

ISSN 0567-6576

Bulletin des Académie & Société Lorraines des Sciences

ANCIENNE
SOCIÉTÉ DES SCIENCES DE NANCY

fondée en 1828

Etablissement d'utilité publique
(Décret ministériel du 26 avril 1968)

BULLETIN TRIMESTRIEL

TOME 34 - NUMERO 3
1995

AVIS AUX MEMBRES

COTISATIONS.

Les Membres des Académie & Société Lorraines des Sciences acquittent une cotisation annuelle. Celle-ci est fixée à 110 francs en 1994.

Le paiement de la cotisation donne droit au service du bulletin, et permet de bénéficier de ventes à tarif réduit. La remise accordée aux Membres des Académie & Société Lorraines des Sciences ne peut atteindre ou dépasser 50 % du prix de vente de la publication. Son taux, proposé par le Conseil, est ratifié en simple Assemblée générale annuelle (Statuts, Titre I, Art. III).

Tout règlement est à adresser, de préférence par chèque, à l'ordre du Trésorier des Académie & Société Lorraines des Sciences, Biologie végétale 1^{er} Cycle, BP 239, 54506 Vandœuvre Cédex.

Chèque bancaire ou chèque postal au compte 45 24 V Nancy.

BULLETIN.

Pour la vente exceptionnelle de numéros isolés ou anciens s'adresser au Trésorier ou au Secrétaire Général, 8, rue des Magnolias, Parc Jolimont-Trinité, 54220 Malzéville.

Afin d'assurer une parution régulière du Bulletin, les Membres ayant présenté une communication sont invités à remettre leur manuscrit en fin de séance au Secrétaire Général. A défaut, ces manuscrits seront envoyés à son adresse ci-dessus, dans les quinze jours suivant la séance. Passé ce délai, la publication sera ajournée à une date indéterminée.

Les corrections d'auteurs sur épreuves devront obligatoirement être faites dans les huit jours suivant la réception des épreuves, faute de quoi ces corrections seront faites d'office par la Rédaction, sans qu'il soit admis de réclamations. Les demandes de tirés à part non formulées en tête des manuscrits ne pourront être satisfaites ultérieurement.

Les clichés sont à la charge des auteurs.

Dans la mesure des possibilités financières, 20 tirés à part gratuits sont offerts aux auteurs. Des exemplaires payants supplémentaires peuvent être obtenus. S'adresser au Trésorier ou au Secrétaire Général.

Il n'y a pas de limitation de longueur ni du nombre des publications. Toutefois, les publications des travaux originaux restent subordonnées aux possibilités financières de la Société. En dernier lieu, le Conseil est souverain.

Il est précisé une nouvelle fois, en outre, que les observations, théories, opinions, émises par les auteurs dans les publications de l'Académie & Société Lorraines des Sciences, n'impliquent pas l'approbation de notre Groupement. La responsabilité des écrits incombe à leurs auteurs seuls.

Toute publication en tant que « note » doit être présentée par un membre titulaire de l'Académie. Il n'y a pas de « comité » de lecture pour l'agrément d'impression.

BULLETIN

des ACADEMIE & SOCIETE
LORRAINES DES SCIENCES

(Ancienne Société des Sciences de Nancy)
(Fondée en 1828)

BIBLIOTHEQUE INTERUNIVERSITAIRE DE NANCY
SECTION SCIENCES

Rue du Jardin Botanique
54600 VILLERS-LES-NANCY
FRANCE

S O M M A I R E

Pages

HEUSSER S., EL AMRANI S., COLIN S., KELLER J.M., DAUÇA M. L'ontogenèse des amphibiens: Importance de la métamorphose. Étude comparative avec les autres vertébrés.....	99
GIROD J.P., MARTIN G., HEIT B., BREMONT J. Modélisation architecturale du système visuel biologique pour la segmentation d'image.....	115
DESCHAMPS M. Le magmatisme du Champ du Feu (Vosges septentrionales).....	131
BOULAY J. Les plantes carnivores, essais de micropropagation.	151
ALAIN E., BEGIN D., FURDIN G., et MARECHE J. Fr. Influence de la présence d'un composé graphite-FeCl ₃ lors de la carbonisation d'un brai de houille	161
Procès-verbal: séance du 11 mai 1995.....	181

**L'ONTOGENESE INTESTINALE DES AMPHIBIENS:
IMPORTANCE DE LA METAMORPHOSE.
ETUDE COMPARATIVE AVEC LES AUTRES
VERTEBRES.**

Sandrine HEUSSER*, Souad EL AMRANI, Suzanne COLIN*,
Jean-Marie KELLER*, Michel DAUÇA***

*Laboratoire de Biologie Cellulaire du Développement, Université Henri Poincaré - Nancy I,
Faculté des Sciences, B.P. 239, 54 506 Vandœuvre-lès-Nancy cedex.

**Département de Biologie, Université Hassan II, Faculté des Sciences Casablanca II, Maroc

Note acceptée pour publication le 10 octobre 1994.

RESUME

Le développement post-embryonnaire des Amphibiens Anoures est caractérisé par la métamorphose, qui coïncide avec un changement de milieu et de régime alimentaire. Les nombreuses transformations que subit l'organisme concernent en particulier l'intestin : il se raccourcit, se dés spiralise et sa paroi est profondément remaniée (plissement, renouvellement épithélial).

A l'échelle cellulaire, parallèlement à la substitution épithéliale, se produit une modification quantitative et qualitative de l'expression du génome des épithéliocytes, sous contrôle des hormones thyroïdiennes. Les protéines des microvillosités sont affectées, qu'elles soient membranaires (par exemple les enzymes de la bordure en brosse) ou composantes du cytosquelette (par exemple les protéines de structure telles la villine).

Une maturation intestinale tardive est également remarquée chez les autres Vertébrés, lors de la métamorphose chez les Cyclostomes, à l'éclosion chez les Oiseaux ou à la naissance et au sevrage chez les Mammifères.

Mots clés : ontogenèse, intestin, Amphibiens, métamorphose.

Communication transmise à la séance du 11 mai 1995.

**Amphibian intestinal ontogenesis : importance of metamorphosis. -
Comparison with other Vertebrates.**

SUMMARY

Metamorphosis is a characteristic event of Anuran Amphibian post-embryonic development. It is related to a change in environment and in feeding behaviour.

Among many transformations, intestine undergoes remarkable modifications : it shortens, loses its coiled shape and a folded secondary epithelium is put in place of larval epithelial cell lining.

In parallel with epithelium substitution, at cellular level, quantitative and qualitative changes in genes expression are noted, triggered by thyroid hormones. Microvillar proteins are concerned as membrane-bound enzymes or structural cytoskeleton components (for example, villin).

Such a late intestinal maturation is also observed in other Vertebrates, especially during Agnathans metamorphosis, Birds hatching or Mammalians birth and weaning.

Key words : ontogenesis, intestine, Amphibian, metamorphosis.

INTRODUCTION

Par ses événements anatomiques, histologiques et biochimiques, la métamorphose des Amphibiens représente un événement post-embryonnaire particulièrement propice pour étudier chez les Vertébrés les changements qui accompagnent la sortie de l'eau et le passage au milieu terrestre dans cet Embranchement (disparition des fentes branchiales et des branchies, remaniements des arcs aortiques, etc...). De tels changements évoquent indéniablement l'histoire évolutive de l'animal.

La métamorphose résulte du passage d'un programme d'expression génique à un autre. La mise en jeu de certains gènes et la répression d'autres gènes est responsable de phénomènes de mort, de prolifération et de différenciation cellulaires observés au cours de cette période critique. Les transformations subies par l'intestin des larves d'Anoures au climax de la métamorphose illustrent parfaitement cette notion. Par ailleurs, le changement de milieu qui survient généralement à la métamorphose des Amphibiens, aboutit à une modification de la contrainte écologique. L'existence de facteurs sélectifs différents, avant et après la métamorphose, a accentué l'autonomie des développements larvaire et juvénile (voire adulte) et conduit à l'apparition de formes plus dissemblables, mieux adaptées à leurs milieux respectifs. Les changements de mode alimentaire au cours du développement post-embryonnaire des Anoures en constituent un exemple caractéristique. En effet, la plupart de leurs larves sont planctivores, herbivores ou détritivores alors que les Anoures métamorphosés sont carnivores ou insectivores. Ce changement de régime alimentaire est rendu possible par des modifications de l'équipement enzymatique intestinal que nous décrirons.

REMANIEMENTS HISTOLOGIQUES ET CYTOLOGIQUES

1. Aspects ontogéniques

De toutes les régions qui sont remaniées dans le tractus digestif des larves d'Anoures lors de la métamorphose, la région intestinale est celle dont le

remodelage est le plus spectaculaire. L'intestin se dés spiralise et subit un raccourcissement considérable. L'épithélium intestinal larvaire ou primaire (Figures 1a et 1b) dégénère complètement et est remplacé par une assise de néoformation ou épithélium secondaire (Figures 1e et 1f).

Les phénomènes lytiques (Figure 1d) survenant dans l'intestin ont été signalés par maints auteurs (MORSE, 1918 ; KUNTZ, 1924 ; JANES, 1934 ; JOLY, 1937 ; BONNEVILLE, 1963). L'apparition et l'évolution des lysosomes associés à l'altération des épithéliocytes intestinaux larvaires ont été décrites par HOURDRY (1969a, 1971a). Les activités de plusieurs hydrolases lysosomiques ont été visualisées et dosées dans l'épithélium intestinal primaire. Ces activités enzymatiques s'élèvent fortement dans ce tissu au paroxysme de la métamorphose, en relation avec l'apparition de nombreux lysosomes (HOURDRY, 1971b, 1971c, 1974).

Le développement de l'épithélium intestinal secondaire est assuré au climax par la prolifération intense de cellules à caractères indifférenciés, localisées sous l'épithélium primaire (Figure 1c). Cette prolifération a été observée par BONNEVILLE (1963) et HOURDRY (1969b) et analysée à l'aide des méthodes autoradiographiques (DOURNON et CHIBON, 1974 ; Mc AVOY et DIXON, 1977 ; DAUÇA et HOURDRY, 1978). La "poussée mitotique" qui affecte les cellules-souches intestinales conduit à l'apparition d'une assise épithéliale transitoirement pluristratifiée. Cette formation devient unistratifiée quand les replis intestinaux se mettent en place. Au fur et à mesure que ces replis augmentent en nombre et en taille, la prolifération cellulaire devient de plus en plus confinée à leur base. Par leur position, ces îlots prolifératifs représentent une forme primitive de crypte intestinale (PATTEN, 1960). La différenciation des cellules-filles issues de la prolifération des cellules-souches engendre trois types cellulaires : les cellules muqueuses, les cellules entéro-endocrines et les cellules absorbantes. La durée de vie de ces cellules est en moyenne de seize jours.

2. Aspects phylogéniques

La remarquable plasticité et la capacité d'adaptation de l'intestin se retrouvent chez d'autres Vertébrés que les Amphibiens. La transformation de l'ammocète microphage et dulçaquicole en une lamproie ectoparasite et marine se traduit, au niveau de l'intestin, par le remplacement progressif des épithéliocytes (YOUSON, 1980 ; YOUSON et HORBERT, 1982) et par la mise en place de replis à disposition transversale (YOUSON et CONNELLY, 1978). Chez les Vertébrés supérieurs, la période de l'éclosion ou de la naissance marquée pour le nouvel individu par l'abandon du milieu amniotique, est précédée par d'importants remaniements intestinaux. La morphogenèse de l'intestin des Oiseaux conduit au début du développement embryonnaire à la mise en place de replis longitudinaux qui prendront peu à peu un aspect en zigzag. Peu avant l'éclosion, ces replis donnent naissance à de véritables villosités recouvertes par un épithélium unistratifié (GREY, 1972 ; LIM et LOW, 1977 ; BRYK *et al.*, 1979 ; CHAMBERS et GREY, 1979). Au cours de la période foetale, l'organogenèse de l'intestin des Mammifères engendre des pré-villosités. La prolifération des cellules épithéliales n'est pas encore confinée à des zones particulières. Après la naissance, l'activité mitotique des cellules-souches n'est plus observée qu'au fond des cryptes (HERMOS *et al.*, 1971). La durée de vie des épithéliocytes intestinaux des Mammifères est sensiblement inférieure à celle

des Amphibiens puisqu'elle est d'environ deux jours (CHENG et LEBLOND, 1974).

EXPRESSION DU GENOME DES EPITHELIOCYTES INTESTINAUX

1. Expression lors d'une métamorphose spontanée

Grâce à l'électrophorèse bidimensionnelle, technique qui permet d'évaluer les changements qualitatifs et quantitatifs survenant dans la synthèse des protéines, nous avons été en mesure de détecter les protéines dont l'expression persiste dans l'épithélium intestinal d'*Alytes obstetricans* (Laurenti) tout au long du développement larvaire, celles qui au contraire ne sont plus élaborées à la suite de la substitution épithéliale, ainsi que les protéines nouvelles spécifiques de l'épithélium intestinal secondaire (FIGIEL *et al.*, 1987). Cinq polypeptides dont les masses moléculaires relatives sont 41500, 45500, 51500, 55000 et 101000 sont spécifiques de l'épithélium intestinal larvaire (primaire). Réciproquement, les polypeptides de Mr : 58000, 61500, 63000, 63500, 66500 et 95500, ne sont synthétisés que par l'épithélium intestinal secondaire. Ces divers polypeptides ont probablement un rapport avec le régime alimentaire de ces animaux, en effet ils sont présents soit chez les larves herbivores, soit chez les juvéniles insectivores. Ces changements moléculaires intervenant au cours de la substitution de l'épithélium intestinal des Amphibiens sont à rapprocher de ceux observés dans l'intestin des Rongeurs au moment du sevrage (BAYLEY *et al.*, 1984 ; QUARONI et ISSELBACHER, 1985).

2. Contrôle par la triiodothyronine

La comparaison des répertoires des protéines néosynthétisées par l'épithélium intestinal d'une part des larves thyrostatiques d'*Alyte* traitées par le propylthiouracile et d'autre part par les têtards exposés à la triiodothyronine a permis de préciser les polypeptides dont la synthèse est contrôlée par l'hormone thyroïdienne (FIGIEL *et al.*, 1989). Onze polypeptides ont ainsi été détectés dont les polypeptides de masses moléculaires relatives 58000, 66500 et 95500 déjà cités.

Figure 1 : Remaniements histologiques et cytologiques de l'intestin d'*Alytes obstetricans* (Amphibien Anoure) lors de la métamorphose.

a, c et e : Coupes fines colorées à l'acide périodique-réactif de Schiff, observées au microscope optique.

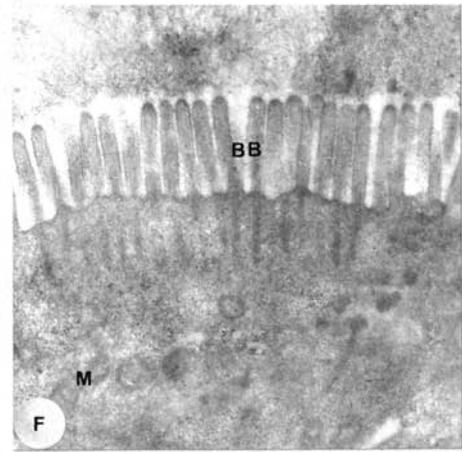
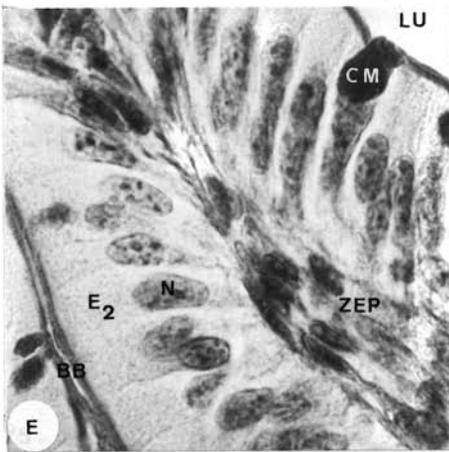
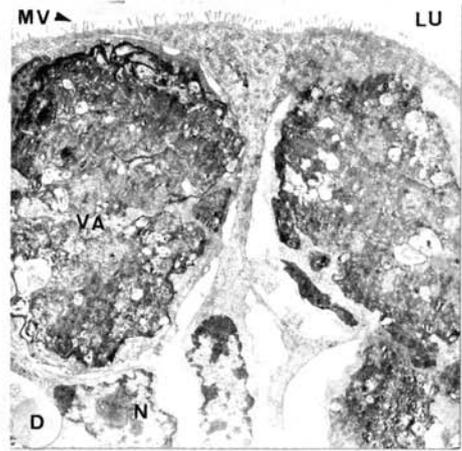
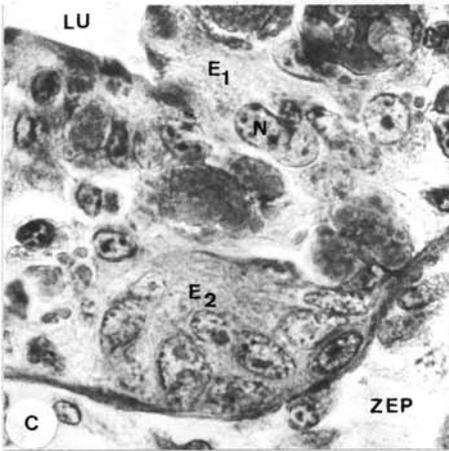
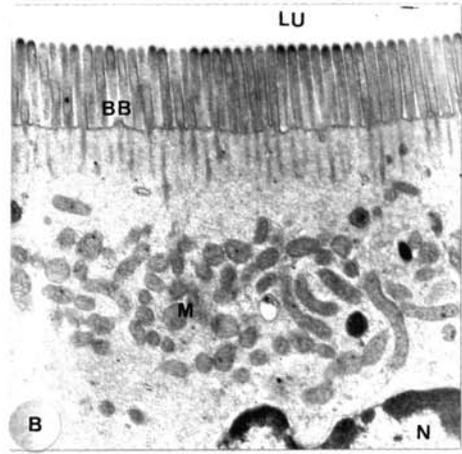
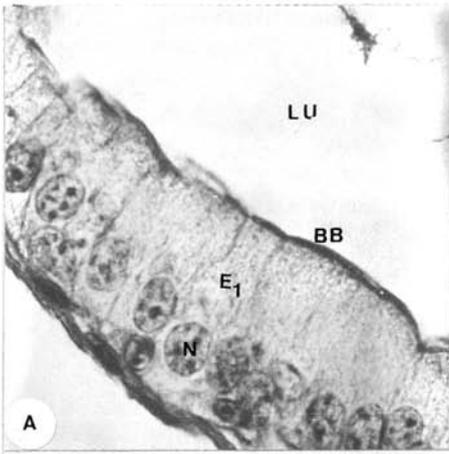
b, d et f : Coupes ultrafines, observées au microscope électronique à transmission.

a et b : Chez la larve, l'épithélium unistratifié constitue la plus grande partie de la paroi intestinale. Il se compose principalement d'entérocytes et de cellules muqueuses (a : x985, b : x13 000).

c et d : Lors du climax, l'épithélium larvaire subit une autolyse tandis qu'un épithélium secondaire se met en place à partir de cellules souches basales, organisées en îlots (c : x985, d : x4 800).

e et f : Chez le juvénile, l'épithélium secondaire, différencié, présente des replis. Il ne constitue plus que 50% de l'épaisseur de la paroi intestinale du fait du développement de la zone extra-épithéliale (e : x985, f : x21 000).

Légendes : BB : bordure en brosse ; CM : cellule à mucus ; E₁ : épithélium intestinal primaire ; E₂ : épithélium intestinal secondaire ; LU : lumière intestinale ; M : mitochondrie ; MV : microvillosité ; N : noyau ; VA : vacuole autolytique ; ZEP : zone extra-épithéliale.



PROTEINES DE LA MEMBRANE DES MICROVILLOSITES

1. Aspects ontogéniques

Les polypeptides des membranes des microvillosités préparées à partir de l'épithélium intestinal des larves et juvéniles d'*Alytes obstetricans* ont été discriminés par électrophorèses mono- et bidimensionnelles (DAUÇA *et al.*, 1981 ; FIGIEL *et al.*, 1987). Les changements de la composition polypeptidique des membranes microvillositaires, observés au cours de la métamorphose spontanée ont été comparés à ceux obtenus pendant le traitement à la triiodothyronine (DAUÇA *et al.*, 1980a ; FIGIEL et DAUÇA, 1990). Il ressort des résultats obtenus que quatre polypeptides dont ceux de Mr 41500 et 101000, ne sont détectés que dans les microvillosités intestinales larvaires. Six polypeptides dont deux déjà évoqués (Mr : 58000 et 95500) ne sont observés que dans les préparations des membranes microvillositaires des juvéniles issus d'une métamorphose naturelle ou induite.

Les activités de plusieurs glucosidases (maltase, tréhalase, glucoamylase) ainsi que celles de la phosphatase alcaline et de la γ -glutamyltransférase ont été détectées dans les préparations enrichies en microvillosités obtenues à partir de l'épithélium intestinal larvaire (DAUÇA *et al.*, 1979) et adulte (DAUÇA *et al.*, 1980b) des Amphibiens Anoures. Ces deux tissus sont par contre dépourvus de toute activité de β -galactosidase et saccharase (HOURDRY *et al.*, 1979). Le remplacement de l'épithélium intestinal au cours de la métamorphose spontanée est accompagné par une augmentation des activités spécifiques de l'ensemble des hydrolases détectées (HOURDRY *et al.*, 1979). Par ailleurs, la masse moléculaire relative de la phosphatase alcaline intestinale larvaire est inférieure à celle juvénile ou adulte (DAUÇA *et al.*, 1981).

2. Aspects phylogéniques

Dans l'intestin des Oiseaux, une augmentation importante des activités spécifiques de la maltase et de la phosphatase alcaline est constatée peu avant l'éclosion (MOOG, 1950 ; SIDONS, 1969). A la différence de l'intestin des Amphibiens, celui des Oiseaux possède une activité saccharasique et exprime à un très faible niveau une activité lactasique.

Figure 2 : Expression de la villine intestinale lors de la métamorphose d'*Alytes obstetricans*.

Etude par immunocytochimie indirecte avec révélation par la peroxydase.

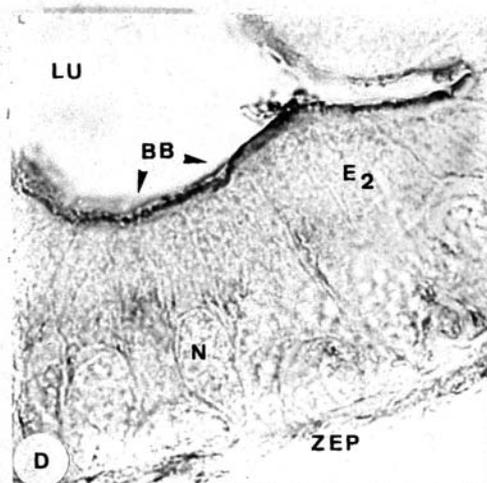
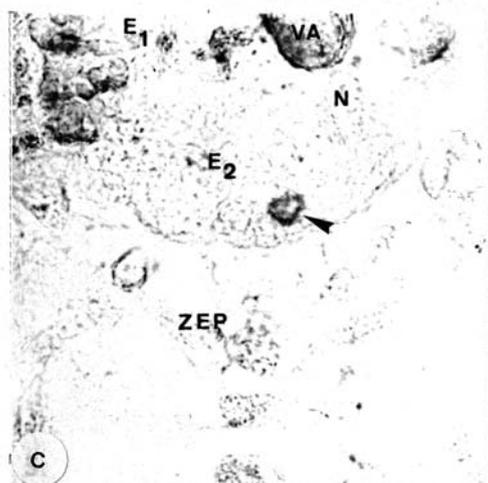
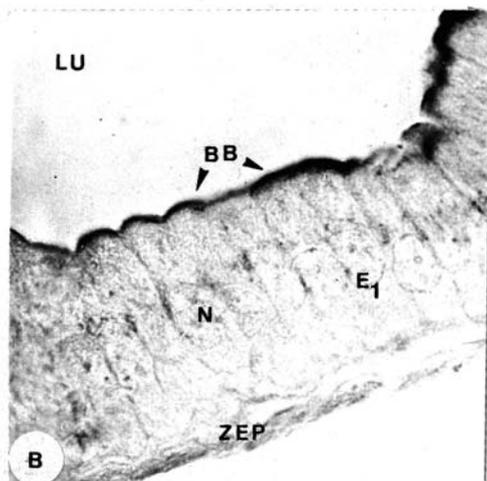
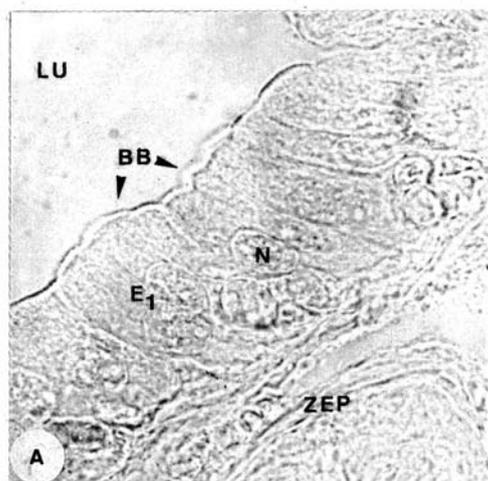
a. Témoin, dépourvu de marquage (x985).

b. Chez la larve, le marquage est localisé dans la bordure en brosse, à l'apex des entérocytes, et correspond à la villine en place dans les microvillosités (x985).

c. Lors du climax, de nombreuses vacuoles autolytiques apparaissent colorées du fait de la présence de peroxydase endogène. La bordure en brosse se désorganise et son marquage devient discontinu. Certaines cellules souches des îlots expriment la villine (flèche) alors qu'elles ne sont ni polarisées, ni différenciées (x985).

d. Chez le juvénile, le marquage concerne la bordure en brosse de l'épithélium secondaire bien différencié (x985).

Légendes : BB : bordure en brosse ; E₁ : épithélium intestinal primaire ; E₂ : épithélium intestinal secondaire ; LU : lumière intestinale ; N : noyau ; VA : vacuole autolytique ; ZEP : zone extra-épithéliale.



Le profil d'expression de la saccharase diffère sensiblement de celui de la maltase et de la phosphatase alcaline. En effet, l'activité spécifique de la saccharase augmente comme celle de la maltase entre le 15^e et le 17^e jour de développement *in ovo*, puis reste constante jusqu'au premier jour après éclosion. Ainsi la maturation biochimique de l'intestin des Oiseaux s'accomplit essentiellement lors de l'éclosion, c'est-à-dire à un moment où le poussin passe du milieu liquide amniotique au milieu terrestre (MOOG, 1950 ; SIDDONS, 1969 ; DAUTLICK et STRITTMATER, 1970 ; KEDINGER *et al.*, 1981). Ceci n'est pas sans rappeler la situation observée au climax de la métamorphose dans l'intestin des Amphibiens.

Par contre, chez les Rongeurs tels les rats et les souris pour lesquels la durée de gestation est courte, l'intestin est d'un point de vue biochimique immature à la naissance et durant les deux premières semaines post-natales. L'équipement enzymatique intestinal ne sera complet qu'à l'issue du sevrage. L'activité lactasique de l'intestin du rat devient détectable à partir du 18^e jour de gestation, culmine au moment de la naissance puis diminue à la fin de la 4^e semaine post-natale pour atteindre les valeurs rencontrées chez l'adulte (DOELL et KRETCHMER, 1962 ; SIMON-ASSMANN *et al.*, 1982). Au cours de la période péri-natale, l'augmentation de l'activité lactasique résulte d'un accroissement du taux d'ARNm (SEBASTIO *et al.*, 1989). Par contre, la diminution de l'activité lactasique observée à partir du sevrage n'est pas due à une baisse des ARNm car le taux de ces derniers reste constant (FREUND *et al.*, 1989) mais s'explique par des modifications post-traductionnelles de l'enzyme (NSI EMVO *et al.*, 1987). L'activité de la saccharase n'est pas détectée dans l'intestin des Rongeurs durant les deux premières semaines de vie post-natale. Elle apparaît lors du sevrage, augmente ensuite rapidement atteignant les valeurs observées chez l'adulte dès la 4^e semaine (DOELL et KRETCHMER, 1964 ; RUBINO *et al.*, 1964 ; REDDY et WOSTMANN, 1966). Cette augmentation post-natale de l'activité saccharasique repose sur une élévation concomitante du taux des ARNm correspondant dans les entérocytes (SEBASTIO *et al.*, 1986). Il est intéressant de noter que la conversion moléculaire des Amphibiens est aussi observée chez les Mammifères lors du sevrage (MIKI *et al.*, 1977 ; MULIVOR *et al.*, 1978 ; UEZATO *et al.*, 1981 ; TOJYO, 1984).

PROTEINES DU CYTOSQUELETTE DES MICROVILLOSITES

1. Aspects ontogéniques

Le cytosquelette des microvillosités entérocytaires est constitué de microfilaments d'actine (TILNEY et MOOSEKER, 1971). Sur toute leur longueur, les filaments d'actine sont liés à deux types principaux de protéines : la fimbrine et la villine. La fimbrine est une protéine ubiquitaire qui, dans des conditions ioniques particulières, permet le rassemblement des microfilaments d'actine F en une structure ordonnée et polarisée uniformément (GERKE et WEBER, 1983 ; MOOSEKER, 1985 ; MAROUX *et al.*, 1988). A la différence de la fimbrine, la villine n'est rencontrée que dans un nombre restreint de types cellulaires : entérocytes, cellules épithéliales des tubules proximaux du rein. Elle est également faiblement représentée dans les cellules des canalicules pancréatiques et hépatiques. Toutes ces cellules ont en commun le fait de

posséder une bordure en brosse différenciée ou d'avoir une origine identique à celle des entérocytes (BRETSCHER *et al.*, 1981 ; COUDRIER *et al.*, 1988).

Les études ultrastructurales menées au cours de la métamorphose des Amphibiens sur l'épithélium intestinal ont montré que l'édification du cytosquelette des microvillosités entérocytaires est un processus complexe et progressif qui implique des relations spatiotemporelles entre les vésicules cytoplasmiques, les structures filamenteuses et la membrane apicale (BONNEVILLE et WEINSTOCK, 1970). Plus récemment, des analyses effectuées par immunocytochimie (Figures 2a à 2d) et immunoréplique ont montré que la villine est un marqueur précoce de différenciation entérocytaire. En effet, cette protéine est exprimée dans les cellules-souches situées à la base de l'épithélium intestinal larvaire (Figure 2c) avant même qu'elles ne soient différenciées en entérocytes secondaires (FIGIEL *et al.*, 1987).

2. Aspects phylogéniques

La comparaison des séquences amino-acides de la villine de poulet (BAZARI *et al.*, 1988) et celle humaine (ARPIN *et al.*, 1988) avec les séquences primaires de trois protéines appartenant aussi à la famille des protéines capables de se fixer sur l'actine à savoir la gelsoline produite par les macrophages des Vertébrés, la fragmine rencontrée chez le plasmode *Physarum*, et la séverine de l'amibe *Dictyostelium* (MATSUDAIRA et JANMEY, 1988 ; VANDEKERCKHOVE, 1990) a révélé l'existence d'homologies structurales (Figure 3). En effet, toutes ces protéines possèdent en commun un domaine amino-acide constitué de quatre motifs dont trois sont fortement conservés au cours de l'évolution. Ce domaine est dupliqué pour la villine et la gelsoline. Un troisième domaine situé à l'extrémité COOH-terminale n'existe que dans la structure de la villine et ne présente pas d'homologie avec les deux autres domaines. Toutes ces données indiquent que ces diverses protéines ont évolué à partir d'un gène ancestral commun par duplication de ce gène dans le cas de la gelsoline, par duplication et addition d'une séquence spécifique dans le cas de la villine.

La purification de la villine intestinale des Amphibiens a fourni des informations complémentaires concernant l'évolution de cette protéine chez les Vertébrés (HEUSSER *et al.*, 1992). La masse moléculaire relative de cette protéine diminue de façon systématique, passant de 105000 chez les Amphibiens (HEUSSER *et al.*, 1992) à 95000 chez les Oiseaux (BRETSCHER et WEBER, 1980 ; MATSUDAIRA et BURGESS, 1982) à 92-93000 chez les Mammifères (GERKE et WEBER, 1983 ; ALICEA et MOOSEKER, 1988 ; ARPIN *et al.*, 1988). Sachant que la masse moléculaire relative de la villine des Echinodermes est de 110 000 (WANG et BONDER, 1991), il ressort de l'ensemble de ces données que la taille de la protéine a diminué au cours de l'évolution des animaux. Les modifications structurales ne semblent pas avoir porté sur l'extrémité N-terminale de cette protéine (Figure 3), car le séquençage peptidique de l'extrémité NH₂ de la villine des Amphibiens n'a révélé que des différences mineures avec la séquence correspondante de la villine des Oiseaux et des Mammifères (HEUSSER *et al.*, 1992). Il est plus vraisemblable que les modifications affectant la structure de cette protéine ont concerné l'extrémité carboxylique. En effet, l'anticorps monoclonal BDID₂C₃ dirigé contre l'extrémité COOH de la villine des mammifères ne reconnaît pas la villine des Amphibiens (HEUSSER *et al.*, 1992).

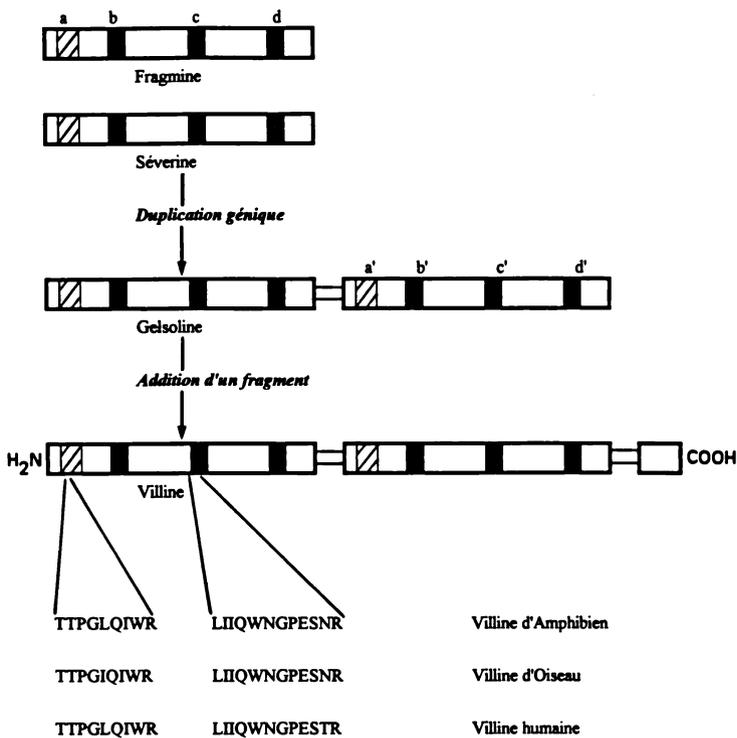


Figure 3 : Phylogenèse de la villine

La villine présente des homologies structurales avec la gelsoline, la fragmine et la séverine. Sur la base de ces ressemblances, l'histoire évolutive de la protéine a été retracée (duplication génique puis addition d'un fragment). La comparaison des séquences N-terminales des villines des différentes classes de Vertébrés ne montre que des divergences mineures.

Légende : a et a' : domaines hydrophiles ; b, b', c, c', d et d' : domaines hydrophobes.

CONCLUSIONS

Les transformations anatomiques, histologiques et biochimiques qui surviennent dans le tractus intestinal des Amphibiens au climax de la métamorphose, ne sont pas strictement associées au changement d'habitat. De telles modifications sont aussi observées dans l'intestin des larves de *Xenopus* lors du développement post-embryonnaire. Chez cet Amphibien, les juvéniles et les adultes demeurent comme les têtards en milieu aquatique. Du reste, la dépendance des Amphibiens vis-à-vis de ce milieu demeure très importante. L'affranchissement n'est véritablement acquis que chez les Vertébrés amniotes.

Les transformations intestinales lors de la métamorphose des Amphibiens sont le prélude du changement de régime alimentaire, permettant le passage d'un régime microphage ou herbivore à une régime carnivore plus adapté aux besoins des juvéniles et adultes. Ces modifications à caractère adaptatif mettent en jeu l'activité et/ou la répression de certains gènes conduisant non seulement à une architecture particulière de l'intestin et tout particulièrement de l'épithélium luminal mais aussi à la mise en place d'un équipement enzymatique spécialisé.

REFERENCES

- ALICEA, H.A., MOOSEKER, M.S. (1988). - Characterization of villin from the intestinal brush border of the rat and comparative analysis with avian villin. *Cell. Motil. Cytoskel.*, **9**, 60-72.
- ARPIN, M., PRINGAULT, E., FINIDORI, J., GARCIA, A., JELTSCH, J.M., VANDEKERCKHOVE, J., LOUVARD, D. (1988). - Sequence of human villin : A large duplicated domain homologous with other actin-severing proteins and a unique small carboxy-terminal related to villin specificity. *J. Cell. Biol.*, **107**, 1759-1766.
- BAYLEY, D.S., COOK, A., Mc ALLISTER, G., MOSS, M., MIAN, N. (1984). Structural and biochemical differentiation of the mammalian small intestine during foetal development. *J. Cell. Sci.*, **72**, 195-212.
- BAZARI, W.L., MATSUDAIRA, P., WALLEK, M., SMEAL, T., JAKES, R., AHMED, Y. (1988). - Villin sequence and peptide map identify six homologous domains. *Proc. Natl. Acad. Sci., USA*, **14**, 4986-4990.
- BONNEVILLE, M.A. (1963). - Fine structural changes in the intestinal epithelium of the bullfrog during metamorphosis. *J. Cell. Biol.*, **18**, 579-597.
- BONNEVILLE, M.A., WEINSTOCK, M. (1970). - Brush border development in the intestinal absorptive cells of *Xenopus* during metamorphosis. *J. Cell. Biol.*, **44**, 151-171.
- BRETSCHER, A., WEBER, K. (1980). - Villin is a major protein of the microvillus cytoskeleton which binds both G- and F-actin in a calcium dependent manner. *Cell*, **20**, 839-847.
- BRETSCHER, A., OSBORN, M., WEHLAND, J., WEBER, K. (1981) - Villin associates with specific microfilamentous structures as seen by immunofluorescence microscopy on tissue sections and cells microinjected with villin. *Exp. Cell. Res.*, **135**, 213-219.
- BRYK, S.G., PACINI, P., MARCHESI, L. (1979). - La superficie interna dell'intestino tenue di embrione di pollo al microscopio elettronico a scansione. *Boll. Soc. It. Biol. Sper.*, **55**, 236-240.
- CHAMBERS, C., GREY, D.G. (1979). - Development of the structural components of the brush border in absorptive cells of the chick intestine. *Cell. Tissue Res.*, **204**, 387-405.

- CHENG, H., LEBLOND, C.P. (1974) - Origin, differentiation and renewal of the four main epithelial cell types in the mouse small intestine. V. Unitarian theory of the origin of the four epithelial cell types. *Am. J. Anat.*, **141**, 537-562.
- COUDRIER, E., KERJASCHKI, D., LOUVARD, D. (1988). - Cytoskeleton organization and submembranous interactions in intestinal and renal brush borders. *Kidney International*, **34**, 309-320.
- DAUÇA, M., HOURDRY, J. (1978). - Analyse quantitative des remaniements intestinaux et évolution de la synthèse de l'ADN. Etude chez les larves d'*Alytes obstetricans* et de *Discoglossus pictus* (Amphibiens Anoures) en métamorphose spontanée. *Biol. Cell.*, **31**, 277-286.
- DAUÇA, M., HOURDRY, J., HUGON, J.S., MENARD, D. (1979). - Amphibian intestinal brush border membranes. I. Isolation from *Rana catesbeiana* tadpole. *Comp. Biochem. Physiol.*, **64B**, 155-159.
- DAUÇA, M., HOURDRY, J., HUGON, J.S., MENARD, D. (1980a). - Amphibian intestinal brush border enzymes during thyroxine-induced metamorphosis. A biochemical and cytochemical study. *Histochemistry*, **70**, 33-42.
- DAUÇA, M., HOURDRY, J., HUGON, J.S., MENARD, D. (1980b). - Amphibian intestinal brush border membranes. II. Isolation from *Rana catesbeiana* adult. *Comp. Biochem. Physiol.*, **66B**, 111-115.
- DAUÇA, M., HOURDRY, J., HUGON, J.S., MENARD, D. (1981). - Amphibian intestinal brush border membranes. III. Comparison during metamorphosis of the protein, glycoprotein and enzyme patterns after gel electrophoretic separation of SDS-solubilized membranes. *Comp. Biochem. Physiol.*, **69B**, 15-22.
- DAUTLICK, J., STRITTMATTER, C.F. (1970). - Developmental and hormone induced changes in chicken intestinal disaccharidases. *Biochem. Biophys. Acta*, **222**, 447-454.
- DOELL, R.G., KRETCHMER, N. (1962). - Studies of the small intestine during development. I. Distribution and activity of β -galactosidase. *Biochem. Biophys. Acta*, **62**, 353-362.
- DOELL, R.G., KRETCHMER, N. (1964). - Intestinal invertase : precocious development of activity after injection of hydrocortisone. *Science*, **143**, 42-44.
- DOURNON, C., CHIBON, P. (1974). - Influence de la température, de l'âge et des conditions hormonales (thyroxine) sur la prolifération cellulaire chez la jeune larve et pendant la métamorphose du Crapaud *Bufo bufo* L. (Amphibien Anoure). *Arch. (Wilhem Roux) Entwickl. Mech. Organ.*, **175**, 27-47.
- FIGIEL, A., SCHILT, J., DUDOUET, B., ROBINE, S., DAUÇA, M. (1987). - Stage-specific polypeptides and villin expression during the intestinal epithelium substitution of the metamorphosing amphibian. *Differentiation*, **36**, 116-124.
- FIGIEL, A., KELLER, J.M., SCHILT, J., DAUÇA, M. (1989). Stage-specific polypeptide and villin expression during thyroid hormone-induced substitution of the amphibian intestinal epithelium. *Differentiation*, **40**, 166-175.
- FIGIEL, A., DAUÇA, M. (1990). - Influence of triiodothyronine on the polypeptide composition of the intestinal brush border membrane during amphibian metamorphosis. *Int. J. Develop. Biol.*, **34**, 399-407.

- FREUND, J.N., DULUC, I., RAUL, F. (1989). - Discrepancy between the intestinal lactase enzymatic activity and mRNA accumulation in sucklings and adults. Effect of starvation and thyroxine treatment. *FEBS Lett.*, **248**, 39-42.
- GERKE, V., WEBER, K. (1983). - Isolation and characterization of mammalian villin and fimbrin, the two bundling proteins of the intestinal microvilli. *Eur. J. Cell. Biol.*, **31**, 249-255.
- GREY, R.D. (1972). - Morphogenesis of intestinal villi. I. Scanning electron microscopy of the duodenal epithelium of the developing chick embryo. *J. Morphol.*, **137**, 193-214.
- HERMOS, J.A., MATHAN, M., TRIER, J.S. (1971). - DNA synthesis and proliferation by villous epithelial cells in fetal rats. *J. Cell. Biol.*, **50**, 255-258.
- HEUSSER, S., COLIN, S., FIGIEL, A., HUET, C., KELLER, J.M., PORNET, P., ROBINE, S., VANDAMME, J., VANDEKERCKHOVE, J., DAUÇA, M. (1992). - Amphibian intestinal villin : isolation and expression during embryonic and larval development. *J. Cell. Science*, **103**, 699-708.
- HOUDRY, J. (1969a). - Remaniements ultrastructuraux de l'épithélium intestinal chez la larve d'un Amphibien Anoure en métamorphose, *Alytes obstetricans* Laur., I. Phénomènes histolytiques. *Z. Zellforsch. mikr. Anat.*, **101**, 527-554.
- HOUDRY, J. (1969b). - Remaniements ultrastructuraux de l'épithélium intestinal chez la larve d'un Amphibien Anoure en métamorphose, *Alytes obstetricans* Laur., II. - Phénomènes histogénétiques. *Z. Zellforsch. mikr. Anat.*, **101**, 555-567.
- HOUDRY, J. (1971a). - Evolution des processus lytiques dans l'épithélium intestinal de *Discoglossus pictus* Otth (Amphibien Anoure), au cours de sa métamorphose. *J. Micr.*, **10**, 41-58.
- HOUDRY, J. (1971b). - Etude histochimique de quelques hydrolases lysosomiques de l'épithélium intestinal, au cours du développement de la larve de *Discoglossus pictus* Otth. Amphibien Anoure. I. Observation au microscope photonique. *Histochemie*, **26**, 126-141.
- HOUDRY, J. (1971c). - Etude histochimique de quelques hydrolases lysosomiques de l'épithélium intestinal, au cours du développement de la larve de *Discoglossus pictus* Otth, Amphibien Anoure. II. Observation au microscope électronique. *Histochemie*, **26**, 142-159.
- HOUDRY, J. (1974). - Dosage des activités de quelques hydrolases lysosomiques intestinales, au cours du développement larvaire de *Discoglossus pictus* Otth, Amphibien Anoure. *Arch. (Wilhelm Roux) Entwickl. Mech. Organ.*, **174**, 222-233.
- HOUDRY, J., CHABOT, J.G., MENARD, D., HUGON, J.S. (1979). - Intestinal brush border enzyme activities in developing amphibian *Rana catesbeiana*. *Comp. Biochem. Physiol.*, **63A**, 121-125.
- JANES, R.G. (1934). - Studies on the amphibian digestive system. I. Histological changes in the alimentary tract of anuran larvae during involution. *J. exper. Zool.*, **67**, 73-91.
- JOLY, P. (1937). - Métamorphose de l'intestin chez *Discoglossus pictus*. *Trav. Stn. biol.*, Roscoff, **15**, 31-54.
- KEDINGER, M., SIMON, P.M., GRENIER, J.F., HAFFEN, K. (1981). - Role of epithelial-mesenchymal interactions in the ontogenesis of intestinal brush border enzymes. *Dev. Biol.*, **86**, 339-347.

- KUNTZ, A. (1924). - Anatomical and physiological changes in the digestive system during metamorphosis in *Rana pipiens* and *Amblystoma tigrinum*. *J. Morphol.*, **38**, 581-598.
- LIM, S.S., LOW, F.N. (1977). - Scanning electron microscopy of the developing alimentary canal in the chick. *Am. J. Anat.*, **150**, 149-174.
- MAROUX, S., COUDRIER, E., FERACCI, H., GORVEL, J.P., LOUVARD, D. (1988). - Molecular organization of the intestinal brush border. *Biochimie*, **70**, 1297-1306.
- MATSUDAIRA, P.T., BURGESS, D.R. (1982). - Partial reconstruction of the microvillus core bundle : Characterization of villin as a Ca^{2+} -dependent actin bundling/depolymerizing protein. *J. Cell. Biol.*, **92**, 648-656.
- MATSUDAIRA, P.T., JANMEY, P.A. (1988). Pieces in the actin-severing protein puzzle. *Cell*, **54**, 139-140.
- Mc AVOY, J.W., DIXON, K.E. (1977). - Cell proliferation and renewal in the small intestinal epithelium of metamorphosing and adult *Xenopus laevis*. *J. exper. Zool.*, **202**, 129-138.
- MIKI, K., SUZUKI, H., IINO, S., ODA, T., HIRANO, K., SUGIURA, M. (1977). - Human fetal intestinal alkaline phosphatase. *Clin. Chim. Acta*, **79**, 21-30.
- MOOG, F. (1950). - The functional differentiation of the small intestine. I. The accumulation of alkaline phosphomonoesterase in the duodenum of the chick. *J. exper. Zool.*, **115**, 109-129.
- MOOSEKER, M.S. (1985). - Organization, chemistry and assembly of the cytoskeletal apparatus of the intestinal brush border. *Annu. Rev. Cell. Biol.*, **1**, 209-241.
- MORSE, W. (1918). - Factors involved in the atrophy of the organs of the larval frog. *Biol. Bull.*, **34**, 149-166.
- MULIVOR, R.A., HANNIG, V.L., HARRIS, H. (1978). - Developmental change in human intestinal alkaline phosphatase. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **75**, 3909-3912.
- NSI-EMVO, E., LAUNAY, J.F., RAUL, F. (1987). - Is adult type hypolactasia in the intestine of mammals related to changes in the intracellular processing of lactase ? *Cell. Mol. Biol.*, **33**, 335-344.
- PATTEN, S.F. (1960). - Renewal of the intestinal epithelium of the Urodele. *Exper. Cell. Res.*, **20**, 638-641.
- QUARONI, A., ISSELBACHER, K.J. (1985). - Study of intestinal cell differentiation with monoclonal antibodies to intestinal cell surface components. *Dev. Biol.*, **111**, 267-279.
- REDDY, B.S., WOSTMANN, B.S. (1966). - Intestinal disaccharidase activities in the growth germfree and conventional rat. *Arch. Biochem. Biophys.*, **113**, 609-616.
- RUBINO, A., ZIMBALATTI, F., AURICCHIO, S. (1964). - Intestinal disaccharidase activities in adult and suckling rats. *Biochim. Biophys. Acta*, **92**, 305-311.
- SEBASTIO, G., HUNZIKER, W., BALLABIO, A., AURICCHIO, S., SEMENZA, G. (1986). - On the primary site of control in the spontaneous development of small intestinal sucrase-isomaltase after birth. *FEBS Lett.*, **208**, 460-464.
- SEBASTIO, G., VILLA, M., SARTORIO, R., GUZZETTA, V., POGGI, V., AURICCHIO, S., BOLL, W., MANTEI, N., SEMENZA, G. (1989). - Control of lactase in human adult type hypolactasia and in weaning rabbits and rats. *Ar. J. Hum. Genet.*, **45**, 489-497.

- SIDDONS, R.C. (1969). - Intestinal disaccharidase activities in the chick. *Biochem. J.*, **112**, 51-59.
- SIMON-ASSMANN, P.M., KEDINGER, M., GRENIER, J.F., HAFFEN, K. (1982). - Control of brush border enzymes by dexamethasone in the fetal rat intestine cultured *in vitro*. *J. Pediatr. Gastroenterol. Nutr.*, **1**, 257-265.
- TILNEY, L.G., MOOSEKER, M. (1971). - Actin in the brush border of epithelial cells of the chicken intestine. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **68**, 2611-2615.
- TOJYO, Y. (1984). - Developmental changeover in rat duodenal alkaline phosphatase. *Comp. Biochem. Physiol.*, **77B**, 437-441.
- UEZATO, T., OHTA, H., FUJITA, M. (1981). - Developmental change in rat intestinal alkaline phosphatase. *Biochem. Int.*, **2**, 561-566.
- VANDEKERCKHOVE, J. (1990). - Actin-binding proteins. *Curr. Opin. Cell. Biol.*, **2**, 41-56.
- WANG, F.S., BONDER, E.D. (1991). - Sea urchin egg villin : Identification of villin in a non-epithelial cell from an invertebrate species. *J. Cell. Sci.*, **100**, 61-71.
- YOUSON, J.H. (1980). Morphology and physiology of lamprey metamorphosis. *Canad. J. Fish. aquat. Sci.*, **37**, 1687-1710.
- YOUSON, J.H., CONNELLY, K.L. (1978). - Development of longitudinal mucosal folds in the intestine of the anadromous sea lamprey, *Petromyzon marinus* L., during metamorphosis. *Canad. J. Zool.*, **56**, 2364-2371.
- YOUSON, J.H., HORBERT, W.R. (1982). - Transformation of the intestinal epithelium of the larval anadromous sea lamprey, *Petromyzon marinus* L., during metamorphosis. *J. Morphol.*, **171**, 89-117.

**MODELISATION ARCHITECTURALE DU SYSTEME VISUEL
BIOLOGIQUE POUR LA SEGMENTATION D'IMAGE**

**ARCHITECTURAL MODELISATION OF THE BIOLOGICAL VISUAL
SYSTEM FOR THE IMAGE SEGMENTATION**

par

J.P. GIROD, G. MARTIN, B. HEIT, J. BREMONT

**CENTRE DE RECHERCHE EN AUTOMATIQUE DE NANCY
U.R.A. - C.N. R. S. 821 - BP 239 54506 Vandoeuvre les Nancy Cedex
Tél : 83-91-20-05 Fax : 83-91-24-15.**

Résumé

Cet article est consacré à la recherche de contours par la modélisation des systèmes visuels biologiques.

L'outil de segmentation présenté, tire profit des mécanismes de sélectivité à l'orientation présents dans le cortex visuel, pour obtenir des contours fins et bien localisés dans une image en niveaux de gris. La recherche de la meilleure résolution spatiale limite notre étude à la partie centrale de la fovéa.

Sur cette base, nous présentons également une méthode de recherche de points anguleux dans l'image des contours orientés disponibles au sein des colonnes corticales.

Mots clés :

Segmentation d'images, détection de contours, système visuel humain, modélisation, points anguleux.

Abstract :

This article deals with the research of the contours by the modelisation of the biological visual systems.

The segmentation tool presented in this article takes advantage of orientation selection mechanisms which appear in the visual cortex, so that fine well situated edges are obtained in a grey scale image. The search for the best spatial resolution limits our study to the central part of the fovea.

On this basis, we present also a method of research of angular points in the image of the oriented contours available in the cortical columns.

Keywords :

Image segmentation, edge detection, human visual system, modelisation, angular points.

Note présentée à la séance du 15 décembre 1994 par M. J.M. KELLER.

Note acceptée pour publication le 30 juin 1995.

1. Introduction

2. Aspects biologiques de la vision

2.1. L'œil et le corps genouillé latéral

2.2. Le cortex visuel primaire

3. Modélisation de l'architecture du cortex visuel primaire

3.1. Oeil et corps genouillé latéral

3.2. Modèle de l'aire corticale V1

3.3. Modèle de l'aire corticale V2

3.4. Modèle proposé

4. Résultats et comparatifs

4.1. Résultats et comparatifs en détection de contours

4.2. Résultats et comparatifs en détection de points anguleux

4.3. Résultats en détection de contours

5. Conclusions

6. Références bibliographiques

1. Introduction

Tout système de traitement d'images à vocation de reconnaissance de formes, comporte une phase de segmentation, dont l'objectif est la mise en évidence des différents objets constituant la scène.

Les deux approches couramment rencontrées utilisent une approche soit par les régions, soit par les contours, MONGA 1989. Nous limitons notre étude à l'approche par les contours pour laquelle, les opérateurs existants nécessitent souvent un réglage de paramètres dépendant des caractéristiques de l'image à traiter, ce qui limite leur polyvalence.

Notre étude, guidée par les aspects biologiques de la vision humaine, LIVINGSTONE 1988, est alors axée vers une méthode de segmentation utilisable sur tout type d'images. La détection de contour réside alors dans l'extraction des discontinuités de l'image à partir de la modélisation du circuit cône de la fovéa. Cette extraction est assurée par l'antagonisme centre-périphérie modélisée par Marr et Hildreth, MARR 1980.

Nous comparons alors l'apport de notre méthode déduite des systèmes biologiques à des approches moins naturelles, mais plus classiques, tel que l'opérateur de Canny-Deriche, DERICHE 1990.

2. Aspects biologiques de la vision

Le signal visuel issu des deux yeux est acheminé vers le cortex visuel primaire via le corps genouillé latéral sous la forme de deux hémichamps selon la figure 1.

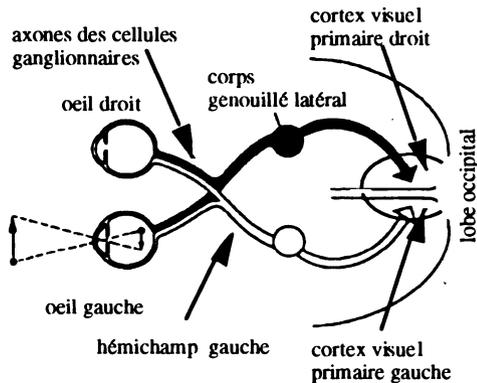


Figure 1 : Système visuel humain

2.1. L'œil et le corps genouillé latéral

Le mécanisme de la vision commence par le traitement des images mises au point sur la rétine, KOWALSKY 1990, DOLY 1991.

Plus qu'un simple damier de photorécepteurs, cette rétine comporte plusieurs couches de neurones qui effectuent déjà un prétraitement de l'image. Cette image est transmise au cortex visuel par l'intermédiaire des cellules ganglionnaires dont les axones forment le nerf optique. Entre les photorécepteurs de la rétine et les cellules ganglionnaires, il existe plusieurs classes de cellules assurant, par des mécanismes neurobiologiques, un traitement complexe de compression de l'information avant transmission. Le circuit cônes, objet de nos travaux, résulte de deux réseaux de cellules qui, pour le premier, est situé dans la direction du flux d'information, tandis que l'autre est transversal.

Dans la direction du flux d'information, les signaux issus des cônes alimentent en premier lieu les cellules bipolaires de fonctionnement analogique. La libération du neurotransmetteur est graduée et dépendante du potentiel de la membrane. Les cellules ganglionnaires transforment alors ce signal analogique en un signal modulé en fréquence pour une transmission sur le nerf optique. Chaque cellule ganglionnaire représente une surface de la mosaïque rétinienne; le champ récepteur qui présente ou non un antagonisme centre-périphérie. Le centre pouvant être excitateur (ON) ou inhibiteur (OFF). Ainsi, il est possible de différencier les distributions relatives de lumière sur deux zones concentriques de la rétine (figure 2).

A cette dichotomie centre ON et centre OFF des cellules ganglionnaires, on superpose une distinction fonctionnelle et structurale en cellules X, Y, W. Les cellules X dites toniques, sont sensibles aux couleurs et présentent un temps de conduction lent. Les cellules Y dites phasiques, à champ achromatique présentent un temps de conduction rapide et sont adaptées à l'étude du mouvement. Enfin, les cellules adaptées à la transmission de l'information de luminance forment un sous-groupe des cellules W.

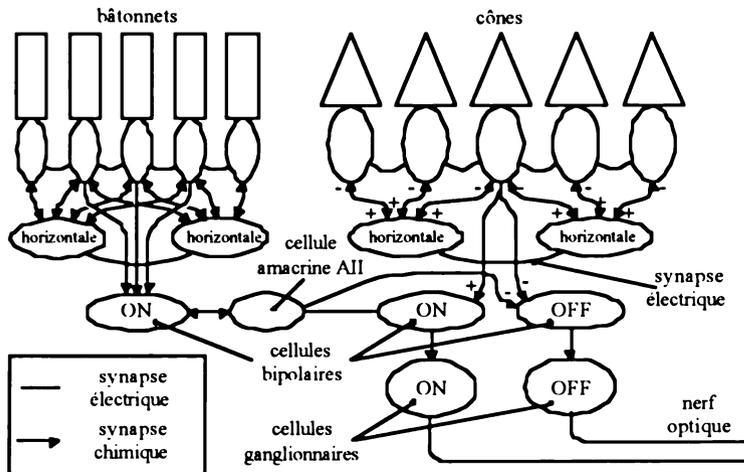


Figure 2 : Modèle schématique de la rétine

L'image rétinienne est transmise par le nerf optique aux différentes aires cérébrales, via le corps genouillé latéral, selon le cheminement présenté figure 3, THORPE 1988.

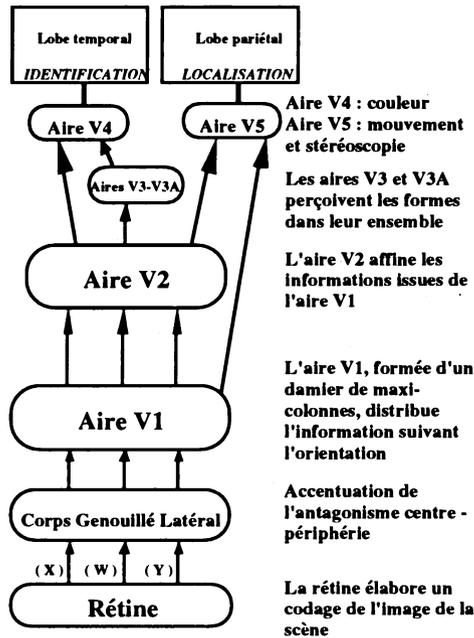


Figure 3 : Les différentes aires cérébrales

Dans le corps genouillé latéral, les couches magnocellulaires 1 et 2 (M) reçoivent les signaux de type Y et les couches parvocellulaires (P) reçoivent les signaux de type X et W. Chaque paire de couches est dédiée au traitement d'un même signal, une couche étant affectée à l'oeil droit, sa voisine à l'oeil gauche. La topographie de la rétine est maintenue.

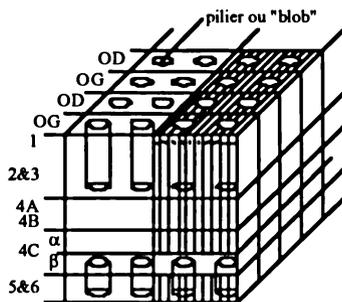
Le rôle exact et complet du corps genouillé latéral est mal connu, il sert néanmoins de relais entre le nerf optique et les aires corticales impliquées dans les mécanismes de la vision. Ses champs récepteurs sont comparables à ceux des cellules ganglionnaires de la rétine mais l'antagonisme centre-périphérie est renforcé.

2.2. Le cortex visuel primaire

Le cortex visuel primaire, situé à la base du lobe occipital, reçoit les informations en provenance du corps genouillé latéral. Nous limiterons notre description aux aires visuelles V1 et V2, premier maillon de la chaîne cérébrale de traitement du signal image.

L'aire V1 est une aire de distribution de l'information formée d'un damier de maxi-colonnes et chacune d'elles est en relation avec une zone du champ de vision (figure 4). Au sein des maxi-colonnes apparaît une structure appelée "blobs" ou piliers dont les cellules sont sensibles à la couleur. Les cellules contenues dans les espaces "interblobs" sont sensibles à l'orientation des stimuli par pas de $11,25^\circ$. Ces stimuli sont une représentation de segments de contours, où apparaît la dualité ON-OFF. Dans l'épaisseur des maxi-colonnes, apparaît une hiérarchie liée à la complexité des champs récepteurs des cellules, LIVINGSTONE 1988. Les cellules simples, que nous venons d'évoquer, apparaissent dans la couche 4B. Les cellules complexes ont les mêmes propriétés que les cellules simples, mais sont sensibles à la position du stimulus et apparaissent dans les couches 2-3 et 5-6. Enfin, les cellules hypercomplexes possèdent les mêmes propriétés que les cellules complexes, mais sont sensibles à la longueur du stimulus.

Chacune de ces maxi-colonnes se subdivise en six couches dans l'épaisseur, en seize zones d'orientations dans l'une des directions parallèles à la surface et deux zones dans l'autre direction (figure 4), l'une consacrée à l'œil gauche, l'autre à l'œil droit. Les stimuli caractéristiques auxquels sont sensibles les cellules de l'aire V1 sont représentés sur la figure 5, GIROD 1994.



OD : oeil droit
OG : oeil gauche

D'après M.S. LIVINGSTONE & D.H. HUBEL

Figure 4 : Aire V1: colonnes corticales

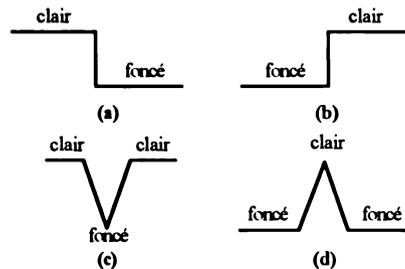


Figure 5 : Stimuli caractéristiques

En termes de détection de contour, les types (a) et (b) sont adaptés à des contours en marche, tandis que les types (c) et (d) répondent à des contours en toit. De plus, nous supposons que l'information issue des cellules ganglionnaires W est également présente dans cette aire sous la forme d'un gradient orienté.

L'aire V2 possède une frontière commune avec V1 correspondant à la projection du méridien vertical du champ de vision. L'analyse de cette aire fait apparaître trois sortes de structures, matérialisées par des bandes partant perpendiculairement à la frontière séparant V1 de V2. Les régions de V1 se projettent sur les bandes épaisses, où sont traitées les informations de stéréovision et de mouvement, sur les bandes minces où est traitée l'information de couleur et sur les bandes pâles où

sont traitées les informations relatives à la forme (orientation, distance), LIVINGSTONE 1988.

L'aire V2, tout comme l'aire V1 conserve la séparation des circuits magno- et parvocellulaires et les deux destinations principales des signaux sortant de V2 sont l'aire V4 via V3 et V3a et l'aire V5 ou MT.

Au cours de la partie modélisation, nous allons voir comment obtenir les informations existantes dans les aires V1 et V2 ainsi que la façon de les exploiter pour en extraire les contours puis détecter les points anguleux.

3. Modélisation de l'architecture du cortex visuel primaire

Soucieux d'obtenir la meilleure résolution possible, notre modélisation concerne exclusivement la partie centrale de la fovéa (fovéola) de forme rectangulaire et ayant une densité de cônes homogène.

Par ailleurs, nous faisons abstraction de la notion de couleurs, pour ne traiter que l'aspect luminance du signal dans un but de simplification.

3.1. *Oeil et corps genouillé latéral*

Le premier élément de cet ensemble simule le fonctionnement de la partie centrale de la rétine où prend naissance l'antagonisme centre-périphérie des cellules X, obtenu par les regroupements spatiaux effectués par les synapses électriques intercônes et le regroupement effectué sur une plus grande superficie par les cellules horizontales. Cette fonction est modélisée par D. Marr et E. Hildreth, MARR 1980, sous le nom d'opérateur DOG ou "Difference Of Gaussian". Le signal obtenu est similaire à l'application d'un opérateur laplacien. Cependant, nous réglons l'opérateur DOG en filtre passe-bande large qui autorise le traitement de transitions sur une large gamme de résolutions allant du détail fin au contour flou. Le signal est obtenu par la relation :

$$X = I \otimes G_{\sigma_1} - I \otimes G_{\sigma_2} \quad [1]$$

où \otimes est le produit de convolution bidimensionnel, I le signal de luminance de l'image $i(x,y)$ au point (x,y) et G_{σ_i} deux gaussiennes d'écart type σ_1 et σ_2 telles que $\sigma_1 < \sigma_2$. Le signal obtenu est scindé en deux parties X^+ (respectivement X^-) qui simulent le fonctionnement d'une cellule X à centre ON (respectivement d'une cellule X à centre OFF). Parallèlement à ce circuit noté X, est transmise la luminance W prélevée à la sortie du filtre de lissage gaussien d'écart type σ_1 (figure 6). Ces signaux transitent alors par le nerf optique pour gagner le corps genouillé latéral.

Comme l'indique le § 2.1, le Corps Genouillé Latéral n'intervient pas dans notre modèle, aussi modéliserons nous directement l'aire V1..

3.2. *Modèle de l'aire corticale V1*

Le modèle proposé pour l'aire V1 recrée les caractéristiques de sélectivité à l'orientation des stimuli visuels que présentent certaines cellules. L'algorithme proposé comporte deux étapes pour chacun des circuits X et W. La première étape

effectue un *filtrage directif* gaussien des signaux selon huit directions échelonnées au pas de 22.5° . Ce traitement permet de rechercher des alignements de cellules X actives au voisinage de contours, et de lisser le signal W de luminance le long de ceux-ci pour atténuer le bruit. En sortie de ces filtres, nous sommes en présence de huit images pour chaque signal X_d^+ , X_d^- , W_d (figures 15 et 16). La seconde étape effectue l'opération de localisation des passages par zéro des signaux X filtrés et la détermination du contraste dans les signaux W filtrés tous deux orthogonalement à la direction du filtrage. Afin de préserver la dualité ON-OFF, nous effectuons une soustraction mutuelle des signaux X_d^+ et X_d^- pour chaque orientation. Ainsi, un contour en marche est trouvé au passage par zéro du signal $X(x, y)$, c'est-à-dire que $X(x, y)$ est entouré par deux signaux X_d^+ et X_d^- . On obtient ainsi Z_d pour chacune des orientations. Notre approche repose sur l'hypothèse que le circuit W subit les mêmes traitements que le circuit X. La directivité des signaux Z n'est pas suffisante pour une bonne immunité au bruit, c'est pourquoi nous utilisons les informations contenues dans les signaux W_d . Pour ce faire, les circuits X et W interagissent par validation mutuelle. Les informations extraites sont appelées *pré-contours*, car les points détectés par les passages par zéro du signal X et validés par le contraste évalué sur le signal W, sont des points de contour potentiels de l'image présentée sur la rétine.

3.3. *Modèle de l'aire corticale V2*

Le modèle de l'aire V2 tire profit des mécanismes de renforcement des cellules actives alignées ou d'inhibition latérale présents dans le système visuel biologique. Il s'appuie sur un filtrage directionnel en *demi-contours* avec recherche des deux directions les plus actives suivi d'une élimination des points parasites par seuillage. Le seuillage est calculé par une diffusion gaussienne sur un voisinage. Le filtrage en demi-contours accentue les points de précontour en fonction de leurs relations topologiques, c'est-à-dire en renforçant leur niveau lorsque plusieurs points sont alignés. Ce principe permet d'obtenir des contours fins, précisément localisés par le circuit X, dont le module est fourni par le circuit W (signal ModC figure 6) et l'argument par la direction résultante des deux demi-contours actifs (signal Arg ZC figure 6). Le résultat obtenu sur une image est donné figure 17.

De plus, ce filtrage permet la détection des points anguleux (signal PA figure 6) par l'application d'un seuil fixé sur l'angle formé par les deux directions dominantes portées par le signal Coin ZC. Le seuillage permet d'éliminer deux types de défauts que sont l'épaississement des contours au voisinage d'un point anguleux et leur prolongation artificielle au-delà de ce même point. La figure 13 montre le résultat obtenu sur une image de synthèse.

3.4. *Modèle proposé*

Le synoptique présenté figure 6 offre l'avantage de former un ensemble complet et cohérent d'opérateurs connus, mais collaborant judicieusement. De plus, il est parfaitement implémentable en temps réel sur une architecture de type pipe-line

comme la convolution, le "MAX" et quelques opérateurs logiques.

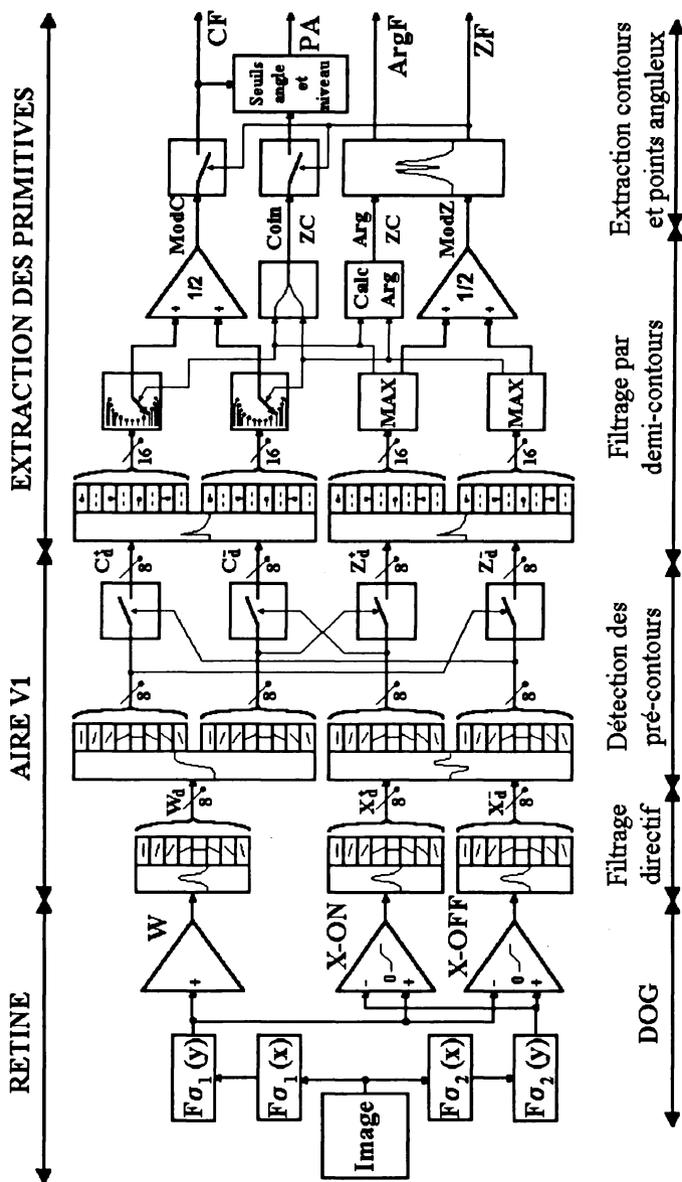


Figure 6 : Synoptique du modèle réalisé

4. Résultats et comparatifs

Le meilleur rapport entre les écarts types de $\sigma 1$ et $\sigma 2$ est tel que $\sigma 2 = 3 \sigma 1$, et permet une bonne localisation des contours en rampe. Aussi, notre choix des écart types des gaussiennes utilisées pour la fonction D.O.G. est de 0,5 pixel pour $\sigma 1$ et 1,5 pixel pour $\sigma 2$. L'écart type de la gaussienne de lissage (W) est fixé à la valeur de $\sigma 1$.

Les filtres directionnels de l'aire corticale V1 doivent avoir un écart type optimal pour permettre un raccordement correct sans artefact. La valeur retenue est $\sigma 3 = 3$, GIROD 1994 .

Afin de juger des performances de notre algorithme, nous l'avons comparé à l'opérateur de Canny-Deriche, DERICHE 1990 pour la détection de contour et à celui basé sur la méthode de K. Rangarajan, RANGARAJAN 1989, pour la détection des points anguleux.

4.1. Résultats et comparatifs en détection de contours

Les trois critères permettant de juger les performances d'un détecteur de contours sont sa capacité à détecter le plus grand nombre de points appartenant aux contours, à les localiser correctement et à être insensible au bruit.

Pour élaborer notre comparaison, il est nécessaire de fixer le paramètre α du filtre de Deriche. La valeur de ce paramètre est un compromis entre un facteur de lissage important pour une petite valeur du coefficient qui provoque une perte de détails et le traitement de contours fins mais très sensibles au bruit pour une valeur élevée. Ce choix est exprimé par le rapport signal sur bruit (figure 7) et par le taux de contours détectés % Det. (figure 8).

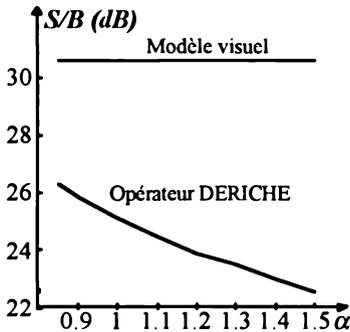


Figure 7 : Rapport S/B fct de α

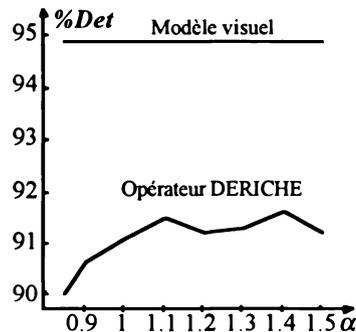


Figure 8 : Contours détectés fct de α

Ces courbes montrent que notre opérateur présente des résultats bien supérieurs quel que soit le paramètre α choisi pour le filtre de Deriche. Sur l'image de synthèse (figure 14) comportant 3414 points de contour, nous avons retenu une valeur optimale de α à 1. Pour cette valeur, l'opérateur de Deriche détecte 91 %

soit 3110 points de contour avec un rapport signal sur bruit de 25,2 dB et le modèle visuel 95 % soit 3240 points et un rapport signal sur bruit de 30,6 dB.

4.2. Résultats et comparatifs en détection de points anguleux

De manière identique, nous procédons par comparaison avec un détecteur de points anguleux développé par K. Rangarajan qui repose sur les critères d'optimalité de J.F. Canny et améliorée dans notre équipe, TESS 1993

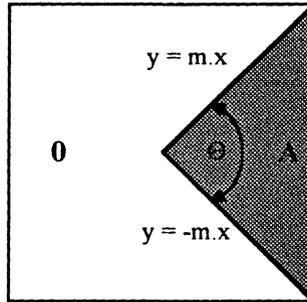


Figure 9 : Point anguleux

Ce détecteur s'appuie sur une définition analytique (figure 9) du point anguleux (équations [2] et [3]). Il recherche une fonction $g(x, y)$ permettant de détecter un point anguleux par convolution avec l'image $F(x, y)$ bruitée par un bruit blanc gaussien $\eta(x, y)$.

$$I(x, y) = \begin{cases} A & \text{si } x > 0 \text{ et } -mx < y < mx \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad [2]$$

$$F(x, y) = I(x, y) + \eta(x, y) \quad [3]$$

Sachant que l'opérateur doit être insensible au bruit et doit localiser correctement les points anguleux, le problème est posé sous la forme d'optimisation à l'aide des critères de Canny. La solution proposée par K. Rangarajan est représentée sous la forme de deux équations :

$$\begin{cases} a: & g(x, y) = C_1 \left[-(\exp(-zW) + \exp(zW)) + \exp(zy) + \exp(-zy) \right] \sin\left(\frac{m\pi x}{W}\right) \\ b: & g(x, y) = C_2 \sin\left(\frac{n_1 \pi x}{W}\right) \sin\left(\frac{n_2 \pi x}{W}\right) \end{cases} \quad [4]$$

La partie relative aux points anguleux est définie par l'équation [4a] tandis que la partie relative au point non anguleux est définie par l'équation [4b]. En pratique, il suffit de 12 masques pour en détecter toutes les configurations.

L'image de synthèse comporte 47 points anguleux et 20 points de jonction. Les caractéristiques extraites par les deux algorithmes sont données dans le tableau figure 10.

ALGORITHME UTILISE	COINS DETECTES	JONCTIONS DETECTEES	TOTAL DETECTE
Image Référence	47	20	67
K. Rangarajan/Tess	42	14	56
Modèle Visuel	45	13	58

Figure 10 : Tableau comparatif des résultats obtenus sur l'image de synthèse

5. Résultats obtenus sur des images

5.1. Résultats en détection de points anguleux

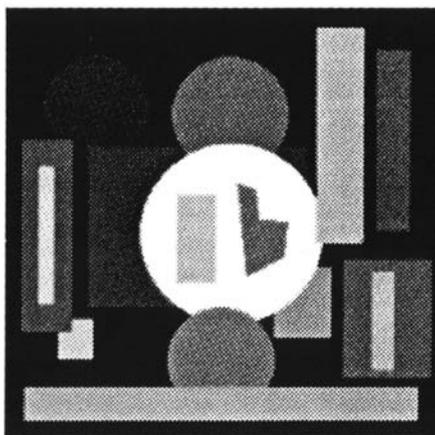


Figure 11 : Image de synthèse

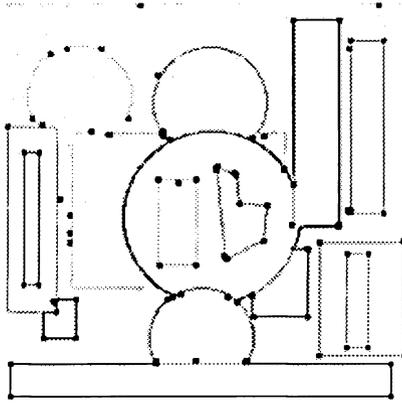


Figure 12 : Alg. de Rangarajan/Tess

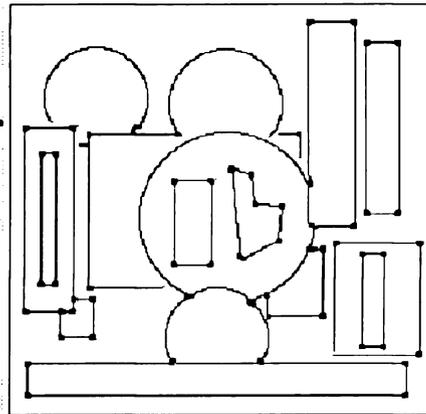


Figure13 : Modèle biologique décrit.

Ces résultats obtenus sur l'image de synthèse montrent que les performances des deux détecteurs sont très voisines. Cependant, en raison des problèmes d'échantillonnage, l'algorithme de Rangarajan laisse encore apparaître de faux points anguleux, malgré l'amélioration apportée par C. Tess, TESS 1993. De plus, la définition de ce détecteur est adaptée aux points anguleux et non pas aux points de jonction. Le modèle visuel n'est pas non plus très performant du fait de l'effacement de contours faibles à l'approche d'un contour à fort contraste et de plus, il n'est pas adapté aux traitements de plus de deux demi-contours. Ces points anguleux sont obtenus à la sortie PA de la figure 6.

5.2. Résultats en détection de contours

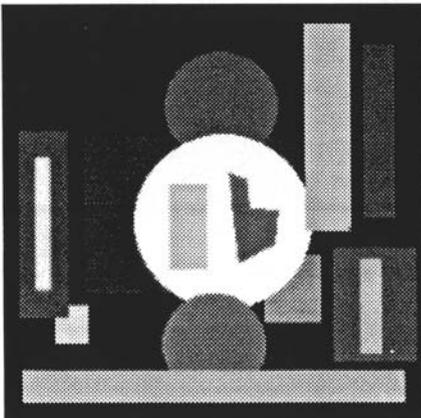


Figure 14 : Image de synthèse

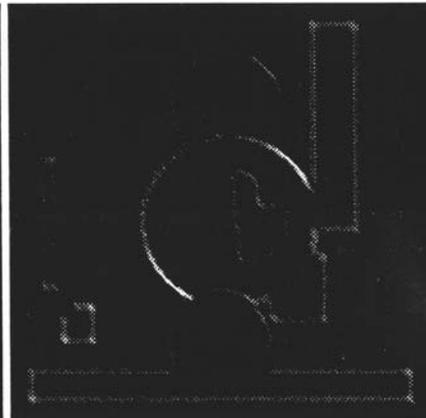


Figure 15 : Contours orientés à X_2^*

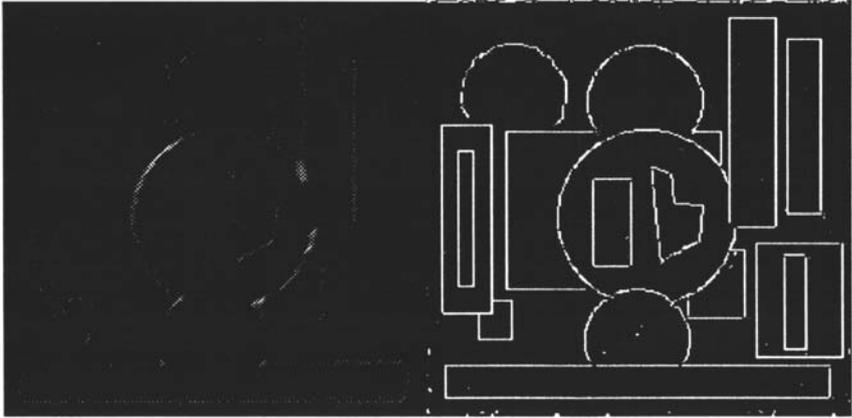


Figure 16 : Contours orientés à X_6^+ Figure 17 : Image des contours sortie CF

Pour l'image des contours, nous présentons, sur l'image de synthèse, les résultats intermédiaires correspondant aux sorties ON et OFF des filtres directionnels X_i^+ . Ceux-ci sont affinés (Z_i^+ et Z_i^-) pour donner l'image CF.

Nous proposons enfin, afin de pouvoir comparer visuellement, le résultat obtenu sur l'image AQUITAINE extraite de la banque du GRECO GDR 134-GT8.

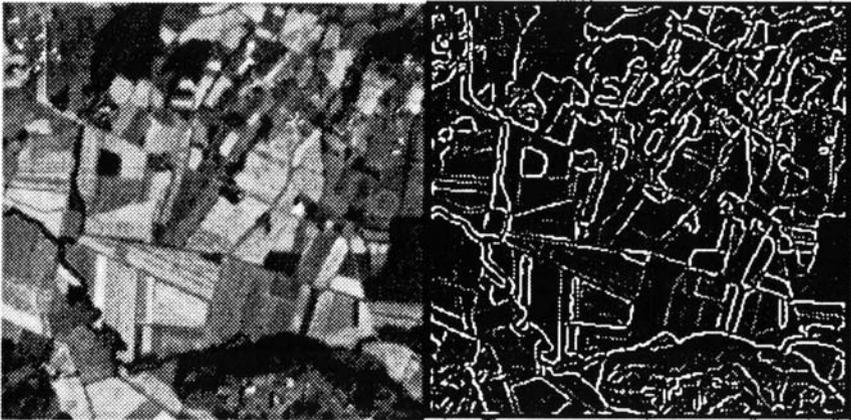


Figure 18 : Image AQUITAINE (GRECO) Figure 19 : Image des contours

6. Conclusions

Notre algorithme, déduit d'une modélisation architecturale des systèmes de vision biologiques affiche des performances voisines de celles de l'algorithme de Canny-Deriche, mais présente l'avantage de n'avoir aucun paramètre dépendant de l'image

à traiter. Il permet en outre de mettre en évidence des contours de faible contraste malgré la présence d'un bruit important.

Par son principe de détection des passages par zéro de la dérivée seconde, il procure directement des contours d'un pixel d'épaisseur.

Certaines étapes intermédiaires permettent d'extraire une autre primitive de l'image, à savoir les points anguleux, qui ouvrent des investigations prolongeant cet article. Par ailleurs, pour les besoins de la comparaison avec l'algorithme de Canny-Deriche, nous avons concaténé les images des contours dans les différentes orientations, mais cette information est intrinsèquement disponible alors que les autres méthodes nécessitent des calculs supplémentaires sur l'argument. De plus, cet algorithme est parallélisable en vue d'une implémentation matérielle en temps réel sur des architectures de type réseau de neurones ou pipeline.

Il serait néanmoins nécessaire d'ajouter un outil adapté au traitement des jonctions des contours multiples, notre méthode ne les traitant pas correctement.

7. Références bibliographiques

- DERICHE R., 1990 - "Fast algorithme for low level vision", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 12, 1, 78-87.
- DOLY M., 1991 - "Aspects biophysiques de la neurotransmission rétinienne", Séminaires Ophtalmologiques d'IPSEN - Rétinopathies et neurotransmission, T3, Y Christen, M. Doly et M. T. Droy-Lefaix eds.
- GIROD J. P., 1994 - "Extraction de primitives en traitement d'images par modélisation des systèmes visuels biologiques", Doctorat de l'Université Henri Poincaré Nancy-I.
- KOWALSKY P., 1990 - "Vision et mesure de la couleur", Coll. Physique Fondamentale et Appliquée, Masson, 17-20.
- LIVINGSTONE M. & HUBEL D.H., 1988 - "Segregation of form, color, movement, and depth : anatomy, physiology, and perception", Science, 240, 740-749
- MARR D; & HILDRETH E., 1980 - "Theory of edge detection", Proc. R. Soc. Lond., B 207, 187-217.
- MONGA O., 1989 - "Segmentation d'images : où en sommes nous ?", Rapport de recherche INRIA-Rocquencourt, 1216, support de cours PIXIM.
- RANGARAJAN K., 1989 - "Optimal corner detector", Computer Vision, Graphics and Image Processing, 48, 2, 230-245.
- TESS C., 1993 - "Détection de points anguleux en vision monoculaire passive", DEA Automatique et Traitement du Signal, Univ. Nancy I.
- THORPE S. J., 1988 - "Traitement d'images chez l'homme", Techniques et Sciences Informatiques, 7, 6, 517-525.

**LE MAGMATISME DU CHAMP DU FEU
(VOSGES SEPTENTRIONALES)
Caractérisation et signification géodynamique**

Marc DESCHAMPS

Université Henri Poincaré - Nancy 1, Faculté des Sciences, B.P. 239
54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex, France.

Note acceptée pour publication le 14 mai 1995.

RESUME : *Le massif du Champ du Feu, d'âge fini-Dévonien à Carbonifère inférieur, est constitué par une suite plutonique associant des roches dont la composition varie depuis des gabbro-diorites jusqu'à des granites. Les relations entre les termes acides et basiques, à toutes les échelles d'observation, montrent des figures de mélange qui suggèrent la mise en place synchrone de deux magmas immiscibles. Les données géochimiques indiquent un caractère typiquement calco-alkalin. Ces caractères, s'ajoutant à ceux du volcanisme orogénique des massifs de la Bruche et du Rabodeau, conduisent à envisager la genèse des magmas en relation avec la subduction vers le Sud de l'océan rhéno-hercynien. L'hypothèse d'une mise en place post-collisionnelle n'est cependant pas écartée. Ces deux options sont discutées à la lumière des données chronologiques et paléomagnétiques.*

Mots-clés: *Vosges - chaîne hercynienne - plutonisme calco-alkalin - géodynamique.*

ABSTRACT : *The late Devonian to early Carboniferous Champ du Feu Massif (Northern Vosges) exhibits a suite of plutonic rocks whose compositions range from gabbro-diorite to granite. The relationships between acid and basic rocks, show strong evidences of simultaneous emplacement of the two magmas without mixing. Geochemical features are typically calc-alkaline. These characteristics, associated with those of the orogenic volcanism of the Bruche and Rabodeau massifs, suggest the genesis of the magmas to be related to the southward subduction of the Rheno-Hercynian ocean. A post-collisional setting is however not to be excluded. These two possibilities are discussed in the light of chronological and paleomagnetic data.*

Key-words: *Vosges - Variscan belt - calc-alkaline plutonism - geodynamic setting.*

Note présentée à la séance du 14 janvier 1993 par M. P.L.MAUBEUGE.

INTRODUCTION

Le Champ du Feu constitue l'affleurement le plus important de roches plutoniques de la partie septentrionale du massif vosgien qui appartient lui-même à la *chaîne hercynienne* ou *chaîne varisque*.

Bien que les Vosges ne représentent qu'un très modeste maillon de cette chaîne plissée d'âge primaire, leur connaissance peut apporter des informations utiles à sa compréhension globale. La chaîne hercynienne a longtemps été considérée comme typiquement intracontinentale, se distinguant ainsi des chaînes récentes (chaînes alpines et andines par exemple) dont la formation est aujourd'hui expliquée, en termes de tectonique des plaques, par la subduction de domaines océaniques entraînant la convergence puis la collision de masses continentales initialement éloignées. Depuis une vingtaine d'années (Burret, 1972; Franke, 1989; Matte, 1991 par exemple) les conceptions sur la chaîne hercynienne ont fondamentalement évolué et s'orientent vers des modèles de type subduction-collision comparables à ceux qui sont admis pour les chaînes récentes.

Notre objectif est de montrer que:

- les roches plutoniques du Champ du Feu représentent un bel exemple d'association de magmas calco-alcalins basiques et acides mis en place simultanément.
- ce magmatisme ressemble beaucoup à celui qui est lié aux zones de convergence de plaques, ressemblance encore accentuée par la proximité de séries volcaniques sub-contemporaines également caractéristiques de ce type de contexte géodynamique.

En conclusion, nous discuterons la possibilité de liaison de ce magmatisme avec des processus de subduction, d'âge fini-dévonien à carbonifère inférieur, et nous envisagerons les conséquences pour l'évolution de la chaîne hercynienne.

I- CADRE GÉOLOGIQUE

Culminant à une altitude de 1100 mètres, le massif du Champ du Feu s'étend sur une surface de l'ordre de 170 km² à environ 40 km au Sud-Ouest de Strasbourg. Il appartient en réalité à un ensemble plutonique plus vaste qui forme une bande large d'une dizaine de kilomètres, orientée ENE-WSW, et que l'on peut suivre sur près de 50 km depuis la bordure du fossé rhénan (région de Sainte Odile) jusqu'à l'Ouest de la vallée de la Meurthe où il disparaît sous les sédiments triasiques de la bordure orientale du Bassin Parisien (fig. 1). Cet ensemble comporte donc également les massifs de Senones et de Saint Jean d'Ormont ainsi que la région d'Etival à l'Ouest de la Meurthe. Il représente ainsi une surface de l'ordre de 450 km². Le Champ du Feu en constitue l'entité principale.

A- Terrains encaissants

Le massif du Champ du Feu est intrusif dans des séries sédimentaires et volcaniques peu ou pas métamorphiques appartenant à la zone saxo-thuringienne de la chaîne hercynienne et dont les âges s'échelonnent du Précambrien terminal au Viséen (Carbonifère inférieur). Ce sont:

- *au Sud* les séries quartzo-pélitiques des schistes de Villé (Précambrien supérieur) et des schistes de Steige (Silurien). Ces formations épimétamorphiques

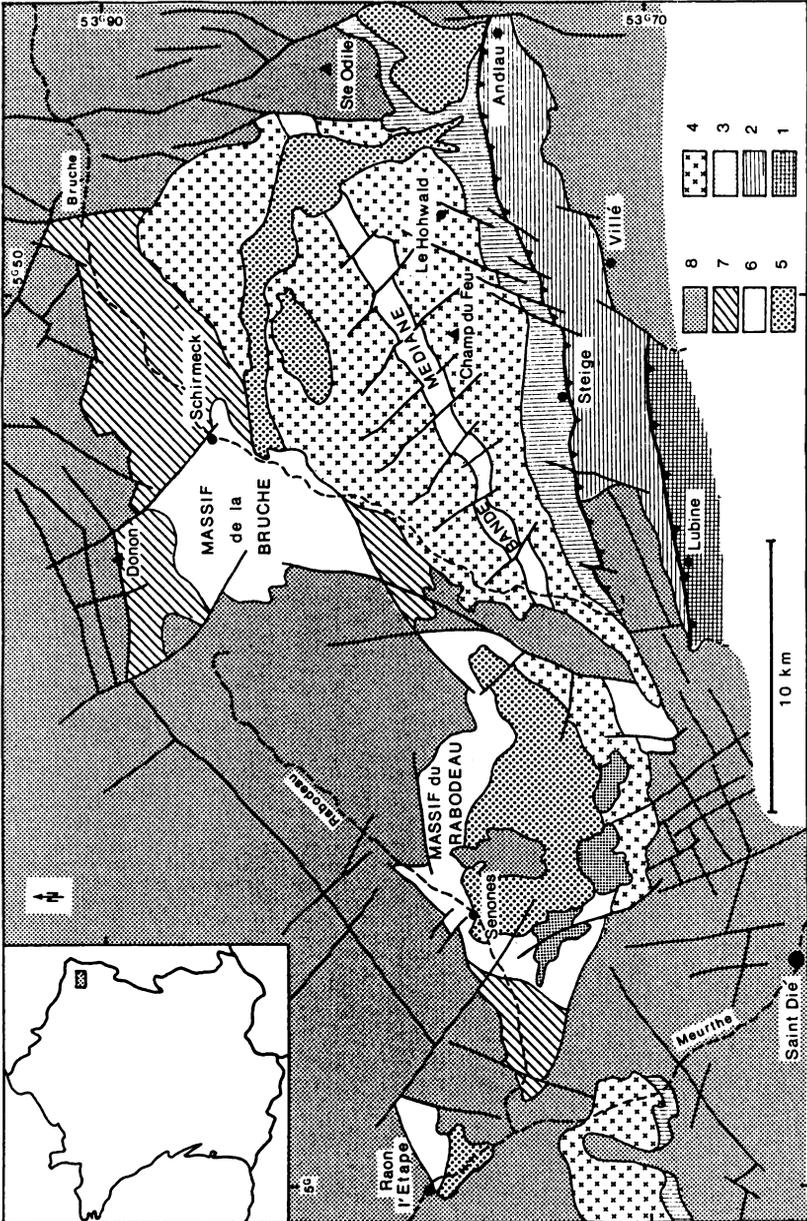


Figure 1: Carte géologique schématique des Vosges septentrionales. (1) Cneiss des Vosges moyennes (2) Schistes de Villé (3) Schistes de Steige (4) Granodiorites (5) Granites (6) Sédiments dévono-dinantiens (7) Sédiments dévono-dinantiens (8) Couverture permotriassique.

ont subi plusieurs phases de déformation au cours desquelles les schistes de Villé ont été charriés, vers le Nord, sur les schistes de Steige. L'intrusion des granitoïdes du Champ du Feu dans les schistes de Steige est par ailleurs responsable d'un métamorphisme de contact bien exposé dans le Val d'Andlau. C'est d'ailleurs dans cette vallée alsacienne et sur cet exemple aujourd'hui classique qu'est née, il y a un peu plus d'un siècle, la notion de métamorphisme de contact (Rosenbuch, 1877).

- *au Nord* les séries volcaniques et sédimentaires d'âge dévonien et carbonifère de la vallée de la Bruche (région de Schirmeck) ainsi que leur prolongation occidentale observable dans la vallée du Rabodeau (environs de Senones et Moyenmoutier) et la région de Raon l'Etape. Les volcanites y sont très diversifiées. Elles appartiennent à des séries qui comprennent successivement des tholéiites d'arc, des volcanites calco-alcalines et finalement des shoshonites (roches calco-alcalines à caractère potassique marqué). Toutes ces roches présentent de remarquables analogies avec celles qui caractérisent les arcs volcaniques modernes liés aux processus de convergence de plaques. Elles ont donc tout naturellement conduit certains auteurs (Volker and Altherr, 1987; Ikenne et al., 1991; Rizki et al., 1992) à envisager qu'elles indiquent la persistance d'une subduction dans la branche nord de la chaîne hercynienne jusqu'au Dévonien supérieur et peut-être même jusqu'au Viséen.

B- Structure du Massif (fig. 2)

L'originalité du massif du Champ du Feu réside dans sa structure en bandes étroites, d'épaisseurs kilométriques mais très continues, orientées NE-SW et constituées de roches plutoniques qui sont alternativement des granites, des granodiorites et des diorites. Une bande de terrains essentiellement volcaniques, parallèle au dispositif général, partage le massif en deux zones à peu près égales, d'où son appellation de "bande volcanique médiane". Seuls deux corps granitiques, relativement tardifs, ne respectent pas cette structure: il s'agit de l'intrusion de Natzwiller d'une part, et de la structure franchement sécante, d'aspect filonien, formée par le granite de Kagenfels d'autre part.

La qualité médiocre des affleurements ne permet pas de préciser avec certitude le pendage des bandes qui constituent le massif. Nous avons cependant proposé (Deschamps, 1991), sur la base des relations entre les faciès microgrenus et faciès à enclaves, un pendage général vers le Sud.

C- Données chronologiques

1- Plutonisme:

Les données chronologiques sur le massif du Champ du Feu sont encore imprécises et parfois ambiguës. Les relations entre le massif de Natzwiller et son encaissant illustrent bien les problèmes qui subsistent. Ce massif constitue en effet une petite intrusion circonscrite au sein des granodiorites à enclaves de la Serva et nettement postérieure à ces formations ainsi que le prouve l'existence d'une bordure microgrenue bien développée à leur contact. Le granite de Natzwiller et son encaissant ont été datés par les méthodes K/Ar (Edel et al., 1986) et Rb/Sr (Geldron, 1987):

a - *Données K/Ar*: deux mesures effectuées sur des micas du massif de Natzwiller ont donné un âge compris entre 345 et 350 ± 12 Ma alors que les granodiorites sont datées par la même méthode entre 330 et 320 Ma.

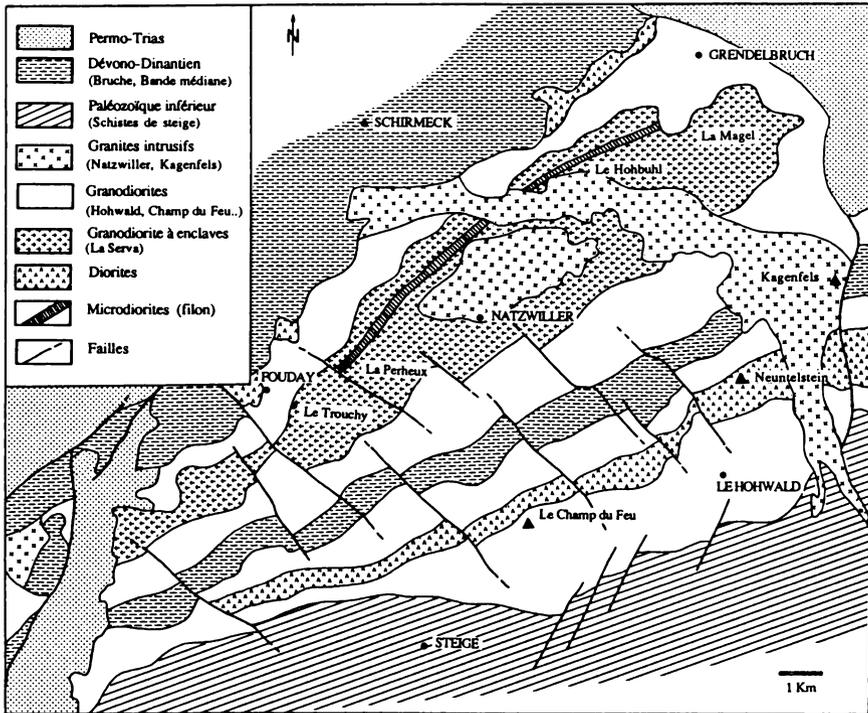


Figure 2: Carte géologique du Massif du Champ du Feu (d'après J.P. von Eller, 1964-69)

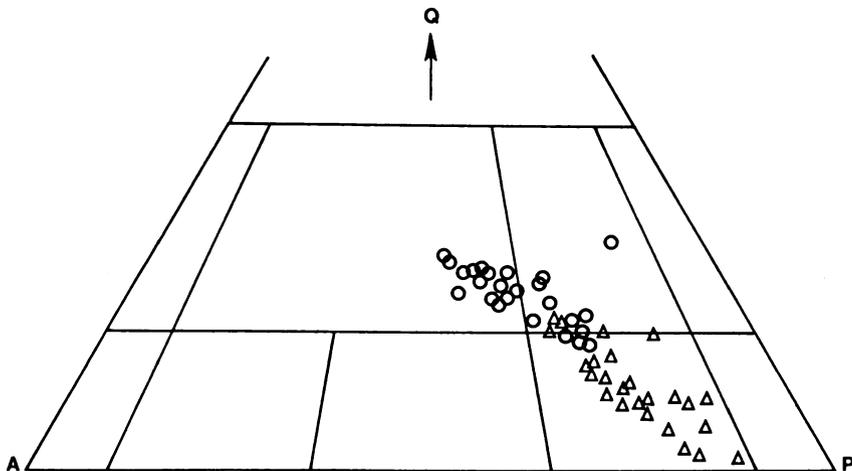


Figure 4 : Plutonites du Champ du Feu dans le diagramme Q A P
 Q = Quartz - A = Feldspaths alcalins - P = Plagioclases - ○ Granitoïdes △ Diorites

b - *Données Rb/Sr*: les mesures faites sur roches totales ont donné une isochrone à 325 ± 25 Ma pour Natzwiller et 307 ± 13 Ma pour son encaissant.

Dans les deux cas, l'âge mesuré pour le granite de Natzwiller est plus grand que celui de son encaissant, ce qui est évidemment impossible. Nous pensons donc, suivant en cela Edel et al. (1986), que les âges situés entre 320 et 330 Ma pour les granodiorites à enclaves ne sont sans doute pas significatifs et ne traduisent qu'une perte d'argon postérieure à la cristallisation de ces roches. Par ailleurs, l'isochrone Rb/Sr à 325 Ma nous paraît douteuse en raison de la valeur excessive de l'incertitude (± 25 Ma). Ceci nous conduit, en l'état actuel des données, à admettre un âge de l'ordre de 350 Ma pour le granite Natzwiller et donc plus ancien encore pour l'essentiel du massif du Champ du Feu (Carbonifère inférieur voire Dévonien terminal).

Ces incertitudes sur l'âge des premières manifestations du plutonisme du Champ du Feu posent un problème crucial pour les interprétations géodynamiques que nous aborderons en conclusion.

L'âge de l'intrusion la plus récente, c'est à dire celle du granite de Kagenfels, est en revanche bien établi par les deux méthodes employées. Il se situe à la limite entre le Carbonifère et le Permien (~ 290 Ma) coïncidant donc avec les phases ultimes de l'histoire hercynienne. Les caractères de ce granite alcalin s'apparentent à ceux des granites anorogéniques (Reve, 1985).

2- Volcanisme:

Le volcanisme qui constitue l'encaissant nord du massif est traditionnellement considéré comme dévonien mais certains auteurs (Volker et Altherr, 1987) lui attribuent aussi un âge viséen.

Le cas de la bande volcanique médiane du Champ du Feu mérite d'être reconsidéré. Bien qu'aucune datation ne soit disponible sur cette formation, elle a jusqu'à présent été considérée comme représentative du volcanisme le plus ancien (Dévonien moyen voire inférieur) des Vosges du Nord. Nos observations, dans la région de Saales (bordure ouest du massif du Champ du Feu), sur les relations entre des faciès hypovolcaniques de la bande médiane et les plutonites granitiques montrent une mise en place synchrone.

En conséquence, la bande volcanique médiane est à la fois l'expression la plus jeune et la plus évoluée, avec notamment les faciès shoshonitiques (Rizki et al., 1992), du volcanisme du Nord des Vosges.

D- Etudes antérieures:

Le massif du Champ du Feu a depuis longtemps fait l'objet d'études détaillées, l'association étroite de roches gabbro-dioritiques et de granitoïdes ayant depuis fort longtemps retenu l'attention des chercheurs. Rosenbuch (1877) interpréta le massif comme résultant d'injections successives de magmas de compositions différentes. Plus tard, De Lapparent (1923) estima que les faciès dioritiques résultaient de l'assimilation par les granitoïdes, de matériaux volcaniques basiques du type de ceux qui constituent le massif de Schirmeck (phénomène d'endomorphisme). Ce point de vue fut repris et amplifié, de 1964 à 1969, par J.P. Von Eller qui assura par ailleurs une description très minutieuse du massif ainsi que la cartographie détaillée sur laquelle nous nous appuyons (fig. 2).

Paradoxalement, nos conclusions seront plus proches de celles de Rosenbuch que de celles de ses successeurs.

Nous envisagerons successivement la pétrographie puis la géochimie des différentes formations en insistant toutefois essentiellement sur les diorites et sur leurs relations avec les granites aux différentes échelles d'observation. Pour la description pétrographique des granites on pourra consulter utilement les travaux de Von Eller (1964 à 1969).

II- ETUDE PETROGRAPHIQUE

A- Les diorites :

Ces roches de teinte sombre, montrent en réalité des compositions allant depuis des gabbros jusqu'à des monzodiorites. Elles se présentent sous trois formes :

- **massifs de diorites grenues:** Elles constituent de petites intrusions sur la bordure nord du massif (environs de Fouday et Grendelbruch) et surtout, dans la moitié sud du Champ du Feu, l'unité de Neuntelstein, longue de plus de 20 km pour une largeur à peine kilométrique. Ces roches se retrouvent aussi, vers l'Ouest, jusque dans la région de Deyfosse (Sud d'Etival).

- **filons microdioritiques:** ils sont essentiellement représentés par un filon très continu, que l'on peut suivre depuis Le Trouchy jusqu'au vallon de la Magel malgré une puissance n'excédant pas quelques dizaines de mètres.

- **enclaves de diorites à texture aciculaire dans les granitoïdes:** on les trouve dans l'ensemble du massif. Elles sont cependant plus abondantes dans la granodiorite du Hohwald, au Sud de la bande de Neuntelstein, et surtout dans la granodiorite de la Serva, au Sud du filon mentionné ci-dessus, où elles présentent ce faciès aciculaire qui fera l'objet d'une description détaillée.

Dans l'ensemble, ces roches sont essentiellement constituées de *feldspaths plagioclases* zonés (An_{60-35}) généralement automorphes mais fortement altérés, d'*amphibole* (hornblende verte) également zonée et de *biotite* souvent largement chloritisée. La cristallisation précoce du plagioclase est attestée par la fréquence de petits cristaux automorphes inclus dans les amphiboles. Le *feldspath potassique* et le *quartz* sont souvent présents, en quantité inférieure à 10% et en position interstitielle. Parmi les minéraux accessoires, on remarque notamment l'*apatite* très abondante, et le *sphène*. Les minéraux d'altération sont la *chlorite*, l'*épidote* ainsi que la *préhnite* qui se développe aux dépens de la biotite ou se présente en filonnets millimétriques.

B- Les granitoïdes :

Leurs compositions, très variables, évoluent depuis des granodiorites (Hohwald, Serva) jusqu'à de vrais granites. Les granodiorites ne diffèrent des diorites que par de plus grandes proportions de quartz (plus de 10%), le *plagioclase* généralement zoné restant largement dominant sur le *feldspath potassique*. Les granites au sens strict montrent une plus grande proportion de quartz ainsi qu'un *feldspath potassique* aussi abondant que le plagioclase. La *biotite*, toujours présente,

est le seul minéral coloré dans les granites; elle est associée à la *hornblende verte*, parfois dominante, dans les granodiorites.

Finalement, les plutonites du Champ du Feu montrent toutes les compositions intermédiaires entre les termes extrêmes de cette série au sein de laquelle une typologie précise, pétrographique et géochimique a été établie (Von Eller et De la Roche, 1969).

III- RELATIONS ENTRE DIORITES ET GRANITOÏDES.

Ces deux types de formations sont intimement associés quelle que soit l'échelle d'observation. Il est possible de mettre en évidence, en plusieurs régions du massif, le caractère contemporain de leur mise en place. Nous envisagerons successivement le cas de la granodiorite à enclaves de la Serva (Nord du massif) puis celui de la diorite de Neuntelstein plus au Sud.

A- Granodiorite à enclaves de la Serva :

Ce faciès se caractérise par une exceptionnelle richesse en enclaves de diorites, dites aciculaires ("Nadeldiorit" des auteurs allemands). Les principaux caractères de ces enclaves sont les suivants:

- contours le plus souvent nets mais pouvant aussi montrer un passage progressif.
- taille centimétrique à métrique, morphologie arrondie, généralement ovoïde mais parfois complexe, avec des formes très découpées, lobées (fig. 3-a)
- bordure d'épaisseur centimétrique à grain très fin.
- coeur montrant une texture "aculaire" avec des amphiboles en aiguilles fines, très allongées (section millimétrique pour une longueur atteignant 2 cm) et non orientées (fig. 3-b). L'apatite, très abondante, présente aussi systématiquement cette morphologie, constituant de très fines aiguilles, parfois tubulaires, dont le diamètre n'excède pas une dizaine de microns (fig. 3-c).
- Enfin, l'absence du pyroxène, même dans les enclaves les plus basiques ($\text{SiO}_2 < 50\%$) est à remarquer.

A la périphérie de ces enclaves on peut fréquemment observer une auréole claire, d'épaisseur centimétrique et essentiellement quartzo-feldspathique, qui s'interpose entre la matrice granitique et le corps des enclaves (fig. 3-b).

Les compositions minéralogiques des enclaves et de leur matrice se différencient par les proportions relatives des minéraux. En revanche les compositions chimiques de ces minéraux, analysés à la microsonde électronique, se révèlent pratiquement identiques.

Légende de la figure 3:

- 3a: granodiorite de la Serva, vue macroscopique. Remarquer la morphologie du contour de l'enclave (partie sombre) et l'existence d'une auréole claire à sa périphérie.
- 3b: Diorite à texture aculaire, vue microscopique. Les baguettes sombres sont formées par les cristaux d'amphibole.
- 3c: Diorite à texture aculaire, vue microscopique. Aiguilles d'apatite. La plus grande a une longueur de l'ordre de 250 microns pour une section de d'environ 5 microns.
- 3d : Contact entre la granodiorite du Hohwald (gros cristaux de plagioclases) et une enclave de la diorite de Neuntelstein (petits cristaux). Dans cette dernière, remarquer la fluidalité dessinée par l'orientation des cristaux en baguettes (plagioclases et amphiboles), parallèlement à la limite des deux matériaux. -vue microscopique.

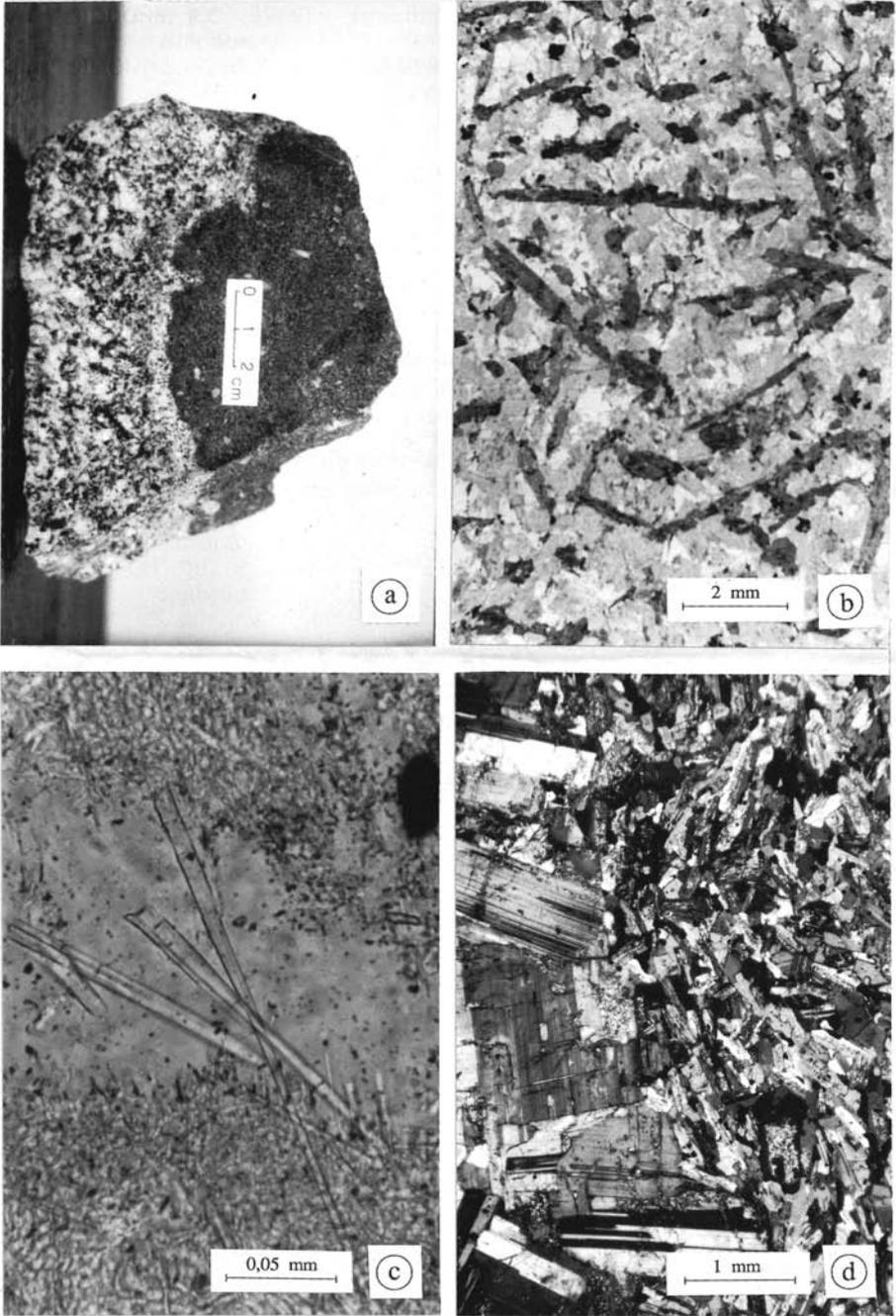


Figure 3 :

Tous ces caractères plaident en faveur d'une mise en place simultanée des deux matériaux, granitique et dioritique, mais avec des compositions, températures et viscosités assez contrastées pour s'opposer à leur mélange:

- la fragmentation des diorites en multiples "gouttelettes" au sein du granite implique que ce dernier était à l'état magmatique, ou incomplètement cristallisé, lors de l'injection du magma basique.

- le contraste de viscosité est responsable de la morphologie arrondie ou lobée des enclaves, la différence de température explique la présence de la bordure à grain très fin qui représente une bordure à refroidissement rapide du magma dioritique au contact du granite dont la température devait être sensiblement plus basse.

- l'identité de composition chimique des minéraux des enclaves et de leur matrice implique que leur cristallisation s'est réalisée dans des conditions physicochimiques comparables et donc vraisemblablement de manière simultanée.

- l'existence locale de passages progressifs entre les enclaves et leur matrice indique la possibilité d'hybridation partielle des deux magmas.

La texture aciculaire des enclaves, l'absence du pyroxