (basaltes andésitiques), andésites, dacites, rhyolites.

Durant ces dernières années, à partir de données structurales, volcanologiques, pétrographiques, géochimiques et en modélisant de façon expérimentale des chambres magmatiques, les géologues se sont évertués à rechercher les mécanismes physico-chimiques qui sont susceptibles d'affecter les réservoirs et qui permettent d'expliquer la différenciation magmatique, la diversité des produits émis et les dynamismes éruptifs.

De nombreux mécanismes ont été proposés depuis plus de cent ans pour expliquer le processus de différenciation ; citons les mélanges de magma, la contamination crustale, les transferts gazeux et surtout la *cristallisation fractionnée*.

Dans son concept initial (Bowen, 1928), ce mécanisme peut se résumer ainsi : la cristallisation au sein d'un magma de fractions minéralogiques successives qui se séparent du liquide, engendre des liquides résiduels successifs de compositions différentes.

Plusieurs objections vont à l'encontre de ce mécanisme simple ; s'il est indéniable qu'il existe, il ne rencontre pas moins des obstacles sérieux dans un certain nombre de cas. Par exemple :

1) Comment expliquer que dans certains volcans il puisse y avoir *en même temps* effusion de laves acides et de laves basiques ; il faut envisager un processus qui permette l'éruption en même temps de magmas indifférenciés et de leur propre produit de cristallisation, ce qui est impossible. Il faut admettre que ces deux types de magmas existent en même temps dans le réservoir et qu'ils ne sont pas miscibles.

2) Dans bien des cas, au cours d'un même cycle éruptif, les degrés de différenciation des laves émises sont trop grands, leur volume trop important et les intervalles de temps trop courts pour que la différenciation magmatique soit le produit d'une cristallisation fractionnée simple. Cela aurait nécessité d'énormes corps magmatiques basiques qui auraient dû se différencier à vitesse rapide et avec une grande ampleur.

Si la cristallisation fractionnée, telle qu'on la conçoit classiquement, n'est pas envisageable, quel autre processus peut-il être envisagé ?

Dès 1857, Durocher, considérant les aspects chimiques des magmas, suggère qu'un magma initial homogène peut se zoner verticalement sous l'influence de la gravité alors qu'il est encore à l'état liquide. C'est ce concept qui a été repris ces dernières années et qui a été dénommé "*fractionnement de liquides*".

## II. — PRINCIPES DU FRACTIONNEMENT DES LIQUIDES

Ce mécanisme consiste en une séparation de magmas de compositions différentes alors qu'ils sont en grande partie, voire en totalité, à l'état liquide. Le caractère spécifique du processus est son pouvoir de séparer des liquides sans séparation gravitative d'une grande proportion de minéraux.

### 1) Principe.

La densité d'un fluide est fonction à la fois de sa composition et de sa température (fig. 1). Ainsi un magma basaltique est-il plus dense qu'un magma andésitique ou rhyolitique; c'est ce qu'il est convenu d'appeler changement de densité par *diffusion chimique*. D'autre part, pour un magma de composition donnée, sa densité augmente lorsque la température diminue; c'est le changement de densité par contraction thermique ou *diffusion thermique*. Dans cette théorie de la double diffusion (McBirney et Noyes, 1979), la densité d'un liquide va donc dépendre de la compétition qui s'instaure entre diffusion chimique et diffusion thermique.

Deux types de variations sont possibles au cours de l'évolution des magmas, selon que ces deux effets se complètent ou s'opposent.

#### PREMIER CAS.

*Cas des magmas calco-alcalins.* - Au cours du refroidissement cristallise une grande proportion de minéraux féminiques; les liquides résiduels produits ont une densité qui diminue au cours de la différenciation. Ceci se comprend aisément quand on considère l'influence de la diffusion chimique et de la contraction thermique sur les changements de densité des liquides (Murase et McBirney, 1973). En effet, considérons un liquide andésitique ( $d = 2,45$ ;  $T = 1.100^\circ \text{C}$ ) et un liquide rhyolitique ( $d = 2,20$ ;  $T = 900^\circ \text{C}$ ), le changement de densité par diffusion chimique par degré est de  $(2,45 - 2,20) / 2,45 (1.100 - 900) = 6,8.10^{-4} / ^\circ \text{C}$ . Le changement de densité par diffusion thermique de sens opposé à la diffusion chimique est beaucoup plus faible:  $-2$  à  $-3.10^{-5} / ^\circ \text{C}$ . Par conséquent, quand un magma calco-alcalin refroidit, le changement de densité par diffusion chimique est l'effet le plus important, c'est-à-dire que les liquides deviennent de plus en plus légers (fig. 1).

#### DEUXIÈME CAS.

*Cas des magmas tholéitiques.* - Dans ce cas, la proportion des minéraux féminiques qui cristallisent est plus faible; les liquides résiduels enrichis en éléments lourds deviennent plus denses. Diffusion chimique et contraction thermique sont de même sens, se complètent et tendent à produire des liquides plus denses. Lorsque l'enrichissement en fer est maximum, après un certain niveau de différenciation, cette évolution

change et les liquides différenciés deviennent moins denses (fig. 2).

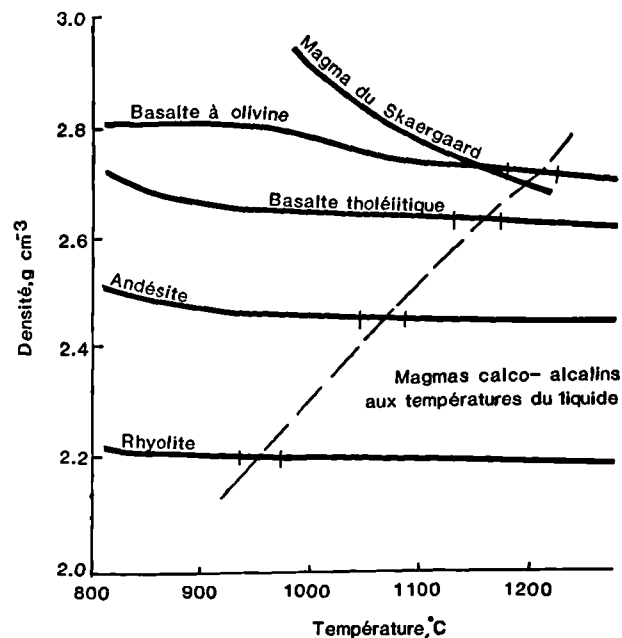


Fig. 1. — Densité de quelques roches magmatiques en fonction de leur nature et de leur température. La ligne en tireté indique la densité au liquidus des roches de la série calco-alcaline. (Données de Murase et McBirney, 1973 in McBirney et al., 1985).

Fig. 1. — Variations of density with temperature for some common igneous rocks. The dashed line is drawn through the liquidus temperatures of the various rocks of calc-alkaline composition.

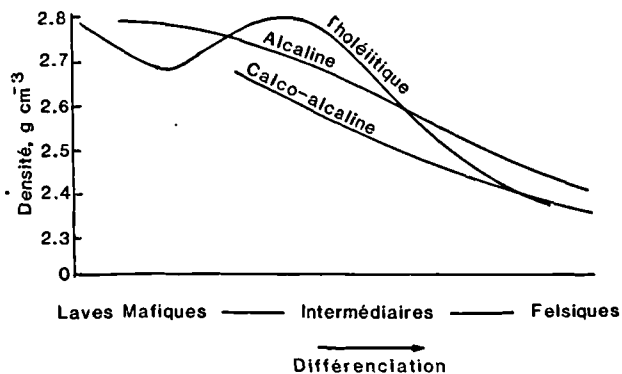


Fig. 2. — Changements de densité des roches volcaniques des principales séries magmatiques selon leur degré de différenciation. (Selon McBirney et al., 1985).

Fig. 2. — Density variations with differentiation of the major types of igneous series.

Il est à noter que le comportement des magmas basaltiques alcalins doit être intermédiaire entre les deux autres et nous ne les évoquerons pas par la suite.

## 2) Conséquences sur les processus physico-chimiques pouvant affecter une chambre magmatique.

Supposons un réservoir magmatique rempli d'un liquide initial de composition homogène (fig. 3). Ce liquide va commencer à se refroidir là où la température est la plus basse, c'est-à-dire aux murs du réservoir. Perpendiculairement aux murs existent donc un gradient

thermique (dû à la diffusion thermique) et un gradient de composition (dû à la diffusion chimique) qui délimitent une "couche limite" peu épaisse qui sépare le corps principal du réservoir de son encaissant. La diffusion thermique étant beaucoup plus rapide que la diffusion chimique, son influence est prépondérante.

Deux cas sont à envisager :

### PREMIER CAS.

*Cas d'un magma tholéïitique.* - Diffusion chimique et contraction thermique se renforcent. Proche du mur, on a des liquides enrichis en fer (C), donc plus denses (Q). Dans ce cas, les liquides refroidis près du mur, de forte densité, auront tendance à descendre et chuter le long des parois vers le fond de la chambre.

### DEUXIÈME CAS.

*Cas d'un magma calco-alcalin.* - Diffusion chimique et contraction thermique s'opposent. Tout près du mur, la diffusion chimique est prépondérante ; on a un liquide appauvri en éléments férriques, donc moins dense. Ce liquide tout près du mur aura tendance à monter. Un peu plus loin du mur, la diffusion chimique se fait moins ressentir et la contraction thermique devient alors prépondérante. En conséquence, les liquides deviennent plus denses et tendent à chuter.

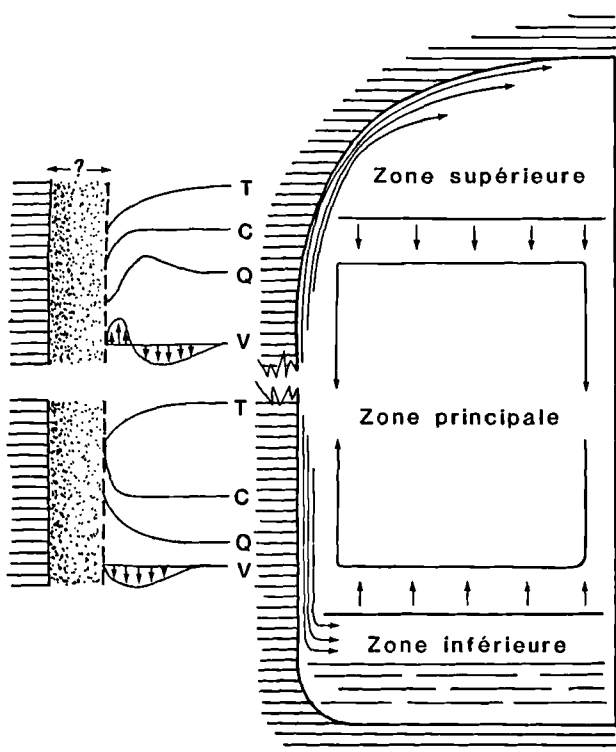


Fig. 3. — Modèle de diffusion chimique et de diffusion thermique dans la couche limite d'un liquide aux murs latéraux d'une chambre magmatique (selon Mc Birney *et al.*, 1985). La partie supérieure de la figure illustre le comportement d'un magma calco-alcalin ; la partie inférieure, le comportement d'un magma tholéïitique. Les diagrammes de gauche schématisent les profils de température (T), la concentration en éléments lourds (C), la densité (Q) et la vitesse (V) des liquides. (Explications dans le texte).

Fig. 3. — Chemical and thermal diffusion models for the marginal layer next to the steep wall of a magma chamber ; the upper part of the diagram illustrates the case of a calc-alkaline magma ; the lower part, the case of a tholéïitic magma. The diagram on the left illustrates the profiles for temperature (T), concentration of heavy elements (C), density (Q) and velocity (V) of the liquids.

## III. — DE LA THEORIE A L'EXPERIENCE. MODELISATIONS DE CHAMBRES MAGMATIQUES

Un certain nombre d'expériences ont été réalisées au laboratoire par différents auteurs afin de modéliser les processus physico-chimiques susceptibles d'affecter les réservoirs magmatiques naturels. Nous présentons brièvement ci-dessous quelques-unes de ces expériences qui concernent les fractionnements des liquides (expériences de Mc Birney, 1980, 1985), les phénomènes convectifs (expériences de Brandeis *et al.*, 1984) et les mécanismes de la réalimentation des chambres magmatiques (expériences de Huppert et Turner, 1981) (\*).

### A) EXPERIENCES SUR LE FRACTIONNEMENT DES LIQUIDES

Pour tester les concepts évoqués précédemment, à propos du fractionnement des liquides, Mc Birney *et al.* (1980, 1985) ont testé une série de modèles simples en utilisant des solutions aqueuses qui peuvent être observées lorsqu'elles cristallisent expérimentalement au laboratoire.

(\*) Le lecteur qui désire plus de précisions sur les procédures expérimentales doit se reporter aux articles originaux cités en bibliographie.

Pour modéliser une chambre magmatique, ils utilisent des réservoirs expérimentaux vitrés qu'ils remplissent d'une solution aqueuse de carbonate de sodium qu'ils refroidissent progressivement en réfrigérant les côtés latéraux et supérieurs. Les flux de liquides qui animent le réservoir lors des expériences, la séparation des liquides peuvent être observés en éclairant fortement la cuve. Les liquides engendrés, de compositions et de densités différentes, possèdent en effet des indices de réfraction distincts, ce qui permet leur observation visuelle directe.

Le système  $\text{Na}_2\text{CO}_3 - \text{H}_2\text{O}$  est un système binaire (fig. 4) qui comprend un eutectique  $\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{glace}$ . Les magmas calco-alcalins peuvent être représentés par des solutions plus riches en  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  que l'eutectique (liquide A en fig. 4); en effet, la cristallisation de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  laisse un liquide résiduel plus dilué et de densité plus faible que la solution initiale. Le comportement d'un système tholéiitique peut être modélisé par une solution plus diluée en  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  que l'eutectique (liquide B en fig. 4) dans laquelle cristallise au liquidus la glace et laisse un liquide résiduel plus dense.

Deux types d'expériences ont donc été réalisées pour modéliser le comportement des chambres magmatiques tholéitiques d'une part et calco-alcalines d'autre part.

### 1) Modélisation d'une chambre magmatique tholéiitique.

a) *L'exemple du Skaergaard*: Un des meilleurs exemples géologiques connus d'évolution d'un magma tholéiitique est l'intrusion du Skaergaard au Groenland (Wager et Brown, 1968).

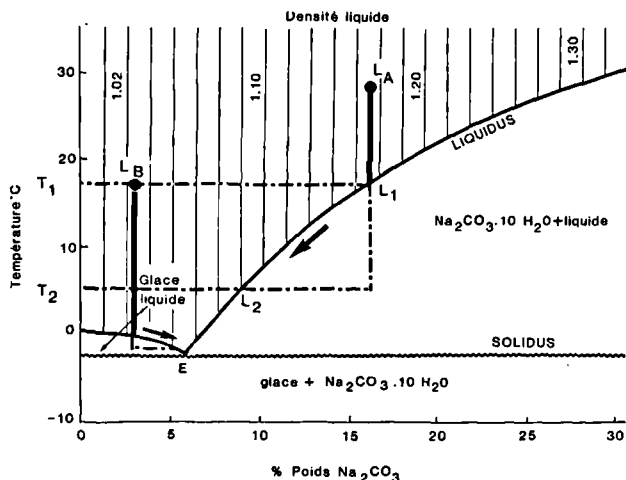


Fig. 4. — Le système  $\text{H}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{CO}_3$ , d'après McBirney et al. (1985). (Explications dans le texte).

Fig. 4. — The system  $\text{H}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{CO}_3$ .

Il s'agit d'une intrusion plutonique âgée de 60 M.A. qui a recoupé des gneiss du Précambrien et qui est recouverte par des formations volcaniques éocènes. Les études structurales, pétrologiques et géochimiques ont permis de mettre en évidence dans cette intrusion trois unités distinctes :

- Une série litée inférieure, composée d'une alternance rythmique de lits de compositions gabbroïques à dioritiques qui sont stratifiés. Ces formations ont été depuis longtemps interprétées comme le résultat de processus de cristallisations fractionnées qui ont affecté le magma au sein d'une chambre magmatique.
- Un groupe supérieur de bordure, distinct de la série litée car composé de roches plus acides (granophyres) dont on a pu démontrer qu'elles étaient pour partie "contaminées" avec l'encaissant.
- Un groupe de bordure marginal, qui est une bordure figée correspondant aux flancs de l'intrusion et qui est constitué d'un basalte tholéiitique.

b) *Le matériel expérimental*: Les expériences réalisées ont été conçues de telle façon que les conditions expérimentales aient quelques analogies avec l'intrusion du Skaergaard.

Le réservoir utilisé, de forme conique, a été construit de sorte qu'il se rapproche d'une section E-W de l'intrusion du Skaergaard. Il mesure 55 cm  $\times$  45 cm et 10 cm d'épaisseur. Il possède trois parois de refroidissement dans lesquelles on peut faire circuler un fluide réfrigérant. Les gneiss recoupés par l'intrusion et qui constituent l'encaissant, sont représentés par une couche de glace gelée au sommet et sur les côtés du réservoir. La solution injectée dans la cuve est une solution très diluée de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (solution de type B en fig. 4).

c) *Résultats expérimentaux*: Au début de l'expérience, la solution, qui est à la température ambiante, commence à faire fondre la glace des parois. La solution en contact avec les murs se mélange alors avec le produit de fusion de la glace et, à cause de sa densité plus faible, forme une couche agitée qui monte et s'accumule sous le toit (A, fig. 5). Ce processus se poursuit tant que le corps principal est assez chaud pour faire fondre la glace du mur; le résultat est la concentration dans la partie supérieure du réservoir d'une zone animée de courants de convection, où peuvent éventuellement s'effectuer quelques cristallisations en système clos.

Quand la solution atteint la température du liquidus, il cristallise de la glace à son tour. Les liquides résiduels deviennent, au fur et à mesure que la glace cristallise, de plus en plus denses. Au lieu de monter, ces liquides descendent rapidement le long des murs, s'accumulent et se déposent en différentes couches parallèles à des niveaux pour lesquels elles se situent en équilibre hydrodynamique (B, fig. 5). Il en résulte que la masse principale du réservoir se stratifie en différentes couches dont les compositions sont très distinctes les unes des

autres. Ce mécanisme s'effectue en "douceur", avec peu de phénomènes de turbulence, bien que ceci puisse s'effectuer à relativement grande vitesse.

La division du réservoir magmatique en deux ensembles distincts correspond à la structure de Skaergaard ; la série principale litée qui a cristallisé au plancher et le groupe supérieur de bordure qui a cristallisé au toit de l'intrusion et qui a été pour partie contaminé par l'encaissant.

## 2) Modélisation d'une chambre magmatique calco-alcaline.

a) *Le matériel expérimental* : Le réservoir est une cuve de  $40 \times 60 \times 10$  cm. La solution peut être refroidie ou réchauffée en faisant circuler du liquide dans des parois de cuivre au toit, au mur et au plancher de la cuve. Des tubes situés au toit permettent, au

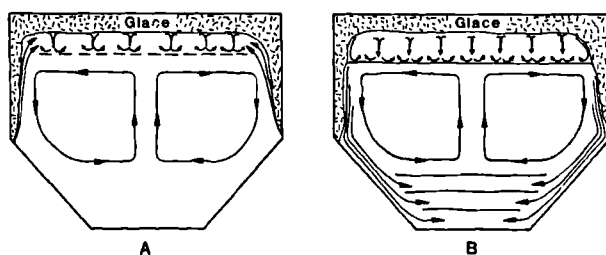


Fig. 5. — Schémas du comportement et de la cristallisation d'une solution diluée de  $H_2O-Na_2CO_3$  (solution de type B de la fig. 4), injectée dans une cuve tapissée de glace et refroidie sur ses parois latérales et à son toit. (Voir texte).

A. - Début de l'expérience : fusion de la glace des parois et ascension du liquide dilué (eau + solution) vers le haut du réservoir.

B. - Poursuite de l'expérience : début de cristallisation de la glace de la solution au liquidus ; constitution de trois parties : une zone supérieure, agitée, composée de solution diluée ; une zone inférieure, constituée de couches de liquides de fortes densités, qui sont descendues le long des flancs de la cuve et se sont stratifiées horizontalement les unes sur les autres par densités décroissantes ; une partie centrale convective. (Inspiré de McBirney *et al.*, 1985).

Fig. 5. — Sketches illustrating the behaviour and the crystallization of a diluted solution of  $H_2O-Na_2CO_3$  (solution B in fig. 4), injected in an ice covered tank refrigerated along the top and upper walls.

A. - Beginning of the experiment : ice melting and rising of diluted liquid.

B. - Continuation of the experiment : beginning of the ice crystallization at liquidus ; three zones are produced : a buoyant upper zone, of diluted solutions made of denser liquids which came down the walls and were ponded and stratified according to decreasing density ; a medium convective zone.

cours des expériences, de mesurer la température de la solution, à quelque niveau que ce soit, ainsi que la densité et la composition du liquide. La solution injectée est une solution concentrée en  $Na_2CO_3$  (13 %), c'est-à-dire une solution saturée à la température ambiante. Les températures expérimentales sont comprises entre 20 et 8° C. La densité du liquide varie alors de 1,110 à 1,102 au fur et à mesure des cristallisations de carbonate de sodium.

b) *Les résultats expérimentaux* : Au début de l'expérience, lorsque la température de la solution atteint la température du liquidus, les premiers cristaux de  $Na_2CO_3$  se forment et cristallisent sur les parois. Quelques-uns d'entre eux tombent dans le liquide, mais la plupart restent accrochés aux parois.

Entre les cristaux, apparaît un film fin de liquide de faible densité qui monte, créant un courant ascendant ; un peu plus loin du mur, les liquides sont au contraire plus denses et tendent à descendre dans le réservoir ; il se crée donc dans cette partie proche du mur une zone de turbulence entre un flux laminaire ascendant et un flux descendant. Au fur et à mesure que ces liquides montent, la zone principale correspondant à l'intérieur du réservoir est animée de cellules de convection (fig. 6).

En même temps que les liquides légers s'accumulent sous le toit de la chambre, une interface séparant la zone supérieure stable et la zone principale convective plus dense se constitue. L'interface entre ces deux zones se déplace vers le bas avec le temps et se stabilise au bout de deux à trois heures.

Les résultats expérimentaux montrent que la zone supérieure présente une zonation de densité et de température, alors que la zone principale convective possède une température et une densité quasi constante (fig. 7).

L'interprétation de cette expérience est relativement simple (fig. 6). Au fur et à mesure que les cristallisations se poursuivent, les liquides produits sont de plus en plus légers et se superposent par densité décroissante de bas en haut ; il en résulte que la partie supérieure devient stratifiée du point de vue chimique et thermique. Pendant ce temps, la zone principale animée de courants de convection à grande échelle reste, du point de vue thermique et chimique, homogène.

Si le refroidissement se poursuit, la solution dans la zone supérieure atteint la température eutectique ; cristallisent alors glace et carbonate de sodium et la composition de la zone supérieure tend à s'homogénéiser. En même temps, dans le corps principal, peut commencer à cristalliser au liquidus du  $Na_2CO_3$ . Il en résulte une séparation de liquides résiduels légers qui montent dans la cuve et augmentent vigoureusement la convection dans le réservoir. Au fur et à mesure que la convection s'accélère, le contraste de composition entre la zone supérieure et la zone principale s'estompe et l'interface finit par disparaître.



### 3) Conclusions.

Les expériences de McBirney permettent d'avoir un aperçu sur les mécanismes physiques susceptibles d'affecter les chambres magmatiques ; ils laissent entrevoir des différences de structures et de comportement entre les chambres magmatiques tholéitiques et les réservoirs calco-alcalins.

Dans les deux cas, la fusion partielle de roches felsiques de l'encaissant est susceptible d'engendrer des liquides hybrides, légers, qui peuvent s'accumuler au toit du réservoir.

Les fractionnements de liquides magmatiques proprement dits permettent d'envisager des chambres magmatiques zonées, soit dans leur partie supérieure, soit à leur base, avec possibilité d'avoir des discontinuités majeures de compositions à certains niveaux de la chambre.

Dans les deux types d'expériences, on remarque que le cœur de la chambre est animé de mouvements de convections, liés aux différences de température et de densité entre les liquides du centre du réservoir et ceux des bords. Ces mouvements convectifs ont fait l'objet d'études expérimentales que nous allons brièvement exposer.

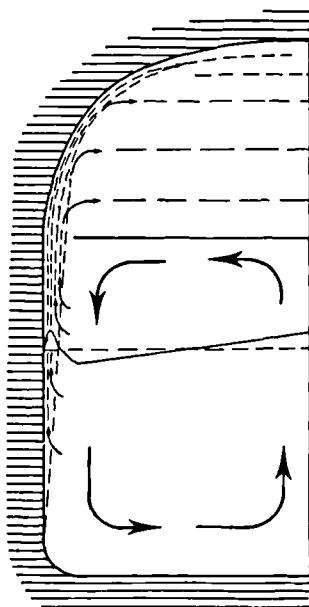


Fig. 6. — Schéma du comportement et de la cristallisation d'une solution concentrée de  $H_2O-Na_2CO_3$  (solution de type A de la fig. 4). (D'après Nilson *et al.*, 1985).

Fig. 6. — Schematic sketch illustrating the behaviour and the crystallization of a  $H_2O-Na_2CO_3$  saturated solution (solution A in fig. 4).

### B) EXPERIENCES SUR LA CONVECTION

L'existence de mouvements convectifs dans une chambre magmatique n'est plus à démontrer. Bartlett (1969) a montré que la convection a lieu dans une intrusion, si son épaisseur est supérieure à 15 m. L'intensité de la convection est définie par le nombre de Rayleigh :

$$R = \frac{g \rho \alpha \Delta T h^3}{K \mu}$$

où  $h$  représente la hauteur de la chambre,  $\Delta T$  la différence de température entre magma et encaissant,  $\mu$  la viscosité dynamique,  $\alpha$  le coefficient d'expansion thermique et  $K$  la diffusivité thermique.

Le nombre de Rayleigh critique qui définit le seuil d'existence de la convection est de 1700. Les calculs effectués (Brandeis *et al.*, 1984) démontrent que pour les chambres magmatiques basaltiques, le nombre de Rayleigh calculé est infiniment supérieur au nombre de Rayleigh critique, ce qui signifie que la convection dans une chambre magmatique doit être très vigoureuse.

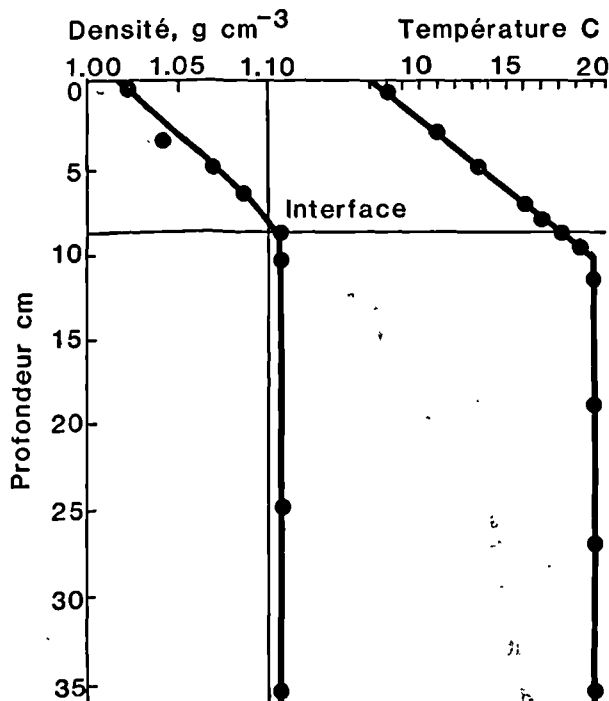


Fig. 7. — Profils des densités et températures dans la solution après environ 3 heures d'expérience. (D'après McBirney, 1980).

Fig. 7. — Temperature and density profiles in the solution after about three hours experimentation.

L'étude de la dynamique des magmas au sein de chambres magmatiques peut donc être abordée sous un aspect de mécanique des fluides. Nous exposerons ci-dessous une série d'expériences effectuées à l'Institut de Physique du Globe à Paris (Brandeis *et al.*, 1984).

### 1) Procédure expérimentale.

Brandeis *et al.* ont étudié en laboratoire l'évolution et la structure d'une couche d'huile qui est refroidie brutalement à la fois par le haut et le bas.

Le matériel expérimental est composé d'une cuve de plexiglas de  $25 \times 25 \times 10$  cm. Deux plaques de cuivre permettent de fixer les températures supérieures et inférieures. A l'intérieur de la cuve, des fils de platine tendus horizontalement à différentes hauteurs permettent de mesurer la température. Les fluides utilisés sont des huiles au silicone de viscosités élevées. L'observation de la convection et la détermination de la structure thermique de la chambre sont effectuées à l'aide de procédés visuels (ombroscopie, interférométrie différentielle) ainsi que par des mesures de température.

Dans un premier temps, le fluide est d'abord chauffé à l'aide d'un thermostat en branchant les deux plaques de cuivre en série. Après 5 heures de chauffe (temps nécessaire pour obtenir une bonne homogénéité de température à l'intérieur de la cuve), de l'eau froide est brusquement injectée dans les deux plaques de cuivre. Les plaques sont ensuite maintenues à température constante pendant tout le reste de l'expérience (environ 3 heures).

### 2) Résultats expérimentaux.

De nombreuses expériences ont été réalisées. Dans tous les cas, trois étapes ont pu être distinguées :

- 1) Dans un premier temps, la convection débute dans le haut de la cuve sous forme de panache.
- 2) Puis ces panaches atteignent rapidement le bas du réservoir.
- 3) Enfin, progressivement, alors que le fluide se refroidit et que l'intensité de la convection diminue, les panaches deviennent plus lents et s'arrêtent nettement au-dessus de la surface inférieure ; une couche stagnante d'épaisseur non négligeable, isolée de la convection, se forme au bas de la cuve. Au bout de quelques minutes, son épaisseur se stabilise rapidement et n'augmente plus de manière significative. A ce moment-là, la structure spatiale de la convection délimite trois zones dans le réservoir :

- en haut de la cuve, une couche limite supérieure instable, à fort gradient de température où sont générés les panaches ;
- une zone centrale convective qui est une couche bien mélangée, à une température à peu près uniforme ;

- en bas de la cuve, une couche limite inférieure qui se divise en deux parties : une zone de pénétration où les panaches sont ralentis et une couche stagnante isolée de la zone convective et qui présente un important gradient de température.

Ces expériences suggèrent donc que le système convectif adopte rapidement une configuration spatiale stable qui n'évolue ensuite que très lentement et est caractérisée par la présence d'une couche basale stagnante non réalimentée par le fluide convectif. On peut penser qu'une telle couche existe dans les chambres magmatiques, au sein de laquelle peut s'effectuer une partie de la cristallisation magmatique.

## C) EXPERIENCES SUR LA REALIMENTATION DES CHAMBRES MAGMATIQUES

Les expériences précédentes analysent le comportement physico-chimique des liquides présents dans un réservoir. Elles ne représentent qu'une étape dans la vie d'une chambre magmatique qui n'est pas un objet inerte, mais au contraire quelque chose de vivant qui est périodiquement réalimenté par des magmas juvéniles venus des profondeurs. Il a semblé intéressant à divers auteurs (Huppert et Turner, 1981) de modéliser un tel cas.

### 1) Procédure expérimentale.

Huppert et Turner (1981) ont voulu tester un modèle correspondant à une arrivée de magma basaltique juvénile, chaud et dense dans une chambre où réside un magma plus évolué, moins chaud et moins dense.

Ils ont utilisé une cuve de  $40 \times 20 \times 30$  cm, dans laquelle ils ont mis en premier lieu une solution de  $\text{NaNO}_3$  ou de  $\text{K}_2\text{CO}_3$  (température de l'ordre de  $15^\circ\text{C}$  ; densité : environ  $1,27\text{ g/cm}^3$  ; hauteur du liquide : 22 cm). Puis, par la base de la cuve, ils ont introduit une solution saturée de  $\text{KNO}_3$  (température : environ  $65^\circ\text{C}$  ; densité : environ  $1,33\text{ g/cm}^3$  ; hauteur de la couche : environ 6 cm), dont la densité diminue au cours de la chute de température et de la cristallisation de  $\text{KNO}_3$ . Ils obtiennent ainsi un réservoir composé de deux liquides distincts, un chaud et dense à la base, un plus froid et moins dense au-dessus du précédent. Tout en observant visuellement le comportement des solutions, il est possible à tout moment de mesurer à l'aide de sonde la température et la densité des deux solutions.

### 2) Résultats expérimentaux.

Lorsque la solution de  $\text{KNO}_3$  est introduite à la base de la cuve, elle se dépose dans le fond du réservoir et reste séparée de la couche supérieure par une

interface très nette. Sa température diminue alors que la température de la couche supérieure augmente ; il y a donc transfert de chaleur entre les deux couches qui se traduit par une convection active dans les deux couches. La densité de la couche inférieure tend dans un premier temps à augmenter du fait de la contraction thermique qu'elle subit. Bientôt, la solution inférieure de  $\text{KNO}_3$  arrive à son liquidus et les premiers cristaux de nitrate de potassium cristallisent dans la solution inférieure ; au bout d'un certain temps, lorsque les cristallisations de  $\text{KNO}_3$  sont plus importantes, la densité du liquide inférieur chute brutalement, devenant voisine de celle du liquide supérieur. L'interface entre les deux liquides devient irrégulière, puis des panaches du liquide inférieur pénètrent dans la solution supérieure et lorsque les densités des deux solutions sont voisines, l'interface disparaît et les deux liquides se mélangent d'une façon homogène, laissant à la base du réservoir les cristaux de  $\text{KNO}_3$ .

En conclusion de ces expériences, il apparaît que des magmas distincts des points de vue physique et chimique évoluent dans un premier temps chacun pour leur compte dans le réservoir. Ce n'est que lorsque leurs caractères physico-chimiques sont proches qu'ils peuvent devenir miscibles.

Il y a une grande étape à franchir pour aller du réservoir expérimental rempli d'une solution aqueuse ou d'huile, à la chambre magmatique naturelle remplie de fluides possédant des propriétés physiques très différentes. Les systèmes volcaniques sont particuliers par le fait qu'ils sont en constante évolution, qu'ils font intervenir des changements de phases et qu'ils mettent en jeu des fluides dont les propriétés physiques dépendent fortement de la température et du pourcentage de cristaux lorsque la température est inférieure au liquidus. Dans ces conditions, peut-on passer de l'expérience à la réalité ?

#### IV. — DE L'EXPERIENCE A LA REALITE. SCHEMAS ET FONCTIONNEMENT DES CHAMBRES MAGMATIQUES

Les expériences, même si elles sont éloignées des réalités, ont cependant l'avantage de visualiser les processus et de donner matière à réflexion pour les transposer à des chambres naturelles. Ainsi, un certain nombre d'observations faites dans les expériences doivent avoir des conséquences sur la nature et la diversité des produits engendrés, ainsi que sur les mécanismes éruptifs ; l'on doit alors en trouver quelques traces et témoins dans les téphras émis au cours des éruptions, ainsi que dans les dynamismes volcaniques.

Nous traiterons successivement des processus magmatiques associés au volcanisme tholéitique, puis ceux concernant le magmatisme calco-alcalin.

#### A) VOLCANISME THOLEITIQUE

Le volcanisme basaltique tholéitique est particulièrement bien représenté au niveau océanique, où il se répartit en deux contextes géodynamiques différents ; le plus important en volume et en surface est celui qui participe à l'expansion des fonds océaniques dans les zones d'accrétion que sont les rifts océaniques et dont l'Islande et l'Afar (République de Djibouti) sont de rares témoins émergés. Le second contexte est celui d'un volcanisme de hot-spot intra-plaque océanique (ex. : Hawaï, Galapagos, Réunion, Polynésie française).

Nous traiterons ici principalement du volcanisme des rides océaniques qui a fait l'objet de nombreuses études ces dernières années.

##### 1) Modèles de chambres magmatiques.

Les différentes connaissances que nous avons actuellement sur la croûte océanique résultent de données acquises, soit sur le fond des océans (données géophysiques, tectoniques, pétrographiques, géochimiques), soit par l'étude des complexes ophiolitiques.

Cann (1968) a été le premier à postuler l'existence de chambres magmatiques sous les dorsales océaniques. Il a, à cette époque, suggéré une chambre en forme "d'oignon", avec à son sommet un chapeau pointu dû à l'étranglement de la zone d'accrétion magmatique duquel s'échappe un complexe de filons verticaux ; il a proposé pour cette chambre un large plancher susceptible d'expliquer l'importance des cumulats ultramafiques lités observés dans les complexes ophiolitiques. A partir de ce modèle de base, au fur et à mesure que les données analytiques et géophysiques se précisaient, d'autres modèles, plus élaborés, furent proposés (Juteau, 1984). Le schéma proposé actuellement est celui d'une chambre en forme d'arche, large de 5 à 10 km et haute de 2 à 5 km (fig. 8). Ce modèle dynamique de chambre mène à la constitution d'une croûte océanique dont la coupe est celle d'un complexe ophiolitique avec, de bas en haut, les tectonites, les cumulats, les gabbros, le complexe filonien et les basaltes sous-marins.

Ce schéma, s'il est plausible, reste encore en partie hypothétique. Pendant longtemps, aucune donnée géophysique n'a permis de mettre en évidence de telles chambres à l'aplomb des dorsales océaniques. Actuellement, on pense qu'il existe deux possibilités selon que l'on considère des dorsales à taux d'expansion faible, comme la dorsale atlantique, et des dorsales rapides, comme la dorsale pacifique. Les données géophysiques récentes indiquent en effet que de telles chambres permanentes et importantes existent sous les dorsales rapides. C'est ainsi par exemple que sur la dorsale est-pacifique, des données sismiques ont permis de reconnaître des réflecteurs en forme d'accent circonflexe pouvant correspondre à un toit de chambre (Whitechurch, communication orale, 1986). Par contre, aucune évidence de telles chambres n'a pu être obtenue sur les dorsales lentes, en particulier sur la dorsale

médio-atlantique. Les travaux de Nisbet et Fowler (1978) sur la zone FAMOUS, les modèles thermiques de Sleep (1975) excluent la possibilité de la présence d'une grande chambre magmatique. Seules, des poches de magma d'une largeur inférieure à 2 km sont compatibles avec les données sismiques et les contraintes thermiques. Seules donc, de petites chambres peuvent exister. A la suite des propositions de Weertmann (1971), Nisbet et Fowler développent un modèle du type "poireau" dans lequel un chevelu de fractures remplace la grande chambre permanente.

## 2) Les magmas de la chambre.

Les données pétrologiques, minéralogiques et géochimiques acquises sur les laves draguées au fond des océans ou sur les roches de complexes ophiolitiques permettent de posséder une bonne connaissance des basaltes océaniques (Hékinian, 1982 ; Bougault, 1980 ; Juteau, 1975). Ceux-ci, dénommés M.O.R.B. (Middle Oceanic Ridge Basalt), sont des basaltes tholéïtiques de composition quasi uniforme à l'échelle mondiale et dont la minéralogie varie peu d'un site à l'autre. On y rencontre toujours des plagioclases dont la composition est comprise entre An 80-65, des olivines (Fo 85-80) et en moins grande abondance des clinopyroxènes de type diopside-augite. Les spinelles chromifères en inclusions dans les olivines, ainsi que des oxydes ferro-titanés complètent l'inventaire minéralogique.

En fait, ces M.O.R.B. ne représentent probablement pas le magma le plus primaire injecté dans les chambres magmatiques sous les dorsales océaniques. En effet, il n'est pas rare de rencontrer dans certaines

laves deux familles distinctes de minéraux de composition chimique différente (Lefèvre, 1986 ; Humler et Whitechurch, 1986). Par exemple, dans les basaltes dragués au niveau de la dorsale du Bassin Nord-Fidjien (fig. 9), on peut rencontrer dans la même lave des phénocristaux d'olivine (Fo 82-80) et des plagioclases (An 73-69), mais aussi des minéraux plus primitifs (olivine : Fo 89-88 ; plagioclases : An 90-84).

A partir d'équations thermodynamiques et en fonction des coefficients de partage des éléments chimiques établis à partir des équilibres solides-solides, solides-liquides, il est possible de calculer les compositions des liquides parentaux ayant donné naissance aux associations minéralogiques rencontrées dans les laves ou aux différents cumulats ophiolitiques (Whitechurch *et al.*, 1986 ; Ernewein *et al.*, 1986). Ainsi, l'on peut montrer que les minéraux les plus primitifs ont cristallisé au sein d'un liquide basaltique riche en MgO, c'est-à-dire un *liquide picritique*. Les fractionnements de minéraux fémiques dans ce magma sont à l'origine des cumulats ultra-mafiques (dunites, pyroxénites) rencontrés à la base des complexes ophiolitiques. Le liquide résiduel, moins magnésien et moins dense, constitue le magma parent des basaltes et des gabbros.

Ces données aboutissent à un modèle de chambre magmatique à *deux couches de liquides*. La couche inférieure serait composée d'un liquide picritique, chaud, injecté à la base du réservoir et qui, du fait de sa forte densité, reste confiné au fond de la chambre où il forme une couche stagnante. Le niveau supérieur correspondrait à des liquides fractionnés basaltiques proches des M.O.R.B. qui, eux-mêmes, pourront subir des mécanismes de différenciation et engendrer une zonation chimique au sein du réservoir.

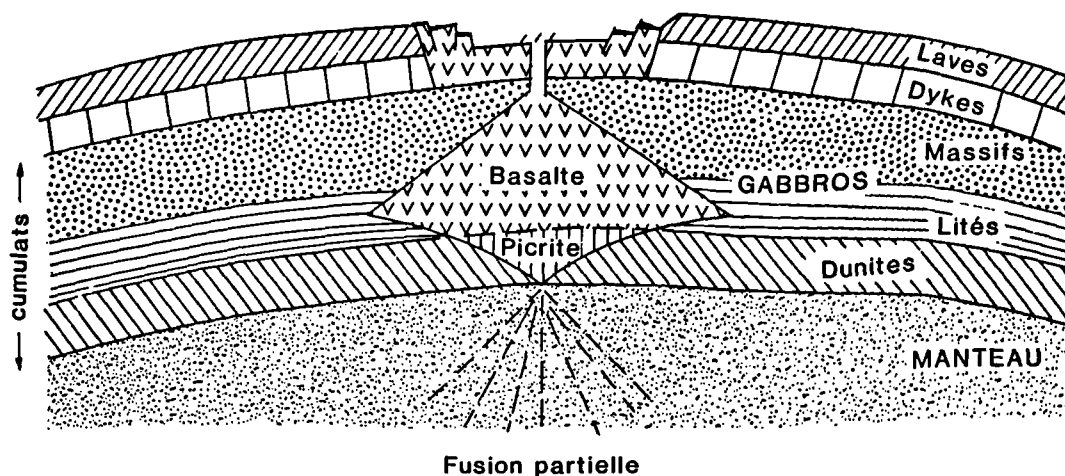


Fig. 8. — Coupe schématique d'une ride océanique et de sa chambre magmatique.  
Fig. 8. — Schematic cross-section of mid-ocean ridge and its magma chamber.

### 3) Le fonctionnement de la chambre magmatique.

Le comportement des volcans tholéitiques dépend en grande mesure du degré d'évolution des liquides. Un certain nombre d'auteurs (Walker, 1975 ; Sparks *et al.*, 1980 ; Stolper et Walker, 1980) ont remarqué que les magmas denses ont peu de chance d'atteindre la surface s'ils doivent traverser des liquides plus légers ; ceci explique la rareté des laves picritiques dans les complexes ophiolitiques ou dans les fonds océaniques. Pour la même raison, les membres intermédiaires des séries tholéitiques (ferro-basaltes), de densité élevée (fig. 2) sont relativement rares comparés aux roches moins denses (basaltes-rhyolites). Quand ces volcans ont une activité épisodique (Islande, Afar, Galapagos), les mécanismes de différenciation des liquides au sein de la chambre peuvent être poussés au-delà de la bosse d'inversion de densité des laves intermédiaires ; des magmas felsiques pourront alors être engendrés, monter au toit de la chambre et être éjectés lors des éruptions. Au contraire, lorsque l'activité est quasi permanente (rides océaniques, Hawaï), les liquides atteignent rarement le niveau d'inversion de densité, ce qui explique dans ce cas la rareté des laves intermédiaires et des roches différenciées.

Les effets et les conséquences de la réalimentation des chambres magmatiques par des magmas primaires "chauds", les interactions qui s'établissent entre le magma résident et le magma injecté dépendent de paramètres physico-chimiques tels que la composition des liquides en présence, leur viscosité, leur densité, leur capacité calorifique, leur coefficient de diffusion, leur coefficient d'expansion thermique, la vitesse de l'injection, etc... Les processus magmatologiques et les dynamismes éruptifs qui en résultent sont intimement liés au mode d'alimentation du réservoir.

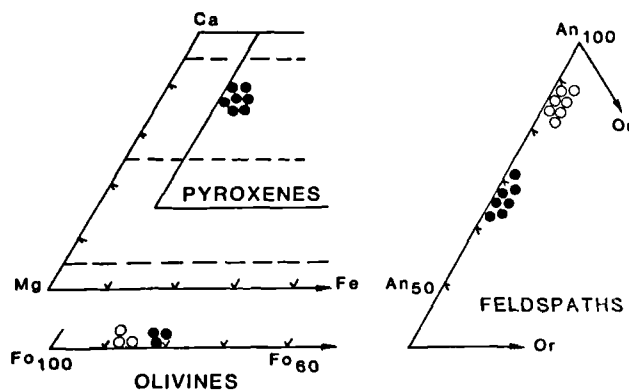


Fig. 9. — Minéralogie des phénocristaux d'un basalte océanique dragué sur la dorsale du Bassin Nord Fidjien (Lefèvre, 1986).

(○ : minéraux les plus primitifs ; ● : minéraux plus évolués).

Fig. 9. — *Mineralogy of basalt dredged on the oceanic ridge of North Fidjian Marginal Basin.*

*Premier cas :* Soit un volcan à activité épisodique où, au toit du réservoir, sont présents des liquides différenciés acides et qui est alimenté brutalement par un nouveau magma basaltique "chaud". Les deux liquides étant immiscibles ne peuvent se mélanger. Au contact du magma acide "froid", le liquide basaltique se débite en pillow-lavas de petite taille. Cette intrusion va provoquer une augmentation locale de la température et une convection vigoureuse dans le magma acide. Celui-ci, plus léger, se place au sommet de la chambre. L'augmentation de température de ce magma, la diminution de pression liée à son ascension réduisent la solubilité des gaz dans ce magma qui subit une vésiculation importante et qui devient sursaturé en volatils. L'injection de magma basique et la vésiculation du magma acide amènent une surpression de la chambre qui est suffisante pour fracturer l'édifice volcanique et son entourage et ainsi provoquer une éruption volcanique acide (Sparks *et al.*, 1977). Dans ce modèle, il se peut qu'une grande partie du magma basique plus dense ne soit jamais expulsée. Seuls des petits fragments de pillows basaltiques ont pu se trouver mélangés avec le magma acide et être éjectés en même temps ; ceci explique la fréquence avec laquelle on trouve de ces fragments basaltiques associés aux éruptions ponçues acides.

*Deuxième cas :* Tout autre est le mécanisme qui résulte de l'injection d'un nouveau magma basaltique dans une chambre d'un volcan à activité quasi permanente. Dans ce cas, les liquides présents dans le réservoir ne sont pas ou sont peu évolués et leur composition est proche du magma basaltique. Deux cas sont à considérer selon que le magma injecté est plus dense ou moins dense que le magma résident (fig. 10) :

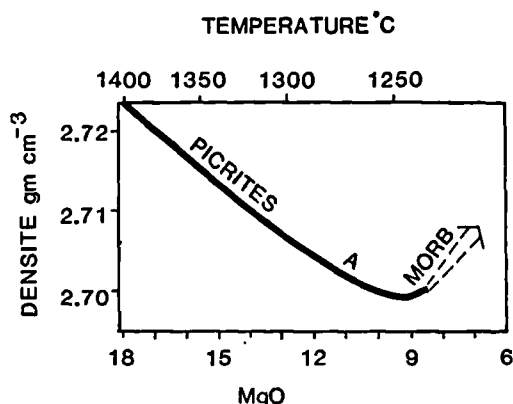


Fig. 10. — Variations de la densité des magmas picritiques et des basaltes océaniques selon leurs teneurs en MgO et les températures du liquidus. (D'après Huppert et Sparks, 1980).

Fig. 10. — *Variation of melt density with MgO content and liquidus temperature in picritic magmas and M.O.R.B.*

— *magma injecté moins dense* : le régime dynamique d'un fluide léger introduit à la base d'un réservoir rempli de liquide dense dépend de la vitesse d'injection et des propriétés physiques des deux fluides. Le régime laminaire ou turbulent du flux peut être estimé à partir du nombre de Reynolds :  $Re = D d v / \mu$  ( $D$  : diamètre du conduit d'alimentation ;  $d$  : densité ;  $\mu$  : viscosité du fluide dans le réservoir). Si  $Re$  est inférieur à 300, le régime du flux est laminaire ; il est franchement turbulent s'il est supérieur à 500 (Sparks *et al.*, 1980). Les données acquises sur les réservoirs basaltiques suggèrent que les flux ont toutes les chances d'être semi-turbulents ou pleinement turbulents. Dans ces conditions, le magma injecté moins dense monte de façon turbulente à travers le magma résident ; il peut y avoir alors mélange entre les deux liquides et les magmas hybrides accumulés au toit de la chambre sont éjectés en premier.

— *magma injecté plus dense* : Huppert et Sparks (1980), Huppert et Turner (1981) ont modélisé un exemple susceptible d'être appliqué aux chambres magmatiques des rifts océaniques, où un magma picritique chaud et dense s'introduit dans un réservoir rempli d'un liquide de type M.O.R.B. qui, lui, est moins chaud et moins dense. L'injection du magma picritique engendre une augmentation de pression des fluides dans le réservoir et l'effusion des laves basaltiques.

Il se forme dans la chambre deux couches de liquides distinctes, la couche inférieure picritique et la couche supérieure basaltique. L'augmentation de température de la couche supérieure dépend du temps et de l'épaisseur de la couche basale. Ces deux couches sont, dans un premier temps, animées de convection de par leur différence de température et densité et échangent de la chaleur à leur interface. Ces deux liquides sont immiscibles ; il n'y a donc pas de mélanges chimiques possibles. Les deux couches refroidissent à l'équilibre, mais gardent chacune leur composition initiale. Le refroidissement de la couche inférieure est fonction du temps mais dépend également de l'épaisseur relative des deux couches et des propriétés physiques des liquides (fig. 11). Lorsque le liquide inférieur atteint son liquidus, les premiers minéraux (olivine, plagioclases) commencent à cristalliser. Certains d'entre eux peuvent éventuellement être transférés mécaniquement par la convection dans le liquide supérieur, ce qui permet leur présence parfois en xénocristaux dans les basaltes ; les plus denses chuteront vers le bas de la chambre. Au début, la vitesse de convection dans la couche inférieure est supérieure à la vitesse de dépôt des olivines qui sont donc distribuées de manière uniforme dans le magma inférieur. Au bout d'un certain temps, c'est l'inverse, la vitesse de sédimentation des olivines est supérieure à la vitesse de convection (fig. 11) ; les péridots peuvent alors se déposer au fond de la chambre et constituer les cumulats de dunites. La densité du liquide résiduel de la couche inférieure diminue avec le fractionnement des olivines ; sa densité

peut être alors, soit supérieure à celle du liquide de la couche supérieure, soit être sensiblement égale. Si sa densité est supérieure, le liquide picritique reste confiné dans le bas de la chambre ; cristallisent alors avec l'olivine les pyroxènes, puis les pyroxènes seuls susceptibles d'engendrer les cumulats de wehrlites et pyroxénolites. Un tel processus peut rendre compte de l'abondance des séries litées ultra-mafiques de certains complexes ultra-basiques (Stillwater, Bushveld...) et des complexes ophiolitiques ; chaque injection de magma picritique est susceptible de répéter le même mécanisme et d'expliquer le caractère répétitif et cyclique de ces séries rubannées. Si la densité du liquide résiduel inférieur devient proche de celle du liquide supérieur, les deux liquides peuvent devenir miscibles et donner naissance à un nouveau magma basaltique. La composition de ce magma dépendra des volumes respectifs des deux liquides avant le mélange ; plus généralement, la nature du magma de la chambre sera fonction de la compétition qui s'instaure entre le rythme des injections magmatiques et les mécanismes de cristallisation.

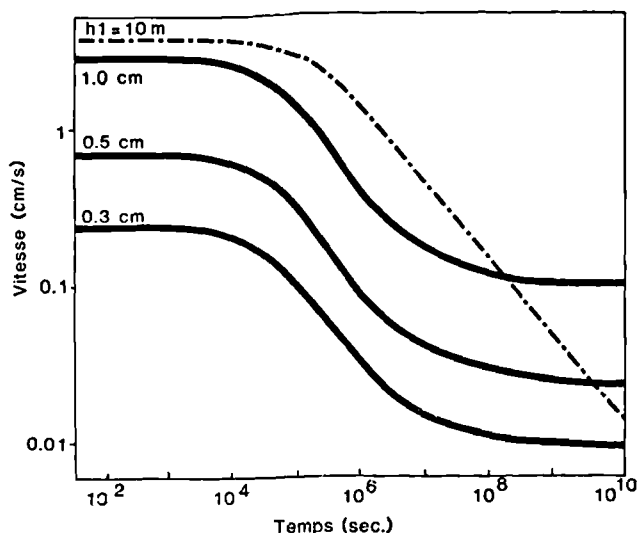


Fig. 11. — Vitesse verticale de la turbulence d'une couche basaltique de 10 m de haut, surmontée par une autre couche basique de 4 km d'épaisseur (courbe en tirets) et vitesse de dépôt des olivines (courbes en traits pleins), selon leur taille (1 cm à 0,1 cm) et le temps (données de Huppert et Sparks, 1980). La vitesse de sédimentation des olivines varie avec le temps, en fonction de l'augmentation de la viscosité du liquide et de sa concentration en cristaux.

Fig. 11. — Mean turbulence vertical velocity (solid line) in a lower basaltic layer (thickness, 10 m), overlain by another basic layer (4 km, thick), and settling velocities of olivine crystals (dashed line) in function of their diameter (in cm) and time. The settling velocities vary with time due to increasing melt viscosity and crystal concentration.

## B) VOLCANISME CALCO-ALCALIN

A la suite de ses expériences, McBirney (1980) a suggéré un modèle de chambre magmatique (fig. 12) susceptible d'expliquer quelques aspects de la magmatologie et de la pétrologie volcanique. Des variantes à ce modèle ont ensuite été proposées (Martin *et al.*, 1981 ; Traineau *et al.*, 1982).

### 1) Présentation des modèles.

Dans le modèle présenté par McBirney, le refroidissement aux épontes du réservoir et les cristallisations qui en découlent engendrent au sein de la chambre magmatique deux ensembles distincts des points de vue dynamique et chimique : la partie supérieure stable, de relativement basse température, serait chimiquement zonée ; les liquides les plus acides (rhyolitiques) étant les plus légers se situeraient tout à fait à l'apex et surmonteraient des liquides plus denses de composition dacitique à andésitique. Le corps principal du réservoir, séparé de la partie supérieure par une interface serait pour sa part constitué de liquides basiques (andésitiques basiques à basaltiques) plus denses et plus chauds et serait animé de mouvements de convection importants, permettant une homogénéisation de l'ensemble.

Dans son modèle, McBirney ne trace pas de limite inférieure au réservoir magmatique hypothétique. Si on se réfère aux expériences de Brandeis *et al.* (1984), on peut penser que la base de la chambre serait constituée d'une couche stagnante de liquide basaltique, isolée du système convectif et susceptible de cristalliser si la température le permet.

Une variante à ce modèle de chambre magmatique unique a été proposée par différents auteurs (Martin *et al.*, 1981 ; Traineau *et al.*, 1982). Ce modèle suppose

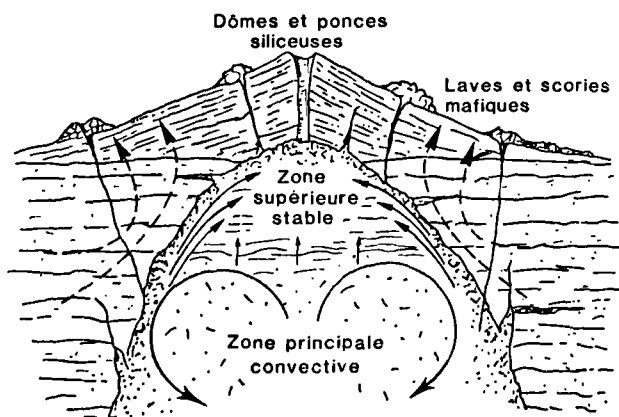


Fig. 12. — Modèle de chambre magmatique associée au volcanisme calco-alkalin (d'après McBirney, 1980).

Fig. 12. — Schematic model of magmatic chamber related to a calc-alkaline volcanism.

l'existence de deux chambres magmatiques communicantes, situées à des profondeurs peu différentes : une chambre supérieure, de faible dimension où seraient stockés les magmas acides (rhyolites, dacites, andésites) et une chambre inférieure de grand volume, composée de magmas plus basiques (andésites basaltiques, basaltes).

Quel que soit le modèle retenu, deux remarques peuvent être formulées :

1° il existerait dans les chambres magmatiques deux niveaux stables où pourraient s'effectuer des cristallisations importantes : la zone statique supérieure où les liquides acides peuvent cristalliser en système fermé et la partie inférieure du réservoir où des liquides basiques peuvent également cristalliser pour leur propre compte au niveau de la couche stagnante basale ;

2° l'existence, dans les réservoirs, de discontinuités chimiques séparées par des interfaces et des zones de turbulence.

Quelles sont les conséquences magmatologiques et volcanologiques de tels modèles et quelles sont les preuves qui en témoignent ?

### 2) Les témoins magmatologiques.

Un certain nombre de caractères pétrologiques des laves calco-alkalines peuvent trouver une interprétation dans les modèles de chambres magmatiques proposés.

a) *Bimodalité ou non des laves émises* : Si les éruptions volcaniques associées aux grands volcans matures andésitiques sont généralement de type central et sommital, il est naturel que dans ces conditions, les produits felsiques acides (rhyolites, dacites, andésites) soient les plus abondants dans les séries calco-alkalines (Chayes, 1969), puisque ce sont eux qui seront en premier drainés du réservoir à partir de la zone supérieure. Le plus souvent, seuls ces produits seront émis ; c'est ainsi que tous les volcans des Andes centrales (Lefèvre, 1973, 1979), ainsi qu'un grand nombre de volcans des Cascade Range (McBirney, 1968) ne sont composés que de laves intermédiaires et acides.

Si l'éruption est plus importante, les deux zones du réservoir peuvent être en même temps drainées et les deux types de magmas être expulsés. Dans ce cas, quelques laves basiques seront associées à des laves acides ; nous pouvons citer comme exemple quelques volcans des Cascade Range (Crater Lake, Mazama ; Ritchey, 1980), ou des éruptions récentes de la Montagne Pelée (voir *infra*).

Il est naturel que dans le cas d'éruptions latérales, les laves drainées à partir des liquides de la zone principale soient plus basiques. C'est ainsi que l'on peut interpréter la nature basaltique des cônes adventifs d'un certain nombre de volcans andésitiques des Cascade Range (McBirney, 1980).

b) *Gradients de composition chimique des laves* : Les variations de composition de la zone supérieure stable, rappellent les gradients de composition observés dans certains types de magmas calco-alkalins. Ces évolutions peuvent concerner les produits d'une seule et même éruption et être limitées dans le temps ou, au contraire, se poursuivre durant de longues périodes. On connaît couramment par exemple de grands volumes de pyroclastes montrant une composition zonée (Smith, 1979 ; Hildreth, 1981), plus rarement des coulées ou des sills zonés (Wilcox, 1954 ; Hamilton, 1965).

Illustrons ceci par quelques exemples.

Le premier est celui de deux éruptions (dénommées SV1 et SV2) de la Montagne Pelée (Traineau, 1982). Il s'agit de deux explosions de nuées ardentes de type Saint-Vincent (Bardintzeff, 1985 ; Wright *et al.*, 1980). Des datations au carbone 14 ont permis d'en préciser l'âge : environ 25.700 ans  $\pm$  1.200 B.P. pour SV1 et 22.300  $\pm$  1.200 B.P. pour SV2. Elles suivent toutes les deux le même scénario éruptif : elles débutent par une phase d'émissions ponces homogènes (ponces claires ; SiO<sub>2</sub> = 58 %), suivies d'une émission de ponces bicolores qui sont en fait des mélanges de produits ponces clairs (identiques au précédent) et d'un composant andésitique sombre (SiO<sub>2</sub> = 55,5 %) ; enfin, se met en place l'ensemble de la nuée ardente sombre de type Saint-Vincent et de nature andésitique basaltique (SiO<sub>2</sub> = 52,5 %). On constate donc qu'il existe une zonation chimique des produits qui évoluent dans le temps depuis un pôle acide vers un pôle plus basique. Les ponces mixtes peuvent être interprétées comme des mélanges des deux liquides provenant de deux zones distinctes du réservoir, les ponces claires acides venant de la partie supérieure et les ponces sombres plus basiques de la partie inférieure.

Ces zonations chimiques peuvent se retrouver à des échelles de temps plus long. Ainsi, dans le cas de la série de Long Valley Caldera (Bailey *et al.*, 1976), il est remarquable de constater que les premières laves émises sont des rhyolites qui, au cours du temps, sont de moins en moins acides (75 à 70 % SiO<sub>2</sub>). Puis, brutalement, les dernières émissions ont des compositions différentes, moins siliceuses (SiO<sub>2</sub> = 64 %). Là aussi, les gradients de composition observés peuvent s'interpréter aisément par l'expulsion progressive des liquides de la partie sommitale de la chambre magmatique, éjectant des liquides de moins en moins acides.

Dans le cas du Paricutin, la zonation observée est inverse. En effet, si l'on considère l'évolution chimique des laves durant 9 ans d'activité, on constate que les premières éruptions laissent apparaître des laves basiques, de composition homogène (SiO<sub>2</sub> = 56 - 55 %), puis brutalement s'épanchent des laves plus acides (SiO<sub>2</sub> = 57 %) qui deviennent progressivement de plus en plus siliceuses (SiO<sub>2</sub> = 61 %) au cours du temps. Dans ce cas, on pense (Wilcox, 1954) que le réservoir magmatique a subi une vidange par sa base. Au début, c'est le corps principal du réservoir, rempli d'un magma

de composition homogène (andésite basique) qui s'est vidé, puis la vidange a atteint progressivement les liquides plus acides de la zone supérieure.

c) *Déséquilibres minéralogiques ; hétérogénéités minéralogiques* : Le modèle de chambre magmatique permet également d'expliquer certaines particularités minéralogiques rencontrées fréquemment dans les andésites calco-alkalines. Nous prendrons comme exemple l'étude minéralogique des laves du Massif volcanique Madeleine-Soufrière en Guadeloupe (Lefèvre et Cousse, 1985). Les laves émises sont, soit des andésites basaltiques (SiO<sub>2</sub> = 52 - 56 %), soit des andésites (SiO<sub>2</sub> = 56 - 62 %). Trois types d'associations minéralogiques présentant des caractères différents ont pu être mis en évidence (fig. 13) :

— *Premier type* : Laves qui montrent des associations minéralogiques où les minéraux ne sont pas ou sont peu zonés et présentent alors des zonations " normales " ; par exemple, la teneur en anorthite des plagioclases décroît du cœur à la périphérie des phénocristaux, les microcristaux ayant des compositions voisines de la composition du bord des phénocristaux (ex. lave n° 15, fig. 13). On peut raisonnablement penser que dans ce cas les minéraux ont cristallisé à " l'équilibre " avec un liquide de composition donnée, la température du magma diminuant progressivement.

— *Deuxième type* : Laves caractérisées par des minéraux présentant des marques de déséquilibre qui se traduisent par des traces réactionnelles ou des zonations inverses. Tel est le cas par exemple des plagioclases qui montrent souvent des zones " nuageuses " réactionnelles, riches en inclusions de liquides piégés au cours de la croissance du minéral. On constate au niveau du liseré réactionnel une augmentation brutale de la teneur en anorthite du plagioclase par rapport au cœur plus sodique, ce qui correspond à une zonation inverse par rapport à la normale. De même, on peut rencontrer des laves où les microlites plagioclasiques sont plus calciques que les phénocristaux et où les microcristaux de minéraux fémiques sont plus magnésiens que les phénocristaux (lave n° 4, fig. 13) c'est-à-dire l'inverse de ce que l'on est en droit d'attendre d'une cristallisation à l'équilibre. Ces marques de déséquilibre peuvent se concevoir si on considère que dans le corps du réservoir la convection est telle que les minéraux, au cours de leur croissance, passent successivement de niveaux à températures élevées (en plein centre de la chambre), à des niveaux où la température est sensiblement plus basse (sommets et bords latéraux de la chambre) et vice-versa. On peut également penser que l'inversion du gradient thermique est causée parfois par la réinjection de magma basique profond et chaud qui réalimente la chambre, flux qui a pour conséquence d'augmenter légèrement la température et de raviver les phénomènes convectifs.

— *Troisième type* : Laves qui possèdent, pour une même famille minéralogique, deux types de minéraux de compositions différentes ; c'est le cas de la roche 8 (fig. 13) où coexistent phénocristaux de diopside et



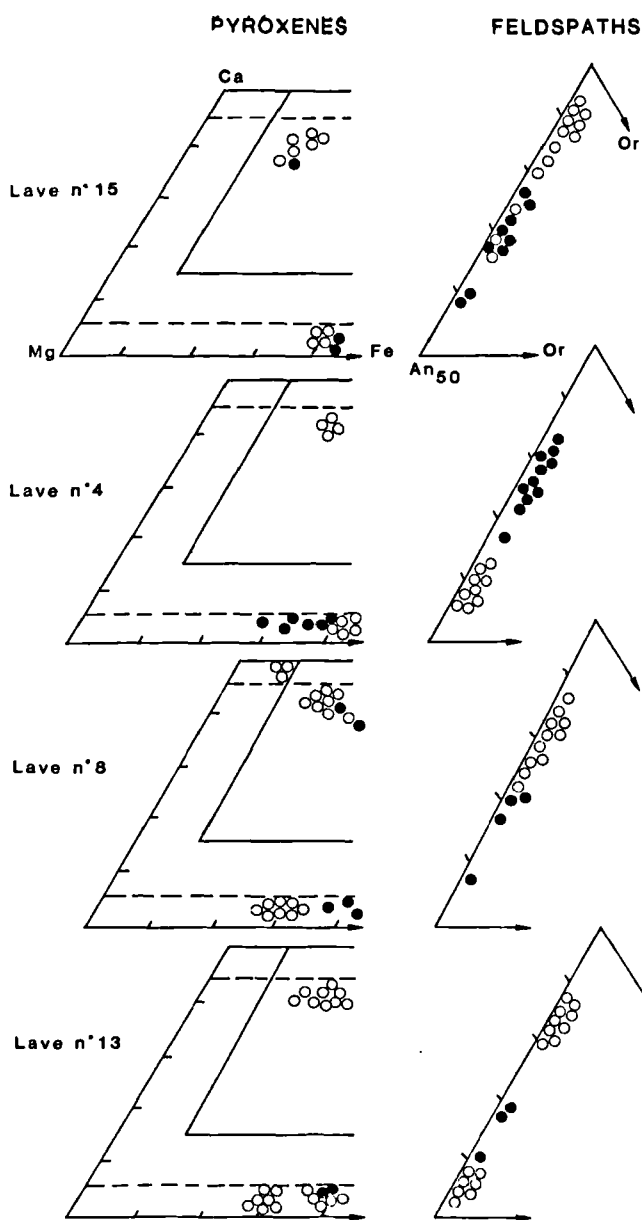


Fig. 13. — Composition des pyroxènes et des plagioclases de quelques roches andésitiques du massif Madeleine - Soufrière de Guadeloupe (d'après Lefèvre et Cocusse, 1985).  
(○ : phénocristaux ; ● : microlites).

Fig. 13. — Composition of pyroxenes and plagioclases of some andesitic rocks from Madeleine-Soufrière volcano (Guadeloupe, F.W.I.).

(○ : phenocrysts ; ● : groundmass crystals).

d'augite ; c'est aussi l'exemple de la lave 13 (fig. 13) qui possède deux sortes d'orthopyroxènes et deux types de plagioclases. Il existe donc dans ce cas une hétérogénéité minéralogique où des minéraux ayant cristallisé dans des conditions distinctes (en particulier de température), au sein de liquides différents, se trouvent associés dans la même lave. Comment interpréter ces observations ? Nous avons fait remarquer précédemment qu'il existait dans le modèle de chambre proposé des niveaux de turbulence où s'affrontent des liquides différents séparés par des interfaces. Il est probable que ces zones de turbulence favorisent les brassages et les mélanges mécaniques entre les liquides et qu'ainsi des minéraux d'une zone soient transférés dans le liquide d'une autre zone. Ainsi une lave peut éventuellement renfermer des minéraux ayant cristallisé à différents niveaux de la chambre et être considérée comme un mélange mécanique de différentes phases minérales non à l'équilibre.

d) *Présence de roches plutoniques à texture de cumulats* : Nous avons vu que le modèle de chambre magmatique proposé avait pour particularité de posséder deux niveaux de cristallisations importantes : un niveau supérieur stable où peuvent cristalliser les liquides les plus différenciés (rhyolitiques à andésitiques) et une couche basale stagnante où pourraient cristalliser les liquides basaltiques. Trouve-t-on des témoins de ces cristallisations ? Rarement, mais cela est parfois possible (Arculus *et al.*, 1980 ; Wager, 1962...). Nous prendrons comme exemple le volcan de Hunter au Vanuatu (Maillet *et al.*, 1986). Ce volcan, situé à la terminaison méridionale de l'arc des Nouvelles-Hébrides, est un volcan actif n'ayant émis que des andésites ( $SiO_2 = 60\%$ ). Ces roches sont composées principalement de plagioclases (An 70-45), d'augite, d'hypersthène (Fs 27-34). Elles ont pour caractéristique de renfermer des enclaves pluridécimétriques de roches grenues à texture de cumulats ; ces enclaves sont de deux genres :

— soit des enclaves de roches ultra-mafiques, de type pyroxénite à endiopside, olivine (Fo 83-81), hypersthène (Es 23-28) et rares plagioclases (An 75-70) ;

— soit des enclaves de roches gabbroïques à plagioclases abondants (An 60-50), augite et hypersthène (Fs 30-35).

L'application de quelques géothermomètres et géobaromètres permet d'estimer les conditions physiques de cristallisation. Pour les enclaves pyroxéniques, les températures sont de l'ordre de 1.070° et les pressions de 7-8 Kb. Quant aux enclaves gabbroïques, elles auraient cristallisé à des températures plus basses (950°) et les pressions plus faibles, (2-3 Kb). Les cumulats pyroxéniques correspondent à des cristallisations profondes au sein d'un magma "chaud" basaltique, alors que les enclaves gabbroïques correspondent à des cristallisations au sein d'un magma andésitique plus superficiel. Il faut remarquer que les minéraux présents dans les andésites sont pour l'essentiel ceux du niveau superficiel de cristallisation mais, là encore, on peut retrouver

dans ces andésites des reliques de minéraux hérités de cristallisation de niveaux plus profonds et qui ont été arrachés à leur liquide et transportés vers les niveaux supérieurs.

Examinons maintenant le fonctionnement de la chambre magmatique modélisée et les conséquences structurales et volcanologiques qui en découlent.

### 3) Les conséquences volcanologiques.

La redistribution des masses résultant de l'accumulation de liquides différenciés de faible densité au toit du réservoir pourrait changer l'équilibre gravimétrique de l'encaissant. Une intrusion qui, à l'origine, était située à un niveau l'autorisant à être en équilibre hydrostatique avec la croûte, pourrait devenir progressivement instable. Un tel mécanisme pourrait être à l'origine de la constitution de grandes caldeiras associées à l'épanchement de volumineuses quantités de pyroclastes siliceux (nuées ardentes, ignimbrites, nappes de ponces...) et rendre compte également de la montée de dômes acides post-caldeiras et post-éruptifs, si fréquents dans le volcanisme calco-alcalin.

Le dernier point qui mérite d'être abordé est celui des relations qui peuvent exister entre le mode de fonctionnement de la chambre magmatique et les mécanismes éruptifs eux-mêmes.

Un certain nombre d'observations (Martin *et al.*, 1981; McBirney, 1985) suggèrent qu'il existe une relation entre le volume des produits émis, l'acidité de ces produits et les intervalles de temps séparant deux émissions. Il semble en particulier que plus le laps de temps qui sépare deux émissions est grand, plus les volumes de téphras émis sont importants et les produits siliceux.

Pour illustrer ce propos, nous prendrons comme exemple la Montagne Pelée en considérant son activité des 5.000 dernières années.

Les études de Traineau (1982) ont permis de mettre en évidence que durant cette période la Montagne Pelée a une activité explosive qui a donné lieu uniquement à l'émission de produits pyroclastiques de deux types : soit des éruptions ponceuses ; soit des nuées ardentes de compositions acides ( $\text{SiO}_2$  56-63 %). La durée de repos entre deux éruptions n'est pas aléatoire. La probabilité d'une nouvelle éruption augmente avec le temps, notamment au-delà d'un repos supérieur à 300 ans. La répartition des événements (fig. 14) suggère une alternance régulière de périodes d'activités importantes (1-3-5 comprises entre — 4.600 ans à — 3.700 a.s ; — 2.700 ans à — 1.700 ans ; — 750 ans à présent) pendant lesquelles les volumes de téphras émis sont abondants (0,5 à 0,6  $\text{km}^3$ ), et des périodes d'activité faible (2-4), voire nulle, où les volumes émis sont restreints (0,01  $\text{km}^3$ ). On peut remarquer (fig. 14) que les émissions paroxysmales sont précédées par des durées de repos plus longues et que le volume de magma expulsé est d'autant plus grand que le temps précédant l'éruption est long.

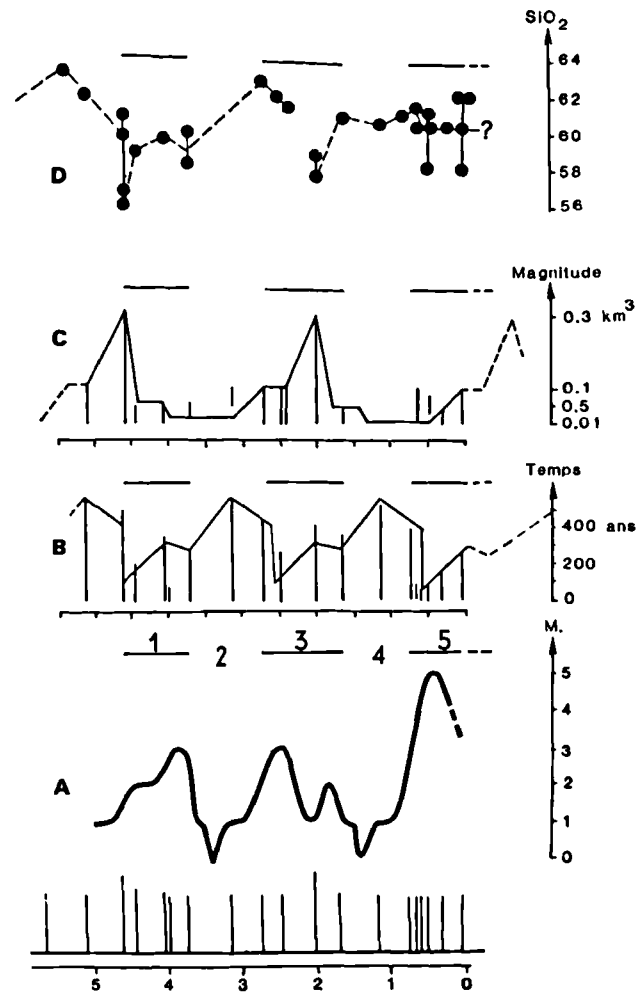


Fig. 14. — Téphrochronologie et magmatologie de la Montagne Pelée (Martinique) durant les 5.000 dernières années (Traineau, 1982).

- A. - Chronologie des événements et courbe de fréquence cumulée des éruptions pour un intervalle de 500 ans.
- B. - Evolution chronologique de la durée de la période de repos précédant l'éruption.
- C. - Evolution chronologique du volume émis lors des éruptions.
- D. - Variations de la teneur en  $\text{SiO}_2$  des laves en fonction du temps.

Fig. 14. — Montagne Pelée (Martinique, F.W.I.) : chronology and magmatology during the last 5 000 years.

- A. - Chronology and cumulated frequency curve of eruptions.
- B. - Chronological evolution of the quiet period before eruption.
- C. - Bulk chronological evolution of the products during the pulses.
- D. - Variations of  $\text{SiO}_2$  versus time.

Les variations de composition chimique des laves dans le temps peuvent être examinées de deux manières différentes :

— *Les variations à court terme*, correspondant aux différences observées entre les produits d'une éruption ; on constate deux types d'éruptions : celles où les téphras éjectés ont des compositions uniques ou voisines, et celles où l'on rencontre des produits de composition variée.

En ce qui concerne les éruptions de composition hétérogène, deux cas sont possibles :

— ou les produits acides sont les plus abondants et les produits basiques rares ; on peut penser dans ce cas que l'éruption a concerné essentiellement le sommet du réservoir où sont présents les liquides acides ;

— ou les produits basiques sont les plus abondants et les laves acides accessoires. Dans ce cas, il est raisonnable d'envisager que les éruptions correspondent à une vidange d'une grande partie (voire de la totalité) de la chambre magmatique de composition globalement basique.

Ces variations de composition chimique des produits au sein d'un même épisode correspondent donc à une hétérogénéité au sein du réservoir magmatique. Cette hétérogénéité peut traduire, soit une zonation dans le réservoir magmatique, suite à des mécanismes de différenciation, soit un manque d'homogénéisation des liquides dans le réservoir consécutif à une réalimentation de la chambre (Gourgaud, 1985).

— *Les variations à moyen terme* concernent l'évolution de l'ensemble des produits d'un volcan pendant une période d'activité déterminée. L'évolution des compositions chimiques reportées en fig. 14 par un trait tireté, correspond à la composition chimique moyenne des produits émis en plus grande quantité.

On constate que les variations à moyen terme se traduisent :

— pendant les périodes d'intense activité, par la présence abondante de produits basiques et un large éventail de composition dans les produits émis. L'évolution de la composition vers un pôle basique résulterait d'un afflux de magma profond moins différencié dans la chambre magmatique (cf. *supra*), et l'hétérogénéité de composition correspondrait à des vidanges plus ou moins totales de la chambre ;

— pendant les périodes de calme, par une augmentation de l'acidité des produits ; ceci peut être mis au compte de mécanismes de différenciation qui prédominent en raison d'un ralentissement ou d'un arrêt de l'alimentation profonde. Cette absence d'apport de magma permet également une homogénéisation chimique au sein du réservoir.

Cette périodicité dans les variations de composition chimique des laves de la Montagne Pelée est comparable à celle observée pour d'autres volcans : Santa Maria au Guatemala (Rose *et al.*, 1977) ; Boqueron au

Salvador (Fairbrothers *et al.*, 1978) ; Mayon aux Philippines (Newhall, 1979).

La superposition de deux phénomènes cycliques à la Montagne Pelée (activité et évolution chimique) tend à confirmer l'hypothèse selon laquelle le rythme de l'activité éruptive du volcan en surface est lié au rythme d'alimentation de la chambre magmatique en profondeur.

Lorsque les apports de magmas dans le réservoir sont importants, cela se traduit par une phase d'activité importante, caractérisée par des éruptions fréquentes (5 à 6 par millénaire), un volume élevé de produits émis, une baisse de teneurs en SiO<sub>2</sub> des produits et la présence de témoins de roches basiques.

Lorsque l'apport de magma diminue ou même cesse, cela se traduit en surface par une période de faible activité, caractérisée par des éruptions plus rares séparées par de longues périodes de repos, un faible volume de produits émis, une évolution de la composition vers un pôle acide, les processus de différenciation et d'homogénéisation prédominants.

## V. — EPILOGUE

Cet exposé ne se veut en aucun cas être un séminaire de recherches personnelles ; une grande partie des faits présentés repose sur des données bibliographiques rassemblées par l'auteur. Le but était de dresser un large tableau de recherches actuelles en volcanologie en intégrant à la fois des aspects théoriques, expérimentaux et géologiques, montrant par là même que du laboratoire au terrain il n'y a pas de domaines privilégiés ; « il n'y a aucun moyen de dire où va mener « un domaine de recherche donné. C'est pourquoi on « ne peut choisir certains aspects de la science et « rejeter les autres » (\*).

La théorie est nécessaire à l'élaboration d'hypothèses qui sont à la base de tout raisonnement scientifique permettant d'élaborer des modèles expérimentaux. Chaque théorie a ses limites car « pour couvrir un large « domaine, une théorie doit posséder à la fois assez de « puissance pour expliquer des événements divers et « assez de souplesse pour s'appliquer à des circonstances « variées. Mais un excès de souplesse peut changer la « la puissance en faiblesse. Car une théorie qui explique « tout finit par n'expliquer rien » (\*).

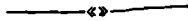
C'est pourquoi nous avons, au cours de cet exposé, cheminé du rêve (théorique et expérimental) à la réalité (géologique) supposée ; car, comme le souligne François Jacob : « ...la science s'efforce de décrire la nature et « de distinguer le rêve de la réalité. Mais il ne faut « pas oublier que l'être humain a probablement autant « besoin de rêve que de réalité » (\*).

(\*) Citations extraites de François Jacob (1981) : *Le jeu des possibles - Essai sur la diversité du vivant*. Edit. Fayard.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) ARCULUS R.J. and WILLS K.J.A. (1980). — The petrology of plutonic blocks and inclusions from the Lesser Antilles Island Arc. *J. Petrol.*, 21, p. 743-799.
- 2) BAILEY R.A., DALRYMPLE G.B. and LANPHERE M.A. (1976). — Volcanism, structure and geochronology of Long Valley Caldera, Mono County, California. *J. Geophys. Res.*, 81, p. 725-744.
- 3) BARDINTZEFF J.M. (1985). — Calc-alkaline nuées ardentes : a new classification. *J. Geodyn.*, 3, p. 303-325.
- 4) BARTLETT R.W. (1969). — Magma convection, temperature distribution and differentiation. *Am. J. of Science*, 267, p. 1067-1082.
- 5) BOWEN N.L. (1928). — The evolution of the igneous Rocks. Princeton edit.
- 6) BRANDEIS G., JAUPART C. et ALLEGRE C.J. (1984). — De l'existence de couches stagnantes à la base des chambres magmatiques convectives. *Bull. P.I.R.P.S.E.V.*, n° 84.
- 7) CANN J.R. (1968). — Geological processes at the Mid-Ocean Ridge. *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, 15, p. 331-341.
- 8) CHAYES F. (1969). — The chemical composition of cenozoic andesites. *Proceed. of the Andesite Conf. Int. Upper Mantle Project Sci. Report*, 16, p. 1-11. State of Oregon edit.
- 9) DUROCHER J. (1857). — Essai de pétrologie comparée ou recherches sur la composition chimique et minéralogique des roches ignées sur les phénomènes de leur émission et leur classification. *Ann. des Mines*, Paris. sér. 5, 11, p. 217-269 et p. 676-681.
- 10) FAIRBROTHERS G.E., CARR M.J. and DARRELL G.H. (1978). — Temporal magmatic variation at Boqueron Volcano, El Salvador. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 67, p. 1-9.
- 11) GOURGAUD A. (1985). — Mélanges de magmas dans les séries alcalines et calco-alcalines : leur rôle dans la genèse des laves intermédiaires et leur influence sur les mécanismes éruptifs. Exemples pris dans le Massif Central français (Mont-Dore, Chaîne des Puys), à la Martinique (Montagne Pelée, fissure Burgos-Diamant) et au Mexique (Pico de Orizaba). Thèse de Doctorat, Clermont-Ferrand, 522 p.
- 12) HAMILTON W.B. (1965). — Diabase sheets of the Taylor Glacier region, Victoria Land, Antarctica. *U.S. Geol. Surv. Prof. Pap.*, 465-B, 70 p.
- 13) HEKINIAN R. (1982). — Petrology of the ocean floor. Elsevier Oceanography Series, 393 p.
- 14) HILDRETH W. (1981). — Gradients in silicic magma chambers : implications for lithospheric magmatism. *J. Geophys. Res.*, 86, p. 10153-10192.
- 15) HUMLER E. et WHITECHURCH H. (1986). — Estimation des fréquences d'injection dans une chambre magmatique. Résumé, réunion « Réservoirs magmatiques », Soc. géol. Fr. et Soc. Fr. Minéral., Orsay, 6 juin 1986.
- 16) HUPPERT H.E. and SPARKS R.S. (1980). — The fluid dynamics of a basaltic magma chamber replenished by influx of hot, dense ultrabasic magma. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 75, p. 279-289.
- 17) HUPPERT H.E. and TURNER J.S. (1981). — A laboratory model of a replenished magma chamber. *Earth Planet. Sci. Letters*, 54, p. 144-152.
- 18) JUTEAU Th. (1975). — Les ophiolites des Nappes d'Antalya (Taurides occidentales, Turquie). Pétrologie d'un fragment de l'ancienne croûte océanique téthysienne. *Sci. Terre, Nancy*, Mém. n° 32, 692 p.
- 19) JUTEAU Th. (1984). — De la croûte océanique aux ophiolites. *Bull. Soc. géol. France*, 7, XXVI, p. 471-488.
- 20) LEFEVRE C. (1973). — Les caractères magmatiques du volcanisme plio-quaternaire des Andes dans le sud du Pérou. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 41, p. 259-272.
- 21) LEFEVRE C. (1979). — Un exemple de volcanisme de marge active dans les Andes du Pérou (Sud), du Miocène à l'Actuel. (Zonation et pétrogénèse des andésites et shoshonites). Thèse de Doctorat, Montpellier, 555 p.
- 22) LEFEVRE C. (1986). — Pétrographie, minéralogie des basaltes de la dorsale océanique du Bassin Nord Fidjien. (Travaux en cours).
- 23) LEFEVRE C. et COCUSSE Ph. (1985). — Etude pétrographique et minéralogique des laves du Massif volcanique Madeleine-Soufrière de Guadeloupe (Petites Antilles). Implications magmatologiques. *Bull. Minéral.*, 108, p. 189-208.
- 24) MAILLET P., MONZIER M. et LEFEVRE C. (1986). — Petrology of Matthew and Hunter volcanoes, South New Hebrides Island Arc. *Journ. of Volcanol. Geoth. Res.*, 30, p. 1-27.
- 25) MARTIN D.P., WILLIAM I. and ROSE J. (1981). — Behavioral patterns of Fuego Volcano, Guatemala. *Journ. of Volcanol. Geotherm. Res.*, 10, p. 67-81.
- 26) McBIRNEY A.R. (1968). — Petrochemistry of the Cascade andesitic volcanoes. *Oregon Dept. Geol. Miner. Ind.*, 62, p. 101-107.
- 27) McBIRNEY A.R. (1980). — Mixing and unmixing of magmas. *Journ. of Volcanol. Geotherm. Res.*, 7, p. 357-371.
- 28) McBIRNEY A.R., BAKER B.H. and NILSON R.H. (1985). — Liquid fractionation. Part. I : basic principles and experimental simulations. *Journ. of Volcanol. Geotherm. Res.*, 24, p. 1-24.
- 29) McBIRNEY A.R. and NOYES R.M. (1979). — Crystallization and layering of the Skaergaard intrusion. *J. Petrol.*, 20, p. 487-554.
- 30) MURASE T. and McBIRNEY A.R. (1973). — The properties of some common igneous rocks and their melts at high temperatures. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 84, p. 3563-3592.
- 31) NEWHALL G.N. (1979). — Temporal variation in the lavas of Mayon Volcano, Philippines. *Journ. of Volcanol. Geotherm. Res.*, 6, p. 61-83.

- 32) NILSON R.H., McBIRNEY A.R. and BAKER B.H. (1985). — Liquid fractionation. Part. II: fluid dynamics and quantitative implications for magmatic systems. *Journ. of Volcanol. Geotherm. Res.*, 24, p. 25-54.
- 33) NISBET E.G. and FOWLER C.M.R. (1978). — The Mid-Atlantic Ridge at 37° and 45°N: some geophysical and petrological constraints. *Geophys. J.R. Astron. Soc.*, 54, p. 631-660.
- 34) RITCHEY J.L. (1980). — Divergent magmas at Crater Lake, Oregon: products of fractional crystallization and vertical zoning in a shallow, water-under saturated chamber. *Journ. of Volcanol. Geotherm. Res.*, 7, p. 373-386.
- 35) ROSE W.I., GRANT N.K., HAHN G.A., LANGE I.M., POWELL J.L., EASTER J. and DEGRAFF J.M. (1977). — The evolution of Santa Maria volcano, Guatemala. *J. Geol.*, 85, p. 63-87.
- 36) SLEEP N.H. (1975). — Formation of oceanic crust: some thermal constraints. *J. Geophys. Res.*, 80, p. 4037-4042.
- 37) SMITH R.L. (1979). — Ash-flow magmatism. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 180, p. 5-27.
- 38) SPARKS R.S., MEYER P. and SIGURDSSON H. (1980). — Density variation amongst mid-ocean ridge basalts: implications for magma mixing and the scarcity of primitive lavas. *Earth Planet. Sci. Letters*, 46, p. 419-430.
- 39) SPARKS R.S., SIGURDSSON H. and WILSON L. (1977). — Magma mixing: a mechanism for triggering acid explosive eruptions. *Nature*, 267, p. 315-318.
- 40) STOLPER E. and WALKER D. (1980). — Melt density and the average composition of basalt. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 74, p. 7-12.
- 41) TRAINÉAU H. (1982). — Contribution à l'étude géologique de la Montagne Pelée, Martinique. Evolution de l'activité éruptive au cours de la période récente. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Orsay, 209 p.
- 42) TRAINÉAU H., COULON C. et WESTERCAMP D. (1982). — Mélanges magmatiques à la Montagne Pelée, Martinique: origine des éruptions de type Saint-Vincent. 9<sup>e</sup> Réunion ann. Sci. de la Terre, Paris.
- 43) WAGER L.R. (1962). — Igneous cumulates from the 1902 eruption of Soufrière Saint-Vincent. *Bull. Volcan.*, 24, p. 93-99.
- 44) WAGER L.R. and BROWN G.M. (1968). — Layered igneous rocks. Edinburg. Oliver and Boyd, 588 p.
- 45) WALKER G.P.L. (1975). — A new concept of the evolution of the British Tertiary intrusive centres. *J. Geol. Soc.*, 131, p. 121-141.
- 46) WEERTMAN J. (1971). — Theory of water-filled crevasse in glaciers applied to vertical magma transport beneath oceanic ridges. *J. Geophys. Res.*, 76, p. 1171-1183.
- 47) WHITECHURCH H., HUMLER E. et ERNEWEIN M. (1986). — Quelques contraintes sur le comportement rhéologique des liquides tholéïtiques dans les chambres magmatiques en zone d'accrétion océanique: données ophiolitiques et océaniques. Résumé, réunion « Réservoirs magmatiques », Soc. géol. Fr. et Soc. Fr. Minéral., Orsay, 6 juin 1986.
- 48) WILCOX R.E. (1954). — Petrology of Paricutin volcano, Mexico. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, 965-C, p. 281-353.
- 49) WRIGHT J.V., SMITH A.L. and SELF S. (1980). — A working terminology of pyroclastic deposits. *Journ. of Volcanol. Geotherm. Res.*, 8, p. 315-336.





## Problèmes actuels en paléontologie des Vertébrés paléozoïques

### Extant problems in Palaeozoic vertebrate palaeontology

par Alain BLIECK (\*)

*Résumé.* — Après une présentation brève de quelques méthodes d'analyse introduites récemment en paléontologie des Vertébrés (en phylogénie, biostratigraphie et paléobiogéographie), quelques exemples concrets sont choisis au cours du Paléozoïque (origine des Vertébrés, faunes siluro-dévonniennes, origine des Tétrapodes, faunes permocarbonifères).

*Abstract.* — *A short review of some recent analytical methods is given, concerning phylogeny, biostratigraphy, and biogeography. Then a few examples are chosen, viz., the origin of vertebrates, the Siluro-Devonian faunas, the origin of tetrapods, and the Permo-Carboniferous faunas.*

#### INTRODUCTION

Le but de cet exposé est de donner une idée de quelques-uns des résultats récents obtenus en paléontologie des Vertébrés, et non de survoler l'ensemble des acquis de cette discipline. Etant donné mon propre domaine de recherche, j'ai fait un choix d'exemples, orientés sur les Vertébrés inférieurs du Paléozoïque et les problèmes de paléobiogéographie.

Dans une première partie, je donnerai un aperçu de certaines des méthodes d'études nouvellement introduites, avant d'aborder, dans la deuxième partie, quelques exemples concrets. Certains de ces résultats ainsi que de nombreux autres peuvent être retrouvés dans des ouvrages de paléontologie à l'usage des enseignants et étudiants, en particulier ceux de Ginsburg (1979), Hublin (1981), et dans les fascicules spéciaux de certaines revues (Dossiers Histoire et Archéologie, n° 73, 1983 : *La Grande Enigme de l'Evolution*; n° 102, 1986 : *Sur les Pas des Dinosaures*; Bibliothèque pour la Science, 1983 : *Les Animaux Disparus*). On y trouve de nombreuses illustrations. Quelques titres en anglais constituent aussi une approche moderne du sujet [Moy-Thomas et Miles, 1971; British Museum (Natural History), 1979; Cocks ed., 1981; Forey ed., 1981].

#### I. — NOUVELLES METHODES D'ANALYSE

Tous les domaines d'intervention des paléontologues vertébristes ont été, sinon bouleversés, du moins agités par l'arrivée de méthodes d'analyse différant

sensiblement de ce qui se faisait " traditionnellement ", et ce depuis environ 15 ans. Le cas le plus débattu restera probablement dans les mémoires celui de la méthode d'analyse des caractères qualifiée de " cladistique ".

Formalisée dans les années 40 par Willi Hennig, entomologiste allemand, oubliée après-guerre comme le fut l'hypothèse de Wegener sur la dérive des continents (Flügel, 1984), redécouverte outre-Atlantique par quelques scientifiques bilingues, cette méthode a été réintroduite en Europe en 1968, à Stockholm, au Symposium Nobel 4 (Brundin, 1968), puis enseignée en France dès 1973 par Robert Hoffstetter (voir l'excellent historique de Dupuis, 1979). Elle fut dès lors adoptée par nombre de vertébristes du Muséum National d'Histoire Naturelle de Paris, en relations permanentes avec leurs collègues du British Museum (Natural History) de Londres, avant de faire tache d'huile. Plusieurs polémiques ont marqué cette période de vives discussions et elles ont parfois " dérapé " sur des domaines non scientifiques.

Cette analyse fut baptisée " cladistique " par un de ses adversaires les plus acharnés, Ernst Mayr, l'un des fondateurs de la théorie synthétique de l'évolution. Elle n'est cependant rien d'autre qu'une analyse des caractères, mais de *tous* les caractères débouchant sur des schémas de relations de parenté. Elle se veut *a priori* indépendante des données biostratigraphiques donc se démarque de l'analyse " stratophénétique ". Enfin, ses partisans en ont développé un corollaire biogéographique. Pour ces raisons, les trois aspects phylogénique,

(\*) Université de Lille I, Sciences de la Terre, GRECO 7 du C.N.R.S., 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex...  
Conférence présentée le 7 Mai 1986.

biostratigraphique et biogéographique seront analysés successivement.

1) Analyse phylogénique.

En principe, l'analyse cladistique est applicable aux groupes *actuels* dont on connaît l'embryologie et le développement ontogénique (séquence d'apparition des

caractères du jeune à l'adulte). Dans cette démarche, la "loi de récapitulation embryologique" (formulée en 1824 par A. Serres; cf. Bourdier, 1959, p. 888) est considérée *a priori* comme valide sauf cas contraire avéré ("l'ontogénie récapitule la phylogénie").

L'analyse des caractères porte au moins sur trois taxons différents (espèces ou taxons supraspécifiques), l'un servant de témoin à la comparaison des deux autres. Dans un tel cas simple, il y a trois solutions de parenté possibles (fig. 1). Dans l'exemple choisi, le goéland et le béliet ont *au moins* un caractère en commun que le saumon n'a pas : la structure des membres. C'est donc la solution 3 qui doit être retenue.

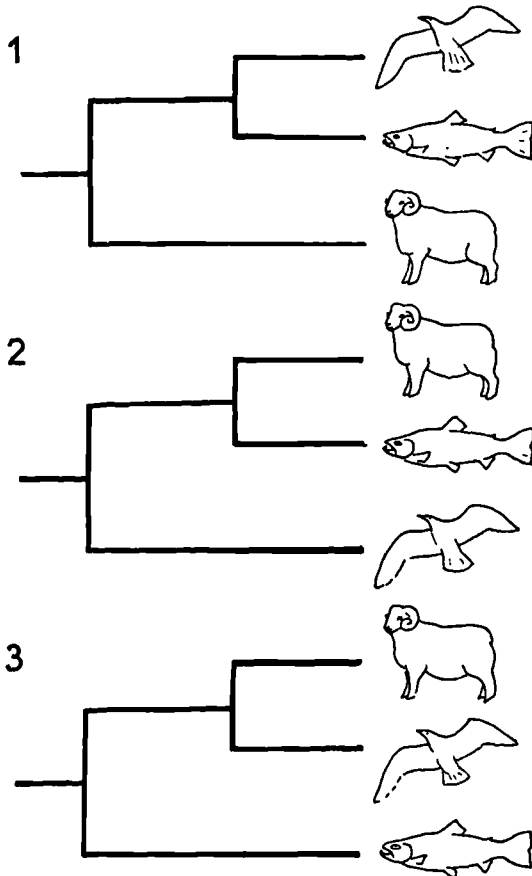


Fig. 1. — Le béliet, le goéland et le saumon. Deux de ces animaux doivent être plus étroitement apparentés entre eux qu'avec le troisième. Ils doivent donc être en relation selon l'un des trois schémas présentés. Le béliet et le goéland ont en commun au moins une homologie, l'organisation des os des membres, absente chez le saumon. Le béliet et le goéland sont donc plus proches parents. La solution 3 est la bonne. [D'après Brit. Mus. (Nat. Hist.) ed., 1979, p. 13].

Fig. 1. — The sheep, the herring gull and the salmon. Two of them must be more closely related to each other than either is to the third. So they must be related in one of the three ways here shown. The sheep and herring gull share at least one homology, the arrangement of bones in the forelimbs, not shared by the salmon. So the scheme 3 is correct [after Brit. Mus. (Nat. Hist.) ed., 1979, p. 13].

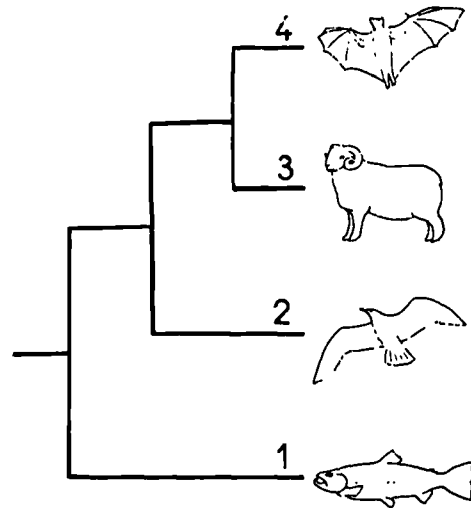


Fig. 2. — Considérons une espèce de plus que dans le cas précédent : la chauve-souris. Cet animal a des membres dont l'anatomie est très proche de celle des membres du béliet et du goéland. Il leur est donc plus étroitement apparenté. En outre, chauve-souris et béliet ont des poils que le goéland n'a pas. La chauve-souris et le béliet sont donc plus proches parents [d'après Brit. Mus. (Nat. Hist.) ed., 1979, p. 14]. Chacun des éléments suivants "4+3", "4+3+2", "4+3+2+1" est qualifié de monophylétique (issu d'une seule et même espèce ancestrale et comprenant tous ses descendants). Les sous-ensembles 4 et 3, "4+3" et 2, "4+3+2" et 1 sont qualifiés de groupes frères (issus d'une dichotomie).

Fig. 2. — Consider now one more animal, a bat. It has the same pattern of bones in its front limbs as the sheep and the herring gull. So they are more closely related. The bat and the sheep have hair, but the gull does not. So the sheep and bat are the two most closely related (after Brit. Mus. (Nat. Hist.) ed., 1979, p. 14). Each of the following groups "4+3", "4+3+2", "4+3+2+1" is a monophyletic group (having evolved from a single ancestral species and comprising all its descendants). The subgroups 4 and 3, "4+3" and 2, "4+3+2" and 1 are sister-groups.



Si on élargit l'analyse à un quatrième taxon, la chauve-souris (fig. 2), qui présente une structure des membres homologue de celle du goéland et du béliet, on arrive à la conclusion que la chauve-souris appartient au même groupe que ces deux espèces. L'embryogenèse, la morphogenèse, l'anatomie montrent que la chauve-souris a plusieurs autres caractères partagés avec le béliet, mais pas avec le goéland (les poils, la lactation, etc.) : la chauve-souris est donc plus proche parente du béliet (" elle présente plus d'affinités avec le béliet "). L'analyse peut être élargie de cette façon à autant de taxons que l'on veut.

Elle s'est révélée également applicable aux formes fossiles. Dans l'exemple choisi parmi les Hétérostracés (fig. 3), le Protoptéraspide (B) et le Ptéraspide (C) sont considérés comme plus proches parents parce qu'ils offrent un nombre et une disposition des plaques osseuses identiques. Cette morphologie se retrouve sur les individus jeunes (de petite taille) des Psammostéides

(A, fig. 3) qui sont donc apparentés aux précédents. Mais comme les Psammostéides adultes développent des éléments osseux surnuméraires, les " tessères " (te, fig. 3), qui n'existent ni sur les Protoptéraspides, ni sur les Ptéraspides, les Psammostéides peuvent être considérés comme plus " dérivés " (plus " évolués ") que les autres. On peut remarquer que, dans ce type d'analyse des caractères, on n'utilise pas *a priori* la répartition stratigraphique des taxons fossiles. On peut par contre l'utiliser comme test *a posteriori*. Par exemple, l'analyse phylogénique de la fig. 3 donne les Psammostéides comme plus dérivés que l'ensemble " Protoptéraspides + Ptéraspides " par rapport aux autres Hétérostracés (A, fig. 4). Or les Psammostéides sont plus récents stratigraphiquement (B, fig. 4) : il n'y a donc pas d'incompatibilité entre les deux résultats. Par contre, à un niveau d'analyse plus large, deux autres taxons, les Cyathaspides et les Amphiaspides, ont été supposés plus " évolués " que les autres Hétérostracés (C, fig. 4, d'après Blicek, 1982b) bien qu'ils

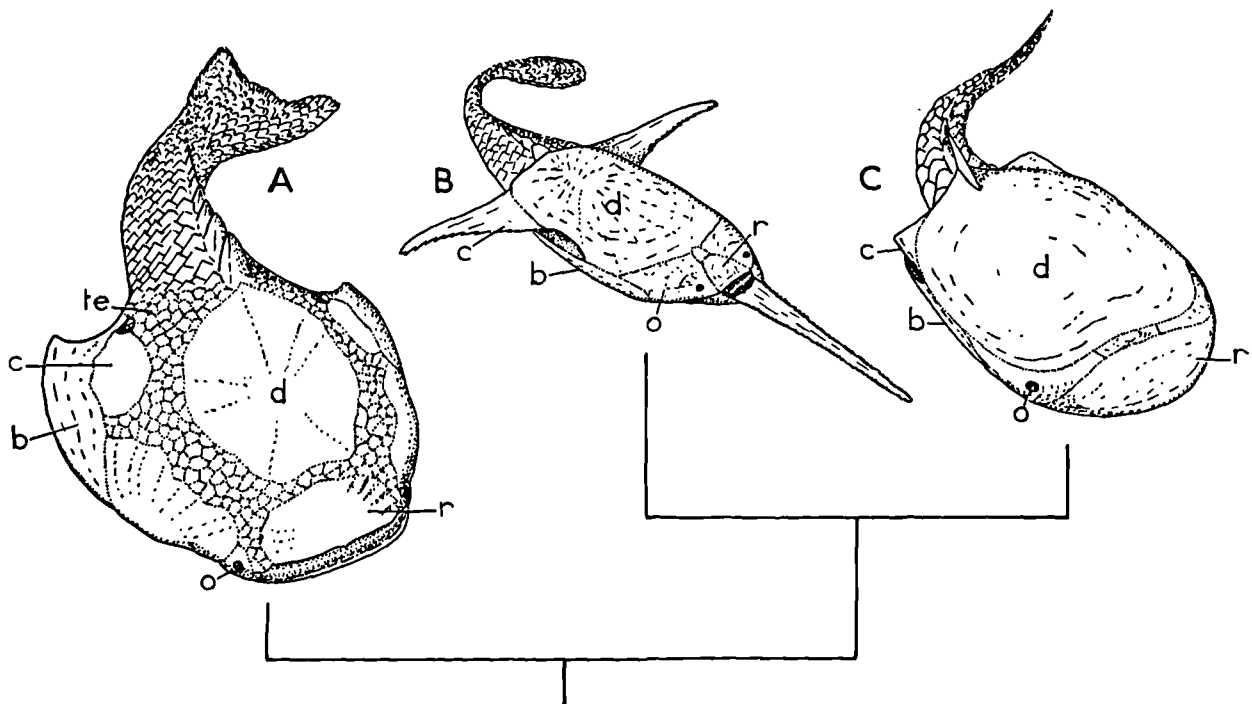


Fig. 3. — Reconstitution de trois Hétérostracés, un Psammostéide (A), un Protoptéraspide (B) et un Ptéraspide (C) des Vieux Grès Rouges (Dévonien) : b, c, d, o, r correspondent aux plaques osseuses homologues sur les trois espèces. B et C présentent une disposition des plaques osseuses identique, sans " tessères " (te) entre elles. Ils sont donc plus étroitement apparentés. Par contre, les tessères (te) du Psammostéide, absentes sur les jeunes, existent sur les adultes : la carapace osseuse du Psammostéide montre donc un état plus " dérivé " que celle de B et C (extrait de Blicek, 1984).

Fig. 3. — Reconstruction of three heterostracans, a psammosteid (A), a protopteraspid (B) and a pteraspid (C) from the Devonian Old Red Sandstones : b, c, d, o, r represent homologous plates on the three species. B and C have similar pattern of bony plates, without tesserae (te) in between. They are thus more closely related. On the psammosteid (A), the tesserae, although absent on the young stages, are present on the adults : its carapace shows a more derived condition than that of B and C (after Blicek, 1984).

fussent plus anciens stratigraphiquement. C'est en fait la découverte d'un autre groupe, les Anchiptéraspides (Elliott, 1984), de morphologie et d'âge stratigraphique intermédiaires entre ceux des Cyathaspides et des Ptéraspides, qui a amené à reprendre l'analyse des caractères et à proposer le schéma de relations de parenté (" cladogramme ") de la fig. 4D. Dans ce schéma, qui

tient compte des découvertes récentes, la stratigraphie corrobore l'analyse phylogénique.

L'analyse cladistique se démarque donc, entre autres, de l'analyse stratophénétique qui, elle, utilise la répartition stratigraphique des espèces comme point de départ de l'établissement des lignées et arbres phylé-

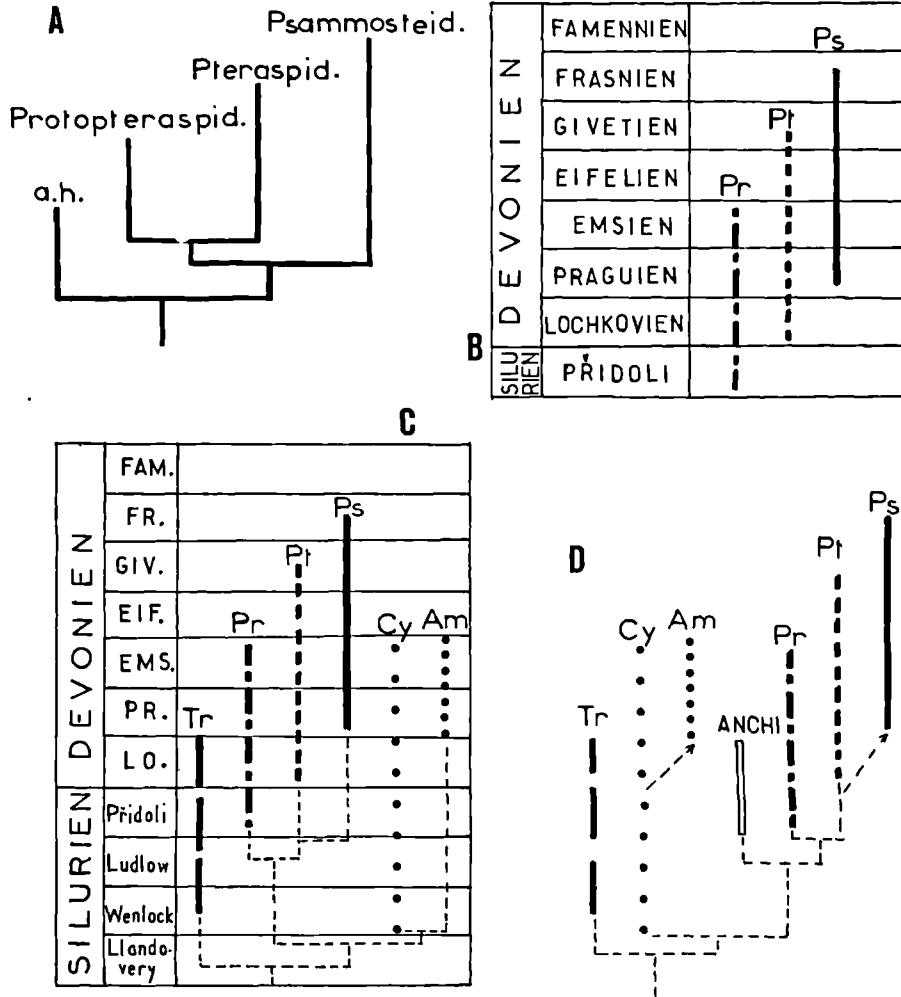


Fig. 4. — Le schéma de relations de parenté A (cladogramme) n'est pas en contradiction avec la répartition stratigraphique des taxons B puisque les Psammostéides (Ps), considérés comme plus dérivés, sont également les plus récents. Par contre, sur le cladogramme C, l'ensemble " Cyathaspides + Amphiaspides " (Cy + Am), considéré comme le plus dérivé, était paradoxalement le plus ancien stratigraphiquement. Le schéma D qui prend en compte les caractères d'un groupe intermédiaire découvert récemment, les Anchiptéraspides (ANCHI), met fin à cette contradiction.

Fig. 4. — The phylogenetic hypothesis or cladogram A is not in contradiction with the stratigraphic record B, as the most derived taxon, the psammosteids (Ps), is also the most recent. On the contrary, on cladogram C, the cyathaspids-amphiaspids (Cy + Am), although being considered more derived, are stratigraphically older. The cladogram D, which takes care of a newly discovered intermediate taxon, the anchipteraspids (ANCHI), does not show that contradiction.

tiques. Un exemple allant à l'encontre de cette méthode est donné sur la fig. 5, où le groupe de Cordés le plus primitif, les Céphalocordés, est pourtant celui qui "apparaît" le plus tard dans la documentation paléontologique (apparemment pour des raisons liées à la fossilisation). Les deux méthodes s'opposent donc par l'utilisation des données liées au temps : la stratophénétique procède "de bas en haut" (elle part des fossiles pour aboutir aux actuels), la cladistique "de haut en bas" (elle part des données actuelles). L'analyse cladistique semble plus opérationnelle au niveau supraspécifique, l'analyse stratophénétique étant d'usage courant au niveau spécifique notamment de la part des invertébristes, micropaléontologistes et paléobotanistes (nombreux exemples *in* Chalaine, ed., 1983 ; voir aussi Lazarus et Prothero, 1984).

2) **Biostratigraphie.**

Pendant le même temps mais indépendamment du débat sur le cladisme, plusieurs méthodes quantitatives de corrélations biostratigraphiques sont apparues. Citons celles de Guex (1977) et Blank (1979) [voir aussi Cubitt et Reymont (1982)]. Ces méthodes sont évidemment applicables *a priori* à tous les groupes, Vertébrés ou non. Je n'en ai essayé qu'une, celle de Guex, et seulement "à la main", c'est-à-dire sans moyen de

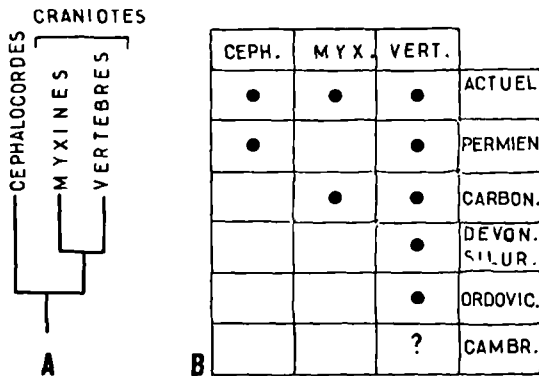


Fig. 5. — La quasi totalité des naturalistes s'accorde à reconnaître les Céphalocordés (*Amphioxus et alii*) comme le groupe d'Invertébrés le plus proche des Craniotes (Myxines + Vertébrés *s. s.*) (A). Et pourtant, l'ordre d'apparition de ces taxons (B) ne reflète pas cette phylogénie puisque les plus dérivés, les Vertébrés (Vert), sont connus en tant que fossiles bien avant les Céphalocordés (Ceph) et les Myxines (Myx). Ceci serait dû aux difficultés de fossilisation de ces derniers.

Fig. 5. — Among naturalists, the cephalochordates are generally considered as the invertebrates which are more closely related to Craniates (myxinoids or hagfishes, and vertebrates *s. s.*) (A). However the stratigraphical record (B) does not reflect this cladogram, as the most derived, the vertebrates (Vert), are the oldest fossilized ones.

calcul, mais il s'agit là, à mon avis, d'outils à développer pour corréler efficacement des coupes comportant plusieurs centaines ou milliers d'espèces fossiles. Cet outil est plus précis que la méthode habituelle fondée sur l'établissement de biozones définies à partir de quelques espèces-index seulement (Hedberg, 1979).

J'ai donc appliqué la méthode d'analyse biochronologique de Guex aux séries sédimentaires à Vertébrés du Siluro-Dévonien (les Vieux Grès Rouges : fig. 6-7). La séquence de base est celle de Grande-Bretagne où une biozotation a été fondée sur les Hétérostracés. La série de Podolie, en Ukraine, offre l'avantage de renfermer à la fois des Vertébrés et des Invertébrés ; elle permet donc de caler l'échelle des Vieux Grès Rouges par rapport à l'échelle chronostratigraphique standard fondée sur les Invertébrés (Bassin Barrandien, coupe de Klouk, pour la limite Silurien/Dévonien ; fig. 6). Le principe consiste à ne conserver pour l'analyse que les taxons communs en tout ou en partie aux différentes séries, chacun d'eux étant représenté par un numéro différent (fig. 6). Partant de ces données, on établit la demi-matrice des spectres d'association de chaque espèce : chaque point de la demi-matrice correspond à la coexistence de deux espèces concernées dans au moins une des coupes sélectionnées (A, fig. 7). Puis on ré-arrange la demi-matrice en fonction de l'ordre d'apparition des espèces (B, fig. 7) : ainsi l'espèce 1 apparaît toujours la première dans nos coupes, les espèces 4 et 5 étant les plus tardives et toujours associées (fig 6). Les sous-matrices carrées compactes (B, fig. 7) permettent alors de définir les associations unitaires (C, fig. 7) ordonnées en fonction du temps (D, fig. 7). Il n'y a plus qu'à comparer chacune des séquences stratigraphiques de départ à cette échelle synthétique pour établir leurs relations (D, fig. 7). On montre notamment par cette méthode que la limite Downton/Ditton de Grande-Bretagne ne correspond pas à la limite Silurien/Dévonien, contrairement à ce qui est écrit dans les manuels.

Pourtant, cette méthode devient très difficile à mettre en œuvre manuellement avec plusieurs dizaines d'espèces ; elle requiert alors les moyens de calculs développés par Guex et Davaud (1982).

Signalons également qu'une orientation récente en biostratigraphie a focalisé l'attention des vertébristes sur l'usage d'un groupe particulier de microfossiles, les spores ; celles-ci sont en effet présentes à la fois dans les séries à Vertébrés et dans les séries à Invertébrés. Elles sont donc un outil puissant de corrélation pour mettre au point une échelle générale au moins au Paléozoïque moyen et supérieur (voir en particulier Richardson et McGregor, 1986 ; Steemans, 1986).

3) **Biogéographie.**

La méthode traditionnelle fondée sur la répartition des associations fauniques liées aux faciès sédimentaires et sur l'ordre d'apparition des taxons dans des

aires géographiques données en fonction de l'ancienneté supposée des fossiles, est également contestée. En effet, la répartition des assemblages reflète en fait des conditions écologiques semblables ou voisines où il y a de fortes chances de récolter des taxons ayant évolué par convergence : cette répartition reflète souvent les conditions climatiques mais pas forcément les relations paléogéographiques. En outre, supposer un sens de migration entre deux aires (ou plus) à partir de l'ancienneté des fossiles récoltés n'a pas de sens : la migration elle-même est invérifiable, toute découverte fortuite peut venir inverser le schéma, les "centres d'origine" varient avec les auteurs (nombre de centres d'origine sont identifiés à la région où travaille le spécialiste, ou à celle où le plus grand nombre de travaux a été réalisé : Europe, U.S.A., U.R.S.S., Australie, etc.) !

Certains cladistes ont donc développé une méthode biogéographique originale : on travaille non pas sur des

assemblages mais sur des taxons (espèces, genres ou supra), on s'intéresse davantage aux répartitions disjointes qu'aux répartitions vastes, communes. Le "jeu" consiste alors à comparer la répartition de groupes divers, ayant peu ou pas de liens de parenté entre eux (voir un exposé succinct de la méthode *in* Goujet et Matile eds., 1978 ; Matile et Goujet, 1981 ; Janvier, 1982). On établit donc les cladogrammes de plusieurs groupes monophylétiques, composés d'espèces endémiques à plusieurs aires géographiques dont on veut analyser les relations (A, fig. 8). Si ces cladogrammes concordent dans leurs résultats, le "géocladogramme unitaire" ainsi défini permet de proposer une séquence de fragmentations des aires géographiques (D, fig. 8). Ce type d'analyse fait penser immédiatement aux fragmentations de la Gondwanie et aux relations transantarctiques. Il a été mis au point essentiellement à partir de l'étude de faunes actuelles et vaut surtout pour le Méso-Cénozoïque mais il pose des problèmes pour le Paléozoïque.

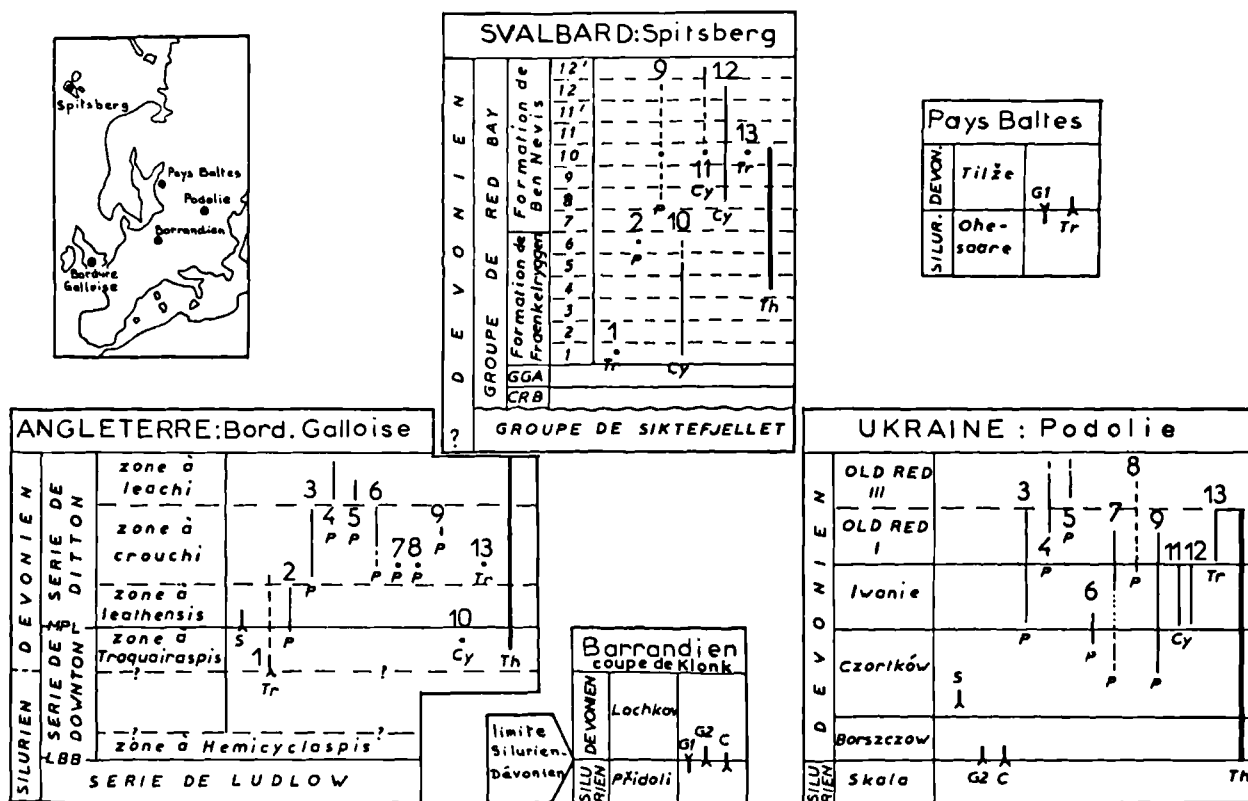


Fig. 6. — Répartition stratigraphique de quelques Vertébrés (1 à 13), Invertébrés (Graptolites G1 et G2 ; Conodontes C) et spores (S) dans cinq coupes du Siluro-Dévonien d'Europe (d'après Blicek, 1984, fig. 70).

Fig. 6. — Stratigraphical distribution of vertebrates (1-13), invertebrates (graptolites G1-G2 ; conodonts C) and spores (S) in five Siluro-Devonian synthetic sections from Europe (after Blicek, 1984, fig. 70).

Après ce bref aperçu des quelques méthodes les plus marquantes introduites ces dernières années, passons aux quelques exemples choisis pour les illustrer.

## II. — QUELQUES EXEMPLES

### 1) L'origine des Vertébrés.

En ce qui concerne l'origine des Vertébrés, on se heurte immédiatement à un problème de définition. Les restes les plus anciens récoltés dans le Paléozoïque

inférieur ne sont pas des animaux à vertèbres mais des fragments de tissu osseux hyperminéralisé en fluorophosphate de calcium (apatite), ayant une structure histologique particulière à trois couches dont une couche médiane "spongieuse". C'est l'association de ces deux traits qui différencie ces organismes de tous les "Invertébrés". La même structure osseuse existe sur les Hétérostracés du Silurien-Dévonien (fig. 3).

Les "Vertébrés" avérés les plus anciens étaient des animaux d'une quinzaine de centimètres de longueur avec une carapace céphalique constituée d'éléments

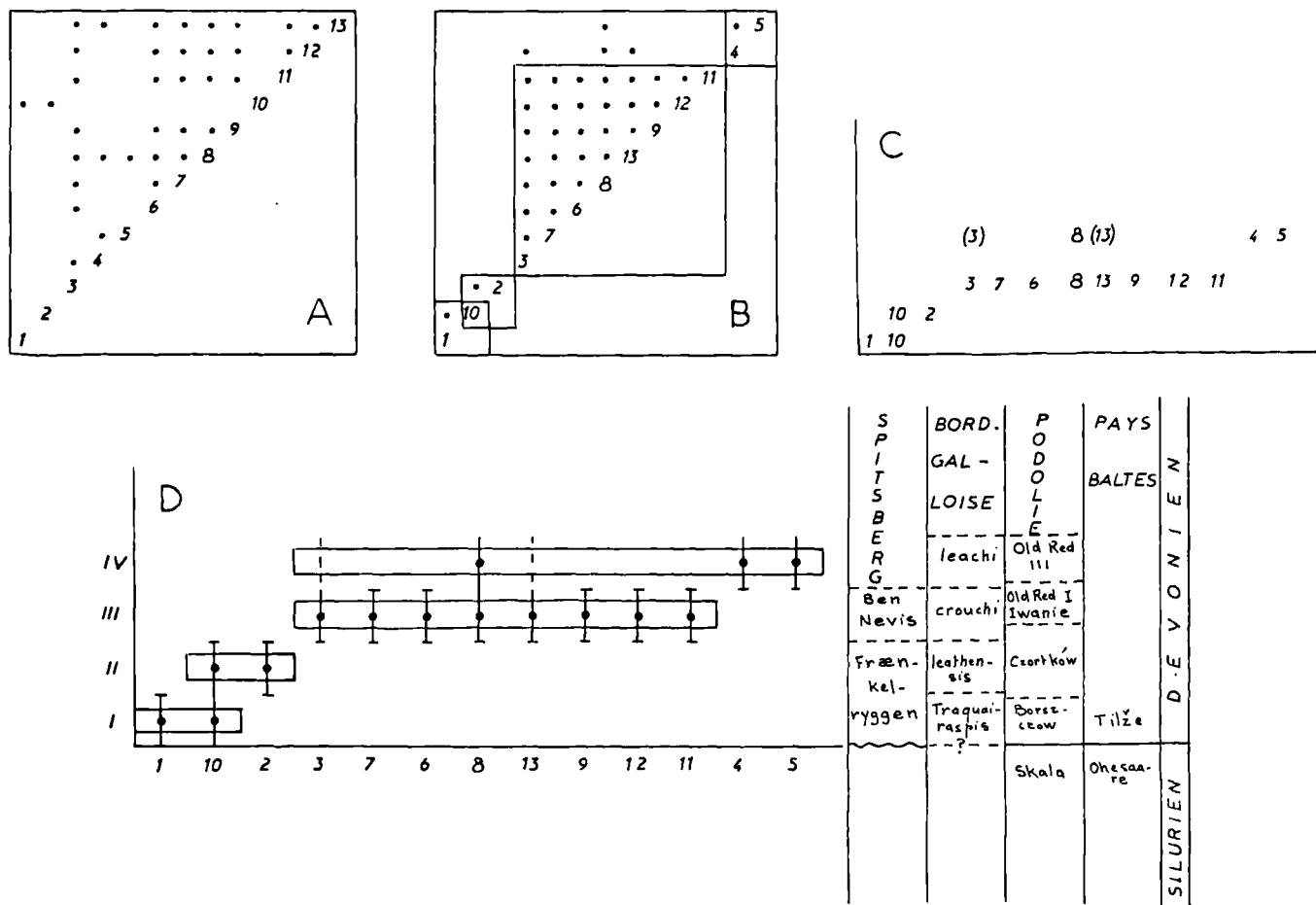


Fig. 7. — Analyse biochronologique de Guex appliquée aux Vertébrés du Siluro-Dévonien d'Europe (d'après Blicek, 1984, fig. 71). Les espèces 1 à 13 sont celles de la fig. 6.

A, demi-matrice des spectres d'association. — B, demi-matrice ré-arrangée en fonction de l'ordre d'apparition des taxons. C, tableau des associations unitaires. — D, tableau synthétique des extensions verticales et corrélations stratigraphiques.

Fig. 7. — Guex' biochronological analysis, as applied to the European Siluro-Devonian vertebrates of fig. 6 (after Blicek, 1984, fig. 71).

A, half-matrix of assemblages. — B, half-matrix re-arranged according to the first stratigraphic occurrences. — C, table of unitary assemblages. — D, synthetic chart of stratigraphic distributions and correlations.

osseux jointifs, les "tessères". Sans nageoires paires, ils se déplaçaient près des fonds marins à l'aide de leur seule nageoire caudale. Il s'agit des exemples désormais classiques d'*Astraspis* et *Eriptychius* de l'Ordovicien moyen d'Amérique du Nord (Grès de Harding et équivalents), d'*Arandaspis* et *Porophoraspis* de l'Ordovicien moyen d'Australie (Grès de Stairway). Signalons également la découverte récente d'une autre forme, *Sacabambaspis*, dans l'Ordovicien supérieur de Bolivie (Gagnier *et al.*, 1986) (fig. 9).

On connaît également au Cambrien des microrestes phosphatés n'ayant pas la structure lamellaire, non spongieuse des Invertébrés. Leur structure histologique différenciée évoque celle des fragments de l'Ordovicien. Citons notamment *Lenargyrion* et *Hadimopanella* du Cambrien inférieur de Sibérie et du Cambrien moyen de Turquie (Gedik, 1977 ; Bengtson, 1977) mais aussi *Anatolepis*, récolté dans le Cambrien supérieur et l'Ordovicien inférieur (Bockelie et Fortey, 1976 ; Repetski, 1978).

Nombre de paléozoologistes actuels se représentent donc les "formes ancestrales" de Vertébrés comme de petits animaux pisciformes, marins, avec

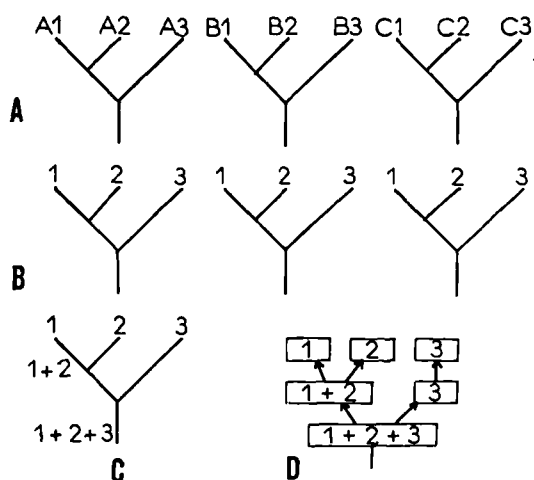


Fig. 8. — Soit trois groupes monophylétiques A, B, C, renfermant chacun des espèces endémiques aux aires géographiques 1, 2, 3. En A, ont été établis les cladogrammes des groupes A, B, C. En B, sont représentées les relations des aires 1, 2, 3 ("géocladogrammes") déduites des cladogrammes précédents. Les trois schémas étant concordants, on en déduit un "géocladogramme unitaire" C. Ce schéma permet de définir les étapes successives de fragmentation des aires géographiques D (d'après Janvier, 1982, p. 918).

Fig. 8. — Consider three monophyletic groups A, B, C, comprising species endemic to the geographical areas 1, 2, 3. From the "zoo-cladograms" (A), are deduced three "geo-cladograms" (B). These three schemes being in accordance, we can deduce a unified geo-cladogram (C). This leads to define the succeeding stages of splitting of the geographical areas (D) (after Janvier, 1982, p. 918).

une bouche terminale et une nageoire caudale, au corps couvert de petits éléments osseux dermiques phosphatés (tessères et/ou écailles). Ceci pourtant ne résout pas le problème de "l'origine" des Vertébrés puisque les organismes qui leur sont le plus étroitement apparentés (Myxines et Céphalocordés : A, fig. 5) ne sont pas connus à l'état fossile au Paléozoïque inférieur (B, fig. 5). Il faut cependant signaler une thèse "hérétique" enracinant les Cordés au niveau d'un groupe particulier d'Echinodermes du Paléozoïque, les Carpoïdes, à symétrie non radiaire (voir par exemple Jefferies, 1979). Cette thèse est réfutée par Ubaghs (1981) parce que, selon lui, l'aulacophore des Carpoïdes pouvait s'ouvrir et ne pouvait donc pas renfermer de structure homologue d'une corde.

Il faut également rattacher à ce problème l'énigme des Conodontes. La découverte dans un tiroir de musée d'un "animal-conodonte" provenant du Carbonifère d'Ecosse (Briggs *et al.*, 1983) et présentant quelques traits morphologiques analogues, soit à ceux des Myxines, soit à ceux des Chétognathes, a rallumé le débat (voir Janvier, 1983 ; Aldridge *et al.*, 1986). Dans l'hypothèse la plus récente cependant, les "Conodontophores" (animaux porteurs de conodontes) se voient de nouveau écartés de l'ascendance des Vertébrés puisque les assemblages de conodontes seraient homologues de la radula des Mollusques Aplacophores et que ce qui avait été pris pour l'empreinte de rayons de nageoire ne serait que la trace de spicules (Tillier et Cuif, 1986 ; Tillier et Janvier, 1986). Bref, la question est encore ouverte !

Notons enfin que la répartition géographique des Vertébrés ordoviciens pose problème. Ces petits animaux marins de plates-formes détritiques étant probablement incapables d'effectuer de grandes migrations transocéaniques, leur répartition implique une continuité entre les aires épicontinentales d'Australie, Bolivie et Amérique du Nord. Or, cette continuité n'est pratiquement jamais réalisée sur les reconstitutions paléogéographiques mondiales fondées sur les données paléomagnétiques (fig. 9).

## 2) L'ère des "Poissons".

On sait qu'au Silurien-Dévonien, soit entre — 450 et — 370 M.A., tous les grands groupes de Vertébrés aquatiques étaient présents. Depuis une vingtaine d'années on reconnaissait deux ensembles majeurs de Vertébrés, les "Agnathes" sans mâchoires, les Gnathostomes pourvus de mâchoires. Mais même ce schéma ne peut plus être retenu. L'analyse cladistique, pratiquée par plusieurs auteurs (voir notamment Janvier, 1981, 1986 ; Forey, 1984 a-b), a montré en particulier que le regroupement "Agnathes" était artificiel ("paraphylétique") : l'état agnathe des Vertébrés est un caractère "primitif", les "Agnathes" ne correspondant pas à un groupe naturel monophylétique (fig. 10). Au cours du Paléozoïque, deux extinctions majeures affectent l'histoire des Vertébrés : une à la fin de

l'Ordovicien (entre Caradoc et Llandovery), une à la fin du Dévonien. La première voit la disparition des premiers Vertébrés ossifiés (fig. 9) et serait liée à la glaciation fini-ordovicienne. La seconde concerne tous les "Agnathes" cuirassés (ex-"Ostracodermes"; limite Frasnien/Famennien) puis tous les Placodermes (limite Famennien/Tournaisien) et serait liée à la restriction des plates-formes carbonatées au cours de la régression famennienne (fig. 10).

La répartition géographique des Vertébrés du Paléozoïque moyen pose actuellement à un certain nombre

d'auteurs des problèmes difficiles à résoudre. Je choisis ici un exemple parmi les faunes dévoniennes. Considérons tout d'abord une des reconstitutions paléogéographiques les plus récentes pour le Dévonien, celle d'Heckel et Witzke (1979), fondée sur un ensemble de données paléontologiques, pétrographiques et paléomagnétiques (A, fig. 11). Comme il a été exposé fig. 8, un moyen de "tester" cette reconstitution est d'établir les "géocladogrammes" issus de l'analyse cladistique de plusieurs groupes d'organismes : quelques-uns sont représentés sur la fig. 11B. Les problèmes posés sont les suivants : d'une part, les géocladogrammes ne concor-

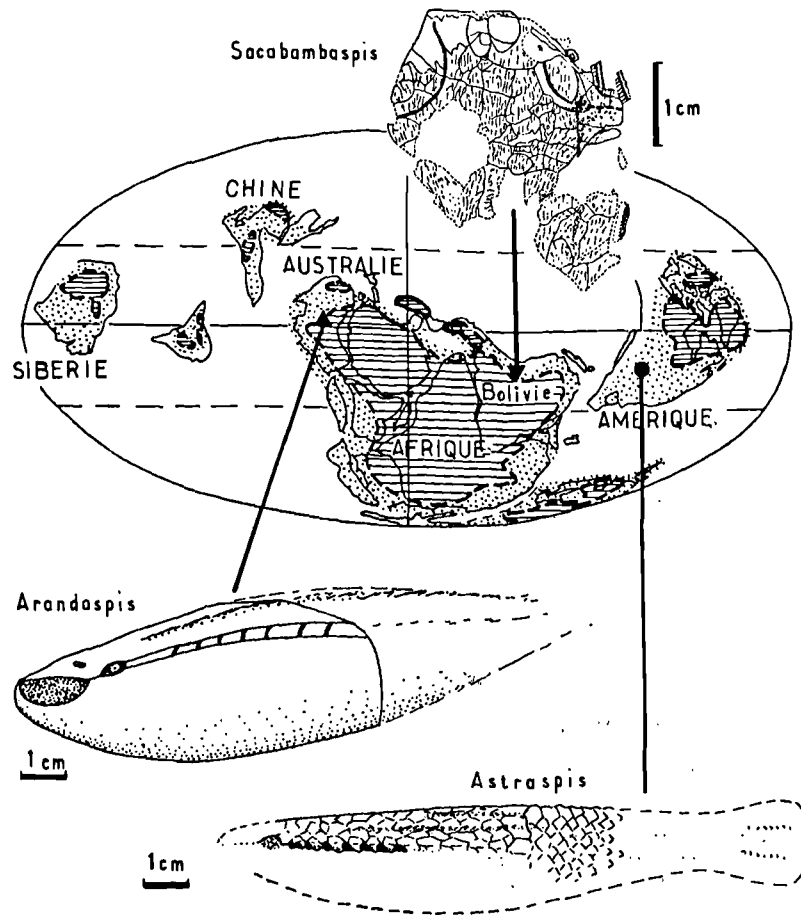


Fig. 9. — Répartition géographique des Vertébrés ordoviciens : *Sacabambaspis* (fragment de bouclier ventral, composé de "tessères"), *Arandaspis* (reconstitué en vue antérolatérale gauche), *Astraspis* (bouclier dorsal reconstitué, en vue latérale gauche). D'après Gagnier *et al.* (1986, fig. 1B), Ritchie et Gilbert-Tomlinson (1977, fig. 8A, modifié), Elliott in Janvier (1986, fig. 1F). Canevas paléogéographique d'après Scotese *et al.* (1979, fig. 10) ; aires émergées en tireté, aires marines épicontinentales en pointillé.

Fig. 9. — Geographical distribution of the Ordovician vertebrates : *Sacabambaspis* (a fragmentary tessellated ventral shield), *Arandaspis* (reconstructed in left antero-lateral view); *Astraspis* (dorsal shield in left lateral view). After Gagnier *et al.* (1986), Ritchie and Gilbert-Tomlinson (1977), Elliott in Janvier (1986). Palaeogeographical reconstruction of Scotese *et al.* (1979) : emerged areas dashed, epicontinental marine platforms dotted.





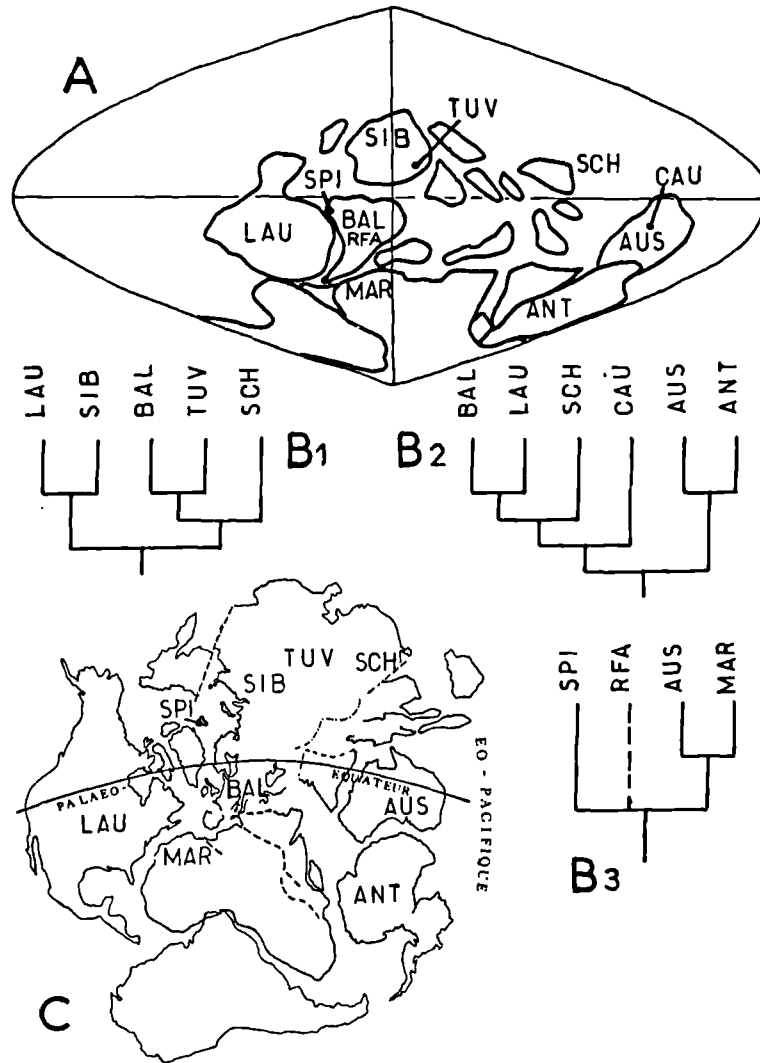


Fig. 11. — Problèmes de paléobiogéographie au Dévonien. La reconstitution A, extraite de Heckel et Witzke (1979), montre une constellation de petits blocs continentaux, notamment en Asie, séparés par des espaces (océaniques) relativement larges. Or les géocladogrammes B1-B3, issus de l'analyse des relations de parenté de divers groupes "d'Agnathes" et de Placodermes (B1-B2 d'après Young, 1981, fig. 3; B3 d'après Lelièvre, 1984, fig. 20) impliquent des relations continentales plus directes, notamment entre la Chine du Sud (SCH) et l'Europe (BAL = Baltica), ou entre l'Australie (AUS) et le Maroc (MAR). Ils nécessitent également un regroupement de ces masses continentales avant le Dévonien, hypothèse illustrée par la reconstitution C (extraite de Lelièvre, 1984, fig. 21; d'après Rickard et Belbin, 1980 et Carey, 1976).

Autres abréviations : ANT, Antarctique. — CAU, Australie centrale. — LAU, Laurentia. — R.F.A., Allemagne. — SIB, Sibérie. — SPI, Spitsberg. — TUV, Tuva.

Fig. 11. — Devonian palaeobiogeographical problems. Heckel and Witzke's (1979) reconstruction shows several small continental blocks, particularly in Asia, separated by rather wide (oceanic) spaces. But the geo-cladograms B1-B3, deduced from cladistic analyses of "agnathans" and placoderms (B1-B2 after Young, 1981; B3 after Lelièvre, 1984), imply closer continental relationships between South China (SCH) and Europe (BAL = Baltica), or between Australia (AUS) and Morocco (MAR). They also imply a pre-Devonian more compact reconstruction, as illustrated by reconstruction C (Lelièvre, 1984).

Other abbreviations : ANT, Antarctica. — CAU, Central Australia. — LAU, Laurentia. — R.F.A., F.R.G. — SIB, Siberia. — SPI, Spitsbergen. — TUV, Tuva.

Märss et Ejnasto, 1978; Spjeldnaes, 1979, 1982; Thomson, 1980), les Vertébrés aquatiques subissent une série d'extinctions au Frasnien/Famennien (disparition de tous les "Agnathes" cuirassés, fig. 10) et au Famennien/Tournaisien (disparition des Placodermes, Struniiformes, Porolépiformes, fig. 13), vraisemblablement liées à la raréfaction des plates-formes carbonatées et à une crise climatique (Janvier, 1978). Parallèlement, deux groupes de Gnathostomes, déjà présents au Silurien terminal, réalisent leurs radiations adaptatives au début du Carbonifère: les Chondrichthyens et les Actinoptérygiens deviennent les éléments domi-

nants des ichtyofaunes du Paléozoïque supérieur (fig. 13). Ces poissons colonisent alors franchement tant les milieux continentaux que les milieux marins profonds, les Chondrichthyens étant classiquement considérés comme des indicateurs de milieux marins. Après la diminution et la disparition des Ostéolépiformes et des Acanthodiens au cours du Permien, la limite Permien/Trias, pourtant la plus importante pour les Invertébrés marins (v. par ex.: Dickins, 1983; Jablonski, 1986) ne semble pas aussi bien marquée que la coupure Dévonien/Carbonifère pour les Vertébrés. On note une simple raréfaction des Chondrichthyens mais une nouvelle

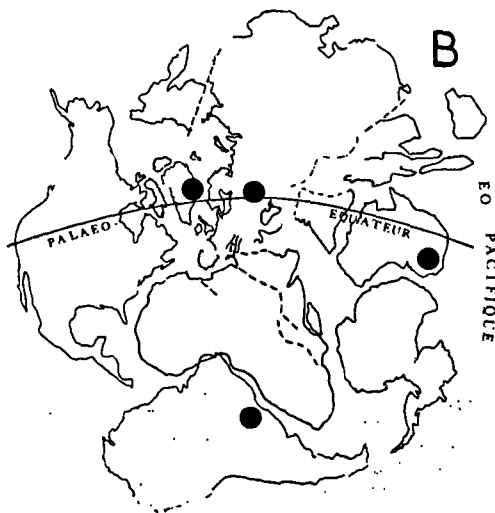
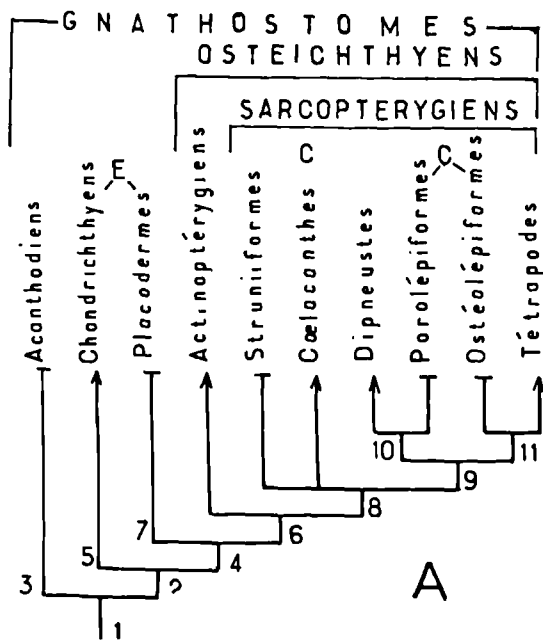


Fig. 12.

A: Schéma des relations de parenté entre Gnathostomes, inspiré de Janvier, 1981, fig. 17; 1986, fig. 2 J) et Lelièvre (1986, p. 147) - complément à la fig. 10.

Les taxons encore actuels sont figurés avec une flèche, les fossiles avec un tiré horizontal. L'analyse des caractères amène à la conclusion suivante: les regroupements "Elasmobranchiomorphes" (E) et "Crossoptérygiens" (C) ne sont pas des groupes monophylétiques. L'ordre d'apparition des principaux caractères dérivés est le suivant: 1, mâchoires, trois canaux semi-circulaires, etc. — 2, structure de l'endosquelette des nageoires paires. — 3, épine devant chaque nageoire. — 4, plaques dermiques avec recouvrements, parasphénoïde, etc. — 5, cartilage calcifié prismatique, etc. — 6, dentaire, prémaxillaire, maxillaire, lépidotriches, vessie natatoire ou poumons, etc. — 7, palatocarré en omega. — 8, endosquelette des nageoires paires articulé par un seul élément sur les ceintures. — 9, dents principales à structure plissée. — 10, narine postérieure très proche du bord buccal, etc. — 11, une seule narine externe, dents polyplacodontes, choanes.

B: La répartition géographique des premiers Tétrapodes au Dévonien supérieur implique une proximité géographique entre Laurasia et Gondwanie, ce qui est réalisé sur le canevas paléogéographique de Lelièvre (1984) représenté ici.

Fig. 12.

A: Phylogenetic relationships of Gnathostomes, after Janvier (1981, 1986) and Lelièvre (1986). Still extant taxa are figured with arrows, fossil ones with a dash. The character-analysis leads to the following conclusions: the "Elasmobranchiomorphs" (E) and "Crossopterygians" (C) are not monophyletic groups. The main derived characters are as follows: 1, jaws, three semi-circular canals, etc. — 2, paired fins endoskeletal structure. — 3, one spine in front of each fin. — 4, dermal plates with overlap areas, parasphenoid, etc. — 5, prismatic calcified cartilage, etc. — 6, dentary, premaxillary, maxillary, lepidotrichia, swimbladder or lungs, etc. — 7, omegashaped palatoquadrate. — 8, endoskeleton of paired fins, articulated with a single bone to the girdles. — 9, folded teeth. — 10, posterior nostril very near the oral cavity boundary, etc. — 11, one single external nostril, polyplacodont teeth, choana.

B: The Upper Devonian geographical distribution of the first tetrapods implies a geographical connexion between Laurasia and Gondwana. This is illustrated by the palaeogeographical scheme used by Lelièvre (1984).

radiation des Actinoptérygiens, due surtout à l'apparition de nouvelles familles de Chondrostéens à l'Éotrias (fig. 13).

Signalons enfin que, parmi les gisements à poissons du Paléozoïque supérieur, deux des plus célèbres par l'abondance, la diversité et l'état de conservation des fossiles sont d'âge carbonifère : Bear Gulch (Namurien du Montana ; Janvier et Lund, 1985) dont l'assemblage, dominé par les Chondrichthyens, renferme aussi des Cœlacanthes, des Actinoptérygiens et *Hardistiella*, la plus ancienne lamproie ; Mazon Creek (Pennsylvanien de l'Illinois ; Nitecki, 1979) qui a livré, entre autres, deux lamproies, *Mayomyzon* et *Pipiscius*, ainsi qu'une possible myxine, *Gilpichthys*.

### CONCLUSIONS

Plusieurs des résultats qui avaient été acquis à la suite des expéditions paléontologiques d'entre les deux guerres (telles que les expéditions à la voile vers le Spitsberg) ont été remis en question ces dernières années. Il se confirme que les premiers Craniotes sont ordoviciens et peut-être cambriens. Leur répartition englobait au moins les deux Amériques et l'Australie.

Les "Agnathes" représentent un groupe plus varié qu'on ne le pensait, avec la découverte des Galéaspides de Chine. Au sein de ce regroupement paraphylétique, ce sont les Ostéostracés ("Céphalaspides") qui sont les plus proches parents des Gnathostomes. Parmi ceux-ci, les groupes "Elasmobranchiomorphes" et "Crossoptérygiens" éclatent alors que les Ostéolépiiformes semblent demeurer les meilleurs candidats à l'ascendance des Tétrapodes. Globalement, la répartition géographique de tous ces taxons pose des problèmes d'interprétation actuellement non résolus. Quelques auteurs contemporains favorisent des reconstitutions mondiales où la Pangée (Laurasie + Gondwanie) est beaucoup plus compacte que sur les modèles tirés des données paléomagnétiques. Les schémas de relations de parenté des Vertébrés entre eux sont censés vérifier les reconstitutions paléogéographiques mais il serait souhaitable que des analyses du même ordre proviennent des Invertébrés et des Plantes afin de confronter le maximum de tests paléontologiques.

*Remerciements.* — La rédaction de ce texte a bénéficié des remarques critiques de C. Comble-Despaquis, S. Crasquin (Villeneuve d'Ascq) et H. Lelièvre (Paris). La dactylographie du texte a été assurée par R. Netter (Villeneuve d'Ascq).

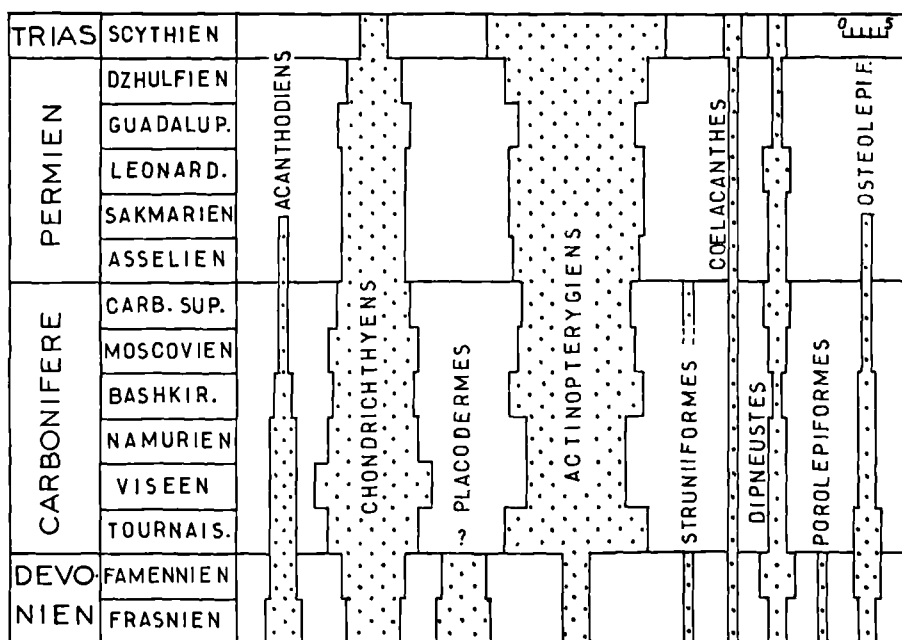


Fig. 13. — Abondance relative des principaux groupes de poissons au Paléozoïque supérieur d'après la répartition stratigraphique des taxons supragénériques (familles ou ordres) donnée in Andrews et al. (1967 ; légèrement modifié). On notera que la principale coupure est la limite Dévonien/Carbonifère.

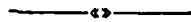
Fig. 13. — Relative abundance of the main Upper Palaeozoic fish groups, deduced from the stratigraphical record of suprageneric taxa (families and orders), after Andrews et al. (1967). Note that the most important extinction event occurred at the Devonian/Carboniferous boundary.

BIBLIOGRAPHIE

- 1) ALDRIDGE R.J., BRIGGS D.E.G., CLARKSON E.N.K., SMITH M.P. (1986). — The affinities of conodonts - new evidence from the Carboniferous of Edinburgh, Scotland. *Lethaia*, 19, (4), p. 279-291.
- 2) ANDREWS S.M., GARDINER B.G., MILES R.S. and PATTERSON C. (1967). — Pisces. In *The Fossil Record*, part. II. A Symposium with documentation... Geol. Soc. London Publ., chap. 26, p. 637-683.
- 3) BENGTON S. (1977). — Early Cambrian button-shaped phosphatic microfossils from the Siberian Platform. *Palaeontology*, 20, (4), p. 751-762.
- 4) BLANK R.G. (1979). — Applications of probabilistic biostratigraphy to chronostratigraphy. *Jl. Geol.*, 87, (6), p. 647-670.
- 5) BLIECK A. (1982a). — Les grandes lignes de la biogéographie des Hétérostracés du Silurien supérieur - Dévonien inférieur dans le domaine nord-atlantique. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 38, p. 283-316.
- 6) BLIECK A. (1982b). — Les Hétérostracés (Vertébrés, Agnathes) du Silurien-Dévonien du Continent nord-atlantique, d'après l'étude des faunes du Dévonien inférieur du Spitsberg et du Silurien supérieur - Dévonien inférieur d'Europe occidentale et de Podolie (Ukraine) : Systématique - Répartition - Paléomilieu. Thèse Doct. Etat Univ. P. et M. Curie (Paris VI). 3 vol. (texte + fig.). (ronéotypé).
- 7) BLIECK A. (1984). — Les Hétérostracés Ptéraspidiformes, Agnathes du Silurien-Dévonien du Continent nord-atlantique et des blocs avoisinants : révision systématique, phylogénie, biostratigraphie, biogéographie. *Cah. Paléont.*, CNRS édit., 200 p., 31 fig., 1 dépl. h-t.
- 8) BOCKELIE T. and FORTEY R.A. (1976). — An early Ordovician vertebrate. *Nature*, 260, (5546), p. 36-38, 3 fig.
- 9) BOURDIER F. (1959). — Quelques aperçus sur la paléontologie évolutive en France avant Darwin. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 7, (1), p. 881-896.
- 10) BRIGGS D.E.G., CLARKSON E.N.K. and ALDRIDGE R.J. (1983). — The conodont animal. *Lethaia*, 16, p. 1-14.
- 11) BRITISH MUSEUM (NATURAL HISTORY) ed. (1979). — Dinosaurs and their living relatives. Brit. Mus. (Nat. Hist.) and Cambridge Univ. Press Publ., 72 p.
- 12) BRUNDIN L. (1968). — Application of phylogenetic principles in systematics and evolutionary theory. In Ørvig T. ed., *Current Problems of Lower Vertebrate Phylogeny*, Nobel Symposium, 4, p. 473-495.
- 13) CAREY S.W. (1976). — The expanding Earth. *Developments in Geotectonics* 10, Elsevier Publ., 488 p.
- 14) CHALINE J. ed. (1983). — Modalités, rythmes et mécanismes de l'évolution biologique : gradualisme phylétique ou équilibre ponctué ? Coll. Intern. CNRS n° 330 (Dijon, Mai 1982). CNRS édit., 337 p.
- 15) CHANG Mee-Mann and YU Xiaobo (1984). — Structure and phylogenetic significance of *Diablichthys speratus* gen. et sp. nov., a new dipnoan-like form from the Lower Devonian of Eastern Yunnan, China. In Intern. Symp. Evol. Biogeogr. Early Vertebr., (Sydney-Canberra, Feb. 1983). *Pr. Linn. Soc. NSW*, 107, (3), p. 171-184.
- 16) COCKS L.R.M. ed. (1981). — The evolving earth (chance, change, challenge). Brit. Mus. (Nat. Hist.) and Cambridge Univ. Press, 264 p.
- 17) CRAWFORD A.R. (1982). — The Pangaeon paradox : where is it ? *Jl. Petrol. Geol.*, 5 (2), p. 149-160.
- 18) CUBITT J.M. and REYMENT R.A. eds. (1982). — Quantitative Stratigraphic Correlation. J. Wiley and Sons Publ., 301 p.
- 19) DUPUIS C. (1979). — Permanence et actualité de la systématique : La "Systématique phylogénétique" de W. Hennig (historique, discussion, choix de références). *Cahiers des Naturalistes, Bull. Natural. Paris.*, N.S., 34, (1978), 1, 69 p.
- 20) ELLIOTT D.K. (1984). — A new subfamily of the Pteraspidae (Agnatha, Heterostraci) from the Upper Silurian and Lower Devonian of Arctic Canada. *Palaeontology*, 27, (1), p. 169-197.
- 21) FLÜGEL H.W. (1984). — A. Wegener - O. Ampferer - R. Schwiner : the first chapter of the "New Global Tectonic". *Earth Sci. History*, 3, (2), p. 178-186.
- 22) FOREY P.L. ed. (1981). — The evolving biosphere (chance, change, challenge). Brit. Mus. (Nat. Hist.) and Cambridge Univ. Press, 311 p.
- 23) FOREY P.L. (1984a). — L'origine des Tétrapodes. *La Recherche*, 154, p. 476-487.
- 24) FOREY P.L. (1984b). — Yet more reflections on agnathan-gnathostome relationships. In Forey P.L. and Thomson K., eds. *Essays presented to Dr Bobb Schaeffer. Jl. Vert. Paleont.*, 4, (3), p. 330-343.
- 25) GAGNIER P.Y., BLIECK A.R.M. and RODRIGO G. (1986). — First Ordovician vertebrate from South America. *Geobios*, 19 (5), p. 629-634.
- 26) GEDIK I. (1977). — Orta Toroslar'da Konodont biyostratigrafisi. (Conodont biostratigraphy in the Middle Taurus). *Türk Jeol. Kurumu Bül.*, 20 (1), p. 35-48. (En turc ; résumé en anglais).
- 27) GINSBURG L. (1979). — Les Vertébrés, ces méconnus. 600 millions d'années d'évolution, des origines à l'homme. Hachette édit., 222 p.
- 28) GOUJET D. et MATILE L., eds (1978). — Systématique cladistique. Quelques textes fondamentaux. Glossaire. Entretiens du Muséum (Paris, Nov. 1978), Labor. Entom. Mus. nation. Hist. Nat. édit., 106 p.
- 29) GUEX J. (1977). — Une nouvelle méthode d'analyse biochronologique. Note préliminaire. *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.*, 73 (351), p. 309-322.

- 30) GUEX J. et DAVAUD E. (1982). — Recherche automatique des associations unitaires en biochronologie. *Bull. Soc. Vaud. Sc. Nat.*, 76 (361), p. 53-69.
- 31) HECKEL P.H. and WITZKE B.J. (1979). — Devonian World palaeogeography determined from distribution of carbonates and related lithic palaeoclimatic indicators. In House M.R., Scrutton C.T. and Basset M.G. eds., *The Devonian System* (P.A.D.S., Bristol, 1978). *Spec. Pap. Palaeont.*, 23, p. 99-123.
- 32) HEDBERG H.D. ed. (1979). — Guide stratigraphique international. Classification, terminologie et règles de procédure. Doin édit., 233 p.
- 33) HUBLIN J.J. (1981). — L'évolution de la vie. Coll. Les Grands Sujets, Editions du Chat Perché-Flammarion, 318 p.
- 34) JANVIER P. (1978). — La fin des poissons cuirassés géants. *La Recherche*, 86, p. 175-177.
- 35) JANVIER P. (1981). — The phylogeny of the craniata, with particular reference to the significance of fossil "agnathans". *Jl. Vertebr. Paleont.*, 1 (2), p. 121-159.
- 36) JANVIER P. (1982). — La biogéographie phylogénétique et la vicariance : historique et perspectives d'avenir. In Biogéographie et Tectonique des plaques. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (7), 24. (5-6), p. 917-925.
- 37) JANVIER P. (1983). — "L'animal-conodonte" enfin démasqué ? *La Recherche*, 145, p. 832-833.
- 38) JANVIER P. (1986). — Les nouvelles conceptions de la Phylogénie et de la Classification des "Agnathes" et des Sarcoptérygiens. In François Y. et Bauchot M.L. eds., *Les Poissons : classification et phylogénèse*, Table Ronde Soc. Zool. Fr. (Paris, Fév. 1986), 1<sup>re</sup> partie. *Océanis*, 12 (3), p. 123-138.
- 39) JANVIER P. et LUND R. (1985). — Ces étranges bêtes du Montana. *La Recherche*, 162, p. 98-100.
- 40) JARVIK E. (1980). — Basic structure and evolution of vertebrates. Academic Press, 2 vol. : 575 p. et 337 p.
- 41) JEFFERIES R.P.S. (1979). — The origin of Chordates - a methodological essay. In House M.R. ed., *The origin of major invertebrate groups*. System. Assoc. Spec. Vol., 12 (17), p. 443-477.
- 42) LAZARUS D.B. and PROTHERO D.R. (1984). — The role of stratigraphic and morphologic data in phylogeny. *Jl. Paleont.*, 58, p. 163-172.
- 43) LEBEDEV O.A. (1984). — Pervaja nachodka devonskogo četveronogogo pozvonočnogo v SSSR. (Première découverte d'un Vertébré Tétrapode dévonien en URSS). *Doklady Akad. Nauk. SSSR*, 278 (6), p. 1470-1473 (en russe).
- 44) LELIEVRE H. (1984). — *Antineosteus lehmani* n. gen., n. sp., nouveau Brachythoraci du Dévonien inférieur du Maroc présaharien. Remarques sur la paléobiogéographie des Homostéides de l'Emsien. *Ann. Paléont. (Vert.-Invert.)*, 70, (2), p. 115-158.
- 45) LELIEVRE H. (1986). — Les Placodermes et leurs relations phylétiques avec les autres Gnathostomes. In François Y. et Bauchot M.L. eds., *Les Poissons : classification et phylogénèse*. Table Ronde Soc. Zool. Fr., (Paris, Fév. 1986), 1<sup>re</sup> partie. *Océanis*, 12 (3), p. 139-149.
- 46) LEONARDI G. (1983). — *Notopus petri* nov. gen., nov. sp., une empreinte d'Amphibien du Dévonien du Paraná (Brésil). *Géobios*, 16 (2), p. 233-239.
- 47) LIVERMORE R.A., SMITH A.G. and BRIDEN J.C. (1985). — Palaeomagnetic constraints on the distribution of continents in the late Silurian and early Devonian. In Chaloner W.G. and Lawson J. D. eds., *Evolution and environment in the late Silurian and early Devonian* (Roy. Soc. Discussion Meeting, London, May 1984). *Phil. Tr. Roy. Soc. London*, B 309 (1138), p. 29-56.
- 48) MATILE L. et GOUJET D. (1981). — Biogéographie et cladisme : principes et méthodes illustrés par l'exemple des Diptères Keroplatidae. *Mém. Soc. Biogéogr.*, 3<sup>e</sup> sér., II, p. 63-82.
- 49) MARSS T. and EJNASTO R. (1978). — Raspredelenie vertebrat v raznofacial'nykh otloženiach silura severnoj pribaltiki. (Distribution of vertebrates in deposits of various facies in the North Baltic Silurian). *Eesti NSV Tead. Akad. Toimet.*, 27. *K. Geol.*, 1, p. 16-22 (en russe, résumé anglais).
- 50) MOY-THOMAS J.A. and MILES R.S. (1971). — Palaeozoic Fishes. Chapman and Hall Publ., 259 p.
- 51) NITECKI M.H. ed. (1979). — Mazon Creek Fossils. Academic Press, 581 p.
- 52) REPETSKI J.E. (1978). — A Fish from the Upper Cambrian of North America. *Science*, 200, p. 529-531.
- 53) RICHARDSON J.B. and MCGREGOR D.C. (1986). — Silurian and Devonian spore zones of the Old Red Sandstone continent and adjacent regions. *Geol. Surv. Can., Bull.*, 364, 79 p., 7 fig. 21 pl.
- 54) RICKARD M.J. and BELBIN L. (1980). — A new continental assembly for Pangaea. In Banks M.R. and Green D.H. eds., *Orthodoxy and creativity at the frontiers of Earth Sciences* (Carey Symposium ; Hobart, Febr. 1977). *Tectonophysics*, 63, (1-4), p. 1-12.
- 55) RITCHIE A. and GILBERT-TOMLINSON J. (1977). — First Ordovician vertebrates from the Southern Hemisphere. *Alcheringa*, 1, p. 351-368.
- 56) ROSEN D.E., FOREY P.L., GARDINER B.G. and PATTERSON C. (1981). — Lungfishes, Tetrapods, Paleontology and Plesiomorphy. *Bull. Amer. Mus. Nat. Hist.*, 167 (4), p. 159-276.
- 57) SCHULTZE H.P. (1977). — The origin of the tetrapod limb within the Rhipidistian Fishes. In Hecht M.K., Goody P.C. and Hecht B.M. eds., *Major Patterns in Vertebrate Evolution*, p. 541-544.
- 58) SCHULTZE H.P. (1981). — Henning und der Ursprung der Tetrapoda. *Paläont. Z.*, 55 (1), p. 71-86.
- 59) SCOTese C.R., BAMBACH R.K., BARTON C., VAN DER VOO R. and ZIEGLER A.M. (1979). — Paleozoic base maps. *Jl. Geol.*, 87 (3), p. 217-277.
- 60) SCOTese C.R., VAN DER VOO R. and BARRETT S.F. (1985). — Silurian and Devonian base maps. In Chaloner W.G. and Lawson J.D. eds., *Evolution and Environment in the late Silurian and early Devonian* (Roy. Soc. Discussion Meeting, London, May 1984). *Phil. Tr. Roy. Soc. London*, B 309 (1138), p. 57-77.

- 61) SMITH A.G., HURLEY A.M. and BRIDEN J.C. (1981). — Phanerozoic paleocontinental world maps. Cambridge Earth Sci. Ser., Cambridge Univ. Press, 102 p., 88 cartes.
- 62) SPJELDNAES N. (1979). — The palaeoecology of the Ordovician Harding Sandstone (Colorado, USA). *Palaeogeog., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, 26, p. 317-347.
- 63) SPJELDNAES N. (1982). — Palaeoecology of *Ichthyostega* and the origin of the terrestrial vertebrates. In Gallitelli E.M. ed., 1st Intern. Meeting Palaeontology. Essential of Historical Geology (Venice, 1981), Mucchi publ., p. 323-343.
- 64) STEEMANS Ph. (1986). — Palynostratigraphie de l'Eodévonien. Thèse Doct. Sci. (Sci. géol. minéral.), Univ. Liège, 2 vol. : 408 p. + 47 pl. (ronéotypé).
- 65) TARLING D.H. (1985). — Siluro-Devonian palaeogeographies based on palaeomagnetic observations. In Chaloner W.G. and Lawson J.D. eds., Evolution and Environment in the late Silurian and early Devonian (Roy. Soc. Discussion Meeting. London, May 1984). *Phil. Tr. Roy. Soc. London*, B 309 (1138), p. 81-83.
- 66) THOMSON K.S. (1980). — The ecology of Devonian lobe-finned fishes. In Panchen A.L. ed., The terrestrial environment and the origin of land vertebrates. System. Assoc., Spec. Vol. 15, p. 187-222.
- 67) TILLIER S. et CUIF J.P. (1986). — L'animal-conodonte est-il un Mollusque Aplacophore? *C.R. Ac. Sc.*, 303, II, (7), p. 627-632.
- 68) TILLIER S. et JANVIER P. (1986). — Le retour de l'animal-conodonte. *La Recherche*, 183, p. 1574-1575.
- 69) UBAGHS G. (1981). — Réflexions sur la nature et la fonction de l'appendice articulé des Carpoïdes Stylophora (Echinodermata). *Ann. Paléont. (Invertébrés)*, 67, (1), p. 33-48.
- 70) WARREN J.W. and WAKEFIELD N.A. (1972). — Trackways of Tetrapod Vertebrates from the Upper Devonian of Victoria, Australia. *Nature*, 238, (5365), p. 469-470.
- 71) YOUNG G.C. (1981). — Biogeography of Devonian vertebrates. *Alcheringa*, 5, p. 225-243.



ANNALES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

---

TABLE DES MATIÈRES

Tome CVI - 1986

---

**Activité de la Société**

Assemblée générale : 15 janvier 1986, p. 3.

Assemblées ordinaires : 15 janvier 1986, p. 4 ; 5 février 1986, p. 4 ; 5 mars, p. 6 ; 7 mai 1986, p. 241 ;  
4 juin 1986, p. 241 ; 8 octobre 1986, p. 242 ; 3 décembre 1986, p. 243.

Séance spécialisée consacrée au *Paléozoïque supérieur continental*, les 5 et 6 novembre 1986, p. 75-76.

Elections pour le renouvellement du Conseil, p. 3.

Elections de nouveaux membres, p. 4, 6, 241, 243.

Allocutions des Présidents, p. 4, 6.

Notice nécrologique : *L'œuvre de J.F. Raoult*, par F. Thiébault, p. 245.

**Géologie appliquée - Hydrogéologie**

E. CARLIER. — Régime d'écoulement en milieu fissuré : détermination par traçage, p. 299.

E. CARLIER. — Equivalence entre milieu poreux anisotrope et milieu à fractures et conduits cylindriques orthogonaux, p. 303.

N. CRAMPON. — Les eaux souterraines : Un problème d'échelle. L'hydrogéologie : Une science d'interface, p. 309.

**Géologie stratigraphique et structurale**

A. BOUROZ. — A propos des failles de Ferques et du Haut-Banc : réflexions sur quelques interprétations récentes de la tectonique du Carbonifère du Boulonnais, p. 25.

E. MERCIER. — Nouvelle interprétation d'une brèche protérozoïque des montagnes Ogilvie (Cordillère canadienne - Yukon), p. 65.

E. PAPROTH. — L'Europe, de la fin du Westphalien à l'Autunien, p. 77.

J. BEAUCHAMP, J. DOUBINGER, C. ROY-DIAS et J.P. SAGON. — L'Autuno-Stéphanien de la région de Marrakech (Maroc). Implications paléobotaniques et paléoclimatiques. Comparaisons avec les régions limitrophes, p. 145.

C. LUCAS. — Fossés stéphano-permiens des Pyrénées : dynamique sédimentaire, p. 163.

- P. BOURGES, J.P. ROLANDO et P. SOUQUET. — Le Permien de la partie occidentale du Déroit de Rodez (France) : systèmes de dépôt, dynamique du bassin, p. 173.
- N. TOUTIN-MORIN. — Les bassins permien provençaux, témoins de l'orogénèse hercynienne et de l'ouverture de la Téthys dans le Sud-Est de la France, p. 183.
- D. BONIJOLY et C. CASTAING. — Ouverture et évolution structurale de quelques bassins houillers de directions orthogonales, dans le Massif Central français, p. 189.
- A. PINTO DE JESUS. — Bassin Houiller du Douro (NW du Portugal). Stratigraphie et contrôle tectonique de la genèse et de l'évolution, p. 209.
- L. COUREL. — Les bassins houillers du Paléozoïque supérieur continental du Massif Central français ; dynamique sédimentaire, p. 229.

### Géophysique

- J. BOUCKAERT et M. DUSAR. — Arguments géophysiques pour une tectonique cassante en Campine (Belgique), active au Paléozoïque supérieur et réactivée depuis le Jurassique supérieur, p. 201.

### Magmatisme

- H. OUAZZANI, G. BANZET et H. LAPIERRE. — Le volcanisme post-collision stéphanien à anté " permotriasique " des Alpes françaises, p. 219.
- C. LEFEVRE. — Modèles de chambres magmatiques. De la théorie à la pratique et de l'expérience à la réalité, p. 323.

### Paléontologie

- R. COQUEL et F. PEREZ-LORENTE. — Le Carbonifère de la Sierra de la Demanda (Espagne). Apports de la palynologie, p. 17.
- F. LAURENTIAUX-VIEIRA et D. LAURENTIAUX. — Un remarquable Archimylacride du Westphalien inférieur belge. Ancienneté du dimorphisme sexuel des Blattes, p. 37.
- J.P. LAVEINE (avec la collaboration technique de A.M. CANDILIER). — La flore du bassin houiller du Nord de la France. Biostratigraphie et méthodologie, p. 87.
- D. PRIMEY et G. FARJANEL. — Mise en évidence de manifestations de flores à caractères autuniens dans les dépôts stéphanien de la région de Lucenay-lès-Aix (bassin de Decize, Nièvre, France), p. 95.
- S. BECKARY. — Association floristique et faunique rencontrée dans les coal balls de la mine Rosario (NW de l'Espagne, Namurien C - Westphalien A). Interprétation paléoécologique, p. 111.
- J. DOUBINGER, B. ODIN et G. CONRAD. — Les associations sporopolliniques du Permien continental du bassin de Lodève (Hérault, France) : caractérisation de l'Autunien supérieur, du " Saxonien " et du Thuringien, p. 103.
- S. CRASQUIN et F. LETHIERS. — Les Ostracodes continentaux du Silésien : bilan général et perspectives en France, p. 117.
- D. HEYLER. — Vertébrés des bassins stéphanien et autuniens du Massif Central français ; paléobiogéographie et paléoenvironnements, p. 123.
- D. MERCIER, I. COJAN, B. BEAUDOIN et E. SALINAS ZUNIGA. — Apport des associations floristiques dans la caractérisation des paléoenvironnements sédimentaires (Bassin du Nord - Pas-de-Calais), p. 155.



- M. BELLES-ISLES, D. VEZINA et A. VADET. — Nouveau matériel de Placodermes (Ptyctodontidae) du Dévonien du Boulonnais (France), p. 275.
- J. PONCET. — Paléobiogéographie du genre *Vermiporella* (algue verte calcaire) à l'Ordovicien moyen et supérieur, p. 279.
- A. BLIECK. — Problèmes actuels en paléontologie des Vertébrés paléozoïques, p. 343.

#### Sédimentologie

- A. PREAT et F. BOULVAIN. — Les calcaires laminaires du Givétien inférieur du Bassin de Dinant : témoins paléogéographiques et paléoclimatiques, p. 49.
- B.M. BESLY. — Sedimentological evidence for Carboniferous and Early Permian palaeoclimates of Europe, p. 131.
- A. PREAT, G. CEULENEER et F. BOULVAIN. — Etude sédimentologique des calcaires du Givétien inférieur d'Olloy-sur-Viroin (Bord sud du Bassin de Dinant, Belgique), p. 251.
- T. HOLTZAPFFEL. — Assemblages argileux de nodules phosphatés et de leur matrice dans les argiles albiennes du Boulonnais (France), p. 267.
- J.F. DECONINCK. — Minéraux argileux des faciès purbeckiens : Jura suisse et français, Dorset (Angleterre) et Boulonnais (France), p. 285.

#### Protérozoïque

- E. MERCIER. — Nouvelle interprétation d'une brèche protérozoïque des montagnes Ogilvie (Cordillère canadienne - Yukon), p. 65.

#### Paléozoïque

- R. COQUEL et F. PEREZ-LORENTE. — Le Carbonifère de la Sierra de la Demanda (Espagne). Apports de la palynologie, p. 17.
- A. BOUROZ. — A propos des failles de Ferques et du Haut-Banc : réflexions sur quelques interprétations récentes de la tectonique du Carbonifère du Boulonnais, p. 25.
- F. LAURENTIAUX-VIEIRA et D. LAURENTIAUX. — Un remarquable Archimylacride du Westphalien inférieur belge. Ancienneté du dimorphisme sexuel des Blattes, p. 37.
- A. PREAT et F. BOULVAIN. — Les calcaires laminaires du Givétien inférieur du Bassin de Dinant : témoins paléogéographiques et paléoclimatiques, p. 49.
- E. PAPROTH. — L'Europe, de la fin du Westphalien à l'Autunien, p. 77.
- J.P. LAVEINE (avec la collaboration technique de A.M. CANDILIER). — La flore du bassin houiller du Nord de la France. Biostratigraphie et méthodologie, p. 87.
- D. PRIMEY et G. FARJANEL. — Mise en évidence de manifestations de flores à caractères autuniens dans les dépôts stéphanien de la région de Lucenay-lès-Aix (bassin de Decize, Nièvre, France), p. 95.
- J. DOUBINGER, B. ODIN et G. CONRAD. — Les associations sporopolliniques du Permien continental du bassin de Lodève (Hérault, France) : caractérisation de l'Autunien supérieur, du "Saxonien" et du Thuringien, p. 103.
- S. BECKARY. — Association floristique et faunique rencontrée dans les coal balls de la mine Rosario (NW de l'Espagne, Namurien C - Westphalien A). Interprétation paléoécologique, p. 111.

- Š. CRAŠQUIN et F. LETHIERS. — Les Ostracodes continentaux du Silésien : bilan général et perspectives en France, p. 117.
- D. HEYLER. — Vertébrés des bassins stéphaniens et autuniens du Massif Central français ; paléobiogéographie et paléoenvironnements, p. 123.
- B.M. BESLY. — Sedimentological evidence for Carboniferous and Early Permian palaeoclimates of Europe, p. 131.
- J. BEAUCHAMP, J. DOUBINGER, C. ROY-DIAS et J.P. SAGON. — L'Autuno-Stéphanien de la région de Marrakech (Maroc). Implications paléobotaniques et paléoclimatiques. Comparaisons avec les régions limitrophes, p. 145.
- D. MERCIER, I. COJAN, B. BEAUDOIN et E. SALINAS ZUNIGA. — Apport des associations floristiques dans la caractérisation des paléoenvironnements sédimentaires (Bassin du Nord - Pas-de-Calais), p. 155.
- C. LUCAS. — Fossés stéphano-permiens des Pyrénées : dynamique sédimentaire, p. 163.
- P. BOURGES, J.P. ROLANDO et P. SOUQUET. — Le Permien de la partie occidentale du Déroit de Rodez (France) : systèmes de dépôt, dynamique du bassin, p. 173.
- N. TOUTIN-MORIN. — Les bassins permien provençaux, témoins de l'orogénèse hercynienne et de l'ouverture de la Téthys dans le Sud-Est de la France, p. 183.
- D. BONIJOLY et C. CASTAING. — Ouverture et évolution structurale de quelques bassins houillers de directions orthogonales, dans le Massif Central français, p. 189.
- J. BOUCKAERT et M. DUSAR. — Arguments géophysiques pour une tectonique cassante en Campine (Belgique), active au Paléozoïque supérieur et réactivée depuis le Jurassique supérieur, p. 201.
- A. PINTO DE JESUS. — Bassin Houiller du Douro (NW du Portugal). Stratigraphie et contrôle tectonique de la genèse et de l'évolution, p. 209.
- H. OUAZZANI, G. BANZET et H. LAPIERRE. — Le volcanisme post-collision stéphanien à anté " permotriasique " des Alpes françaises, p. 219.
- L. COUREL. — Les bassins houillers du Paléozoïque supérieur continental du Massif Central français : dynamique sédimentaire, p. 229.
- A. PREAT, G. CEULENEER et F. BOULVAIN. — Etude sédimentologique des calcaires du Givétien inférieur d'Olloy-sur-Viroin (Bord sud du Bassin de Dinant, Belgique), p. 251.
- M. BELLES-ISLES, D. VEZINA et A. VADET. — Nouveau matériel de Placodermes (Ptyctodontidae) du Dévonien du Boulonnais (France), p. 275.
- J. PONCET. — Paléobiogéographie du genre *Vermiporella* (algue verte calcaire) à l'Ordovicien moyen et supérieur, p. 279.
- A. BLIECK. — Problèmes actuels en paléontologie des Vertébrés paléozoïques, p. 343.

### Mésozoïque

- T. HOLTZAPFFEL. — Assemblages argileux de nodules phosphatés et de leur matrice dans les argiles albiennes du Boulonnais (France), p. 267.
- J.F. DECONINCK. — Minéraux argileux des faciès purbeckiens : Jura suisse et français, Dorset (Angleterre) et Boulonnais (France), p. 285.



ANNALES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

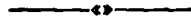
---

TABLE DES PLANCHES

Tome CVI - 1986

---

- Pl. I. — Palynologie du Carbonifère de la Sierra de la Demanda (Espagne) (note de R. COQUEL *et al.*, p. 23).
- Pl. II. — *Miroblatta costalis* n. gen. n. sp., Archimylacride du Westphalien inférieur belge (note de F. LAURENTIAUX-VIEIRA et D. LAURENTIAUX, p. 47).
- Pl. III et IV. — Associations sporopolliniques du Permien continental du bassin de Lodève (note de J. DOUBINGER *et al.*, p. 109).
- Pl. V. — Flore et faune de coal balls de la mine Rosario (Namurien-Westphalien d'Espagne du NW) (note de S. BECKARY *et al.*, p. 116).
- Pl. VI. — Ostracodes continentaux du Silésien en France (note de S. CRASQUIN et F. LETHIERS, p. 122).
- Pl. VII. — Placodermes du Dévonien du Boulonnais (note de M. BELLES-ISLES *et al.*, p. 276).



---

TABLE ALPHABÉTIQUE DES AUTEURS

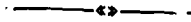
Tome CVI - 1986

---

- G. BANZET. — Voir H. OUAZZANI *et al.*, p. 219.
- J. BEAUCHAMP, J. DOUBINGER, C. ROY-DIAS et J.P. SAGON. — L'Autuno-Stéphanien de la région de Marrakech (Maroc). Implications paléobotaniques et paléoclimatiques. Comparaisons avec les régions limitrophes, p. 145.
- B. BEAUDOIN. — Voir D. MERCIER *et al.*, p. 155.
- S. BECKARY. — Association floristique et faunique rencontrée dans les coal balls de la mine Rosario (NW de l'Espagne, Namurien C - Westphalien A). Interprétation paléoécologique, p. 111.
- M. BELLES-ISLES, D. VEZINA et A. VADET. — Nouveau matériel de Placodermes (Ptyctodontidae) du Dévonien du Boulonnais (France), p. 275.
- B.M. BESLY. — Sedimentological evidence for Carboniferous and Early Permian palaeoclimates of Europe, p. 131.
- A. BLIECK. — Problèmes actuels en paléontologie des Vertébrés paléozoïques, p. 343.
- D. BONIJOLY et C. CASTAING. — Ouverture et évolution structurale de quelques bassins houillers de directions orthogonales, dans le Massif Central français, p. 189.
- J. BOUCKAERT et M. DUSAR. — Arguments géophysiques pour une tectonique cassante en Campine (Belgique), active au Paléozoïque supérieur et réactivée depuis le Jurassique supérieur, p. 201.
- F. BOULVAIN. — Voir A. PREAT et F. BOULVAIN, p. 49.
- F. BOULVAIN. — Voir A. PREAT *et al.*, p. 251.
- P. BOURGES, J.P. ROLANDO et P. SOUQUET. — Le Permien de la partie occidentale du Déroit de Rodez (France) : systèmes de dépôt, dynamique du bassin, p. 173.
- A. BOUROZ. — A propos des failles de Ferques et du Haut-Banc : réflexions sur quelques interprétations récentes de la tectonique du Carbonifère du Boulonnais, p. 25.
- E. CARLIER. — Régime d'écoulement en milieu fissuré : détermination par traçage, p. 299.
- E. CARLIER. — Equivalence entre milieu poreux anisotrope et milieu à fractures et conduits cylindriques orthogonaux, p. 303.
- C. CASTAING. — Voir D. BONIJOLY et C. CASTAING, p. 189.
- G. CEULENEER. — Voir A. PREAT *et al.*, p. 251.
- I. COJAN. — Voir D. MERCIER *et al.*, p. 155.
- G. CONRAD. — Voir J. DOUBINGER *et al.*, p. 103.
- R. COQUEL et F. PEREZ-LORENTE. — Le Carbonifère de la Sierra de la Demanda (Espagne). Apports de la palynologie, p. 17.

- L. COUREL. — Les bassins houillers du Paléozoïque supérieur continental du Massif Central français : dynamique sédimentaire, p. 229.
- N. CRAMPON. — Les eaux souterraines : Un problème d'échelle. L'hydrogéologie : Une science d'interface, p. 309.
- S. CRASQUIN et F. LETHIERS. — Les Ostracodes continentaux du Silésien : bilan général et perspectives en France, p. 117.
- J.F. DECONINCK. — Minéraux argileux des faciès purbeckiens : Jura suisse et français, Dorset (Angleterre) et Boulonnais (France), p. 285.
- J. DOUBINGER, B. ODIN et G. CONRAD. — Les associations sporopolliniques du Permien continental du bassin de Lodève (Hérault, France) : caractérisation de l'Autunien supérieur, du "Saxonien" et du Thuringien, p. 103.
- J. DOUBINGER. — Voir J. BEAUCHAMP *et al.*, p. 145.
- M. DUSAR. — Voir J. BOUCKAERT et M. DUSAR, p. 201.
- G. FARJANEL. — Voir D. PRIMEY et G. FARJANEL, p. 95.
- D. HEYLER. — Vertébrés des bassins stéphanien et autuniens du Massif Central français ; paléobiogéographie et paléoenvironnements, p. 123.
- T. HOLTZAPFFEL. — Assemblages argileux de nodules phosphatés et de leur matrice dans les argiles albiennes du Boulonnais (France), p. 267.
- H. LAPIERRE. — Voir H. OUZZANI *et al.*, p. 219.
- D. LAURENTIAUX. — Voir F. LAURENTIAUX-VIEIRA et D. LAURENTIAUX, p. 37.
- F. LAURENTIAUX-VIEIRA et D. LAURENTIAUX. — Un remarquable Archimylacride du Westphalien inférieur belge. Ancienneté du dimorphisme sexuel des Blattes, p. 37.
- J.P. LAVEINE (avec la collaboration technique de A.M. CANDILIER). — La flore du bassin houiller du Nord de la France. Biostratigraphie et méthodologie, p. 87.
- C. LEFEVRE. — Modèles de chambres magmatiques. De la théorie à la pratique et de l'expérience à la réalité, p. 323.
- F. LETHIERS. — Voir S. CRASQUIN et F. LETHIERS, p. 117.
- C. LUCAS. — Fossés stéphanien-permiens des Pyrénées : dynamique sédimentaire, p. 163.
- D. MERCIER, I. COJAN, B. BEAUDOIN et E. SALINAS ZUNIGA. — Apport des associations floristiques dans la caractérisation des paléoenvironnements sédimentaires (Bassin du Nord - Pas-de-Calais), p. 155.
- E. MERCIER. — Nouvelle interprétation d'une brèche protérozoïque des montagnes Ogilvie (Cordillère canadienne - Yukon), p. 65.
- B. ODIN. — Voir J. DOUBINGER *et al.*, p. 103.
- H. OUZZANI, G. BANZET et H. LAPIERRE. — Le volcanisme post-collision stéphanien à anté "permotriasique" des Alpes françaises, p. 219.
- E. PAPROTH. — L'Europe, de la fin du Westphalien à l'Autunien, p. 77.
- F. PEREZ-LORENTE. — Voir R. COQUEL et F. PEREZ-LORENTE, p. 17.
- A. PINTO DE JESUS. — Bassin Houiller du Douro (NW du Portugal). Stratigraphie et contrôle tectonique de la genèse et de l'évolution, p. 209.
- J. PONCET. — Paléobiogéographie du genre *Vermiporella* (algue verte calcaire) à l'Ordovicien moyen et supérieur, p. 279.
- A. PREAT et F. BOULVAIN. — Les calcaires laminaires du Givétien inférieur du Bassin de Dinant : témoins paléogéographiques et paléoclimatiques, p. 49.

- A. PREAT, G. CEULENEER et F. BOULVAIN. — Etude sédimentologique des calcaires du Givétien inférieur d'Olloy-sur-Viroin (Bord sud du Bassin de Dinant, Belgique), p. 251.
- D. PRIMEY et G. FARJANEL. — Mise en évidence de manifestations de flores à caractères autuniens dans les dépôts stéphanien de la région de Lucenay-lès-Aix (bassin de Decize, Nièvre, France), p. 95.
- J.P. ROLANDO. — Voir P. BOURGES *et al.*, p. 173.
- C. ROY-DIAS. — Voir J. BEAUCHAMP *et al.*, p. 145.
- J.P. SAGON. — Voir J. BEAUCHAMP *et al.*, p. 145.
- E. SALINAS-ZUNIGA. — Voir D. MERCIER *et al.* p. 155.
- P. SOUQUET. — Voir P. BOURGES *et al.*, p. 173.
- N. TOUTIN-MORIN. — Les bassins permien provençaux, témoins de l'orogénèse hercynienne et de l'ouverture de la Téthys dans le Sud-Est de la France, p. 183.
- A. VADET. — Voir M. BELLES-ISLES *et al.*, p. 275.
- A. VEZINA. — Voir M. BELLES-ISLES *et al.*, p. 275.









Sont en vente au Siège de la Société :

#### MEMOIRES(\*)

<b>Tome I</b> , n° 1. — Ch. BARROIS, <i>Recherches sur le terrain crétacé de l'Angleterre et de l'Irlande</i> , 1876, 232 p..	336,00 F
n° 2. — P. FRAZER, <i>Géologie de la partie Sud-Est de la Pensylvanie</i> , 1882, 178 p. ....	252,00 F
n° 3. — R. ZEILLER, <i>Mémoire sur la flore houillère des Asturies</i> , 1882, 24 p. ....	36,00 F
<b>Tome IV</b> , n° 1. — J. GOSSELET, <i>Etudes sur les variations du Spirifer Verneullii</i> , 1894, 63 p., 7 pl. ....	90,00 F
<b>Tome VI</b> , n° 1. — P. BERTRAND, <i>Etude du stipe de l'Adelophyton jutieri</i> , B. Renault, 1907, 38 p., 4 pl. ....	85,00 F
n° 2. — J. GOSSELET et al., <i>Faune silurodévonienne de Liévin</i> , 1912-1920. Fasc. 2 .....	336,00 F
n° 3. — V. COMMONT, <i>Saint-Acheul et Montières: Notes de Géologie, de Paléontologie et de Préhistoire</i> , 1909, 68 p., 3 pl. ....	156,00 F
<b>Tome VII</b> , n° 1. — P. BERTRAND, <i>Etude des Stipes d'Asterochloena laxa</i> , Stenzel, 1911, 72 p., 6 pl. ....	102,00 F
<b>Tome VIII</b> , n° 2. — Ed. LEROUX, <i>Le tunnel de l'Ave Maria</i> , 1929, 50 p., 5 pl. ....	120,00 F
<b>Tome IX</b> , n° 1. — G. DUBAR, <i>Etude sur le Lias des Pyrénées françaises</i> , 1925, 332 p., 7 pl. ....	432,00 F
n° 2. — G. FOURNIER et al., <i>Poissons élastobranches de Denée</i> , 1926, 23 p., 6 pl. ....	96,00 F
<b>Tome X</b> , n° 2. — J. LAVERDIERE, <i>Terrains paléozoïques des Pyrénées occidentales</i> , 1931, 132 p., 8 pl. ....	180,00 F
<b>Tome XII</b> . — D. LEMAITRE, <i>Faune des Calcaires dévoniens du Bassin d'Ancenis</i> , 1934, 268 p., 18 pl. ....	336,00 F
<b>Tome XIII</b> . — P. BRICHE et al., <i>Flore infraliasique du Boulonnais</i> , 1963, 145 p., 11 pl. ....	252,00 F
<b>Tome XIV</b> . — G. WATERLOT, <i>Les Gigantostacés du Siluro-Dévonien de Liévin</i> , 1966, 23 p., 5 pl. ....	84,00 F
<b>Tome XV</b> . — J. MANIA, <i>Gestion des Systèmes aquifères. Applications au Nord de la France</i> , 1978, 228 p. ....	180,00 F
<b>Tome XVI</b> . — A. BOUROZ et al., <i>Essai de synthèse des données acquises dans la genèse et l'évolution des marqueurs pétrographiques dans les bassins houillers</i> , 1983, 118 p., 10 pl. ....	250,00 F

#### FASCICULES SPECIAUX(\*)

«Géologie du Nord de la France.» (T. LXXXIX, fasc. 1).....	85,00 F
«Centenaire de la S.G.N.» (T. XC, fasc. 4) .....	100,00 F
«Rupture des roches et massifs rocheux» (T. XCV, fasc. 3) .....	70,00 F
«Données nouvelles sur le Paléozoïque de l'Europe occidentale» (T. XCVI, fasc. 4 et T. XCVII, fasc. 1).....	200,00 F
«Apports récents à la Géologie du Gondwana» (T. XCVII, fasc. 4) .....	150,00 F
«Géologie de l'Europe, du Précambrien aux bassins sédimentaires post-hercyniens» (T. XCIX, fasc. 1) .....	150,00 F
«Géologie appliquée aux problèmes d'énergie et de matières premières» (T. CII, fasc. 2) .....	150,00 F
«Tectonique cassante en distension et coulissement» (T. CIII, fasc. 2-3).....	250,00 F
«Aspects de la Géologie de l'Ardenne, hommage au Professeur Beugnies» (T. CV, fasc. 2) .....	125,00 F
«Paléozoïque supérieur continental» (T. CVI, fasc. 2) .....	300,00 F

#### PUBLICATIONS(\*)

Publication N° 1. — J. CHOROWICZ, <i>Etude géologique des Dinarides le long de la transversale Split-Karlovac (Yougoslavie)</i> .....	130,00 F
Publication N° 2. — J. CHARVET, <i>Essai sur un orogène alpin: Géologie des Dinarides au niveau de la transversale de Sarajevo (Yougoslavie)</i> .....	150,00 F
Publication N° 3. — J. ANGELIER, <i>Néotectonique de l'arc égéen</i> .....	140,00 F
Publication N° 4. — J.J. FLEURY, <i>Les zones de Gavrovo-Tripolitza et du Pinde-Olonos (Grèce continentale et Péloponnèse du Nord). Evolution d'une plate-forme et d'un bassin dans leur cadre alpin</i> .....	175,00 F
Publication N° 5. — M. COUSIN, <i>Les rapports Alpes-Dinarides. Les confins de l'Italie et de la Yougoslavie</i> .....	175,00 F
Publication N° 6. — F. THIEBAULT, <i>L'évolution géodynamique des Hellénides externes en Péloponnèse méridional</i> .....	185,00 F
Publication N° 7. — P. DEWEVER, <i>Radiolaires du Trias et du Lias de la Téthys</i> .....	180,00 F
Publication N° 8. — J. FERRIERE, <i>Paléogéographie et tectoniques superposées dans les Hellénides internes: les massifs de l'Othrys et du Pélion (Grèce continentale)</i> .....	185,00 F
Publication N° 9. — H. MAILLOT, <i>Les Paléoenvironnements de l'Atlantique sud: Apport de la géochimie sédimentaire</i> .....	130,00 F
Publication N° 10. — Cl. BROUSMICHE, <i>Les Fougères sphénoptériennes du Bassin Houiller Sarro-Lorrain</i> .....	200,00 F
Publication N° 11. — B. MISTIAEN, <i>Phénomènes récifaux dans le Dévonien d'Afghanistan (Montagnes Centrales). Analyse et systématique des Stromatopores</i> .....	200,00 F
Publication N° 12. — T. HOLTZAPFFEL, <i>Les minéraux argileux. Préparation, analyse diffractométrique et détermination</i> ..... T.T.C.	90,00 F
Publication N° 13. — J.L. MANSY, <i>Géologie de la Chaîne d'Omineca des Rocheuses aux plateaux intérieurs (Cordillère Canadienne). Evolution depuis le Précambrien</i> .....	200,00 F
Publication N° 14. — C. BECK, <i>Géologie de la Chaîne Caraïbe au méridien de Caracas (Venezuela)</i> .....	125,00 F

Les membres abonnés bénéficient d'une réduction de 20 % sur un exemplaire de chacune de ces publications.  
Les prix sont augmentés des frais de port et d'emballage quand les volumes ne sont pas pris directement au dépôt.

(\*) Tous les prix sont indiqués hors taxe, sauf indication contraire (T.T.C.).

# SOMMAIRE

Tome CVI

(1986)

4<sup>me</sup> trimestre

	pages
N. CRAMPON. — Les eaux souterraines : Un problème d'échelle. L'hydrogéologie : Une science d'interface .....	309
C. LEFEVRE. — Modèles de chambres magmatiques. De la théorie à l'expérience et de l'expérience à la réalité : schémas et fonctionnement des réservoirs ; conséquences volcanologiques et pétrologiques .....	323
A. BLIECK. — Problèmes actuels en paléontologie des Vertébrés paléozoïques .....	343

© 1988 Société Géologique du Nord Editeur, Lille

Toute reproduction, même partielle, de cet ouvrage est interdite. Une copie ou reproduction par quelque procédé que ce soit, photographie, microfilm, bande magnétique, disque ou autre, constitue une contrefaçon passible des peines prévues par la loi du 11 mars 1957 sur la protection des droits d'auteur.

Imprimé en France (Printed in France)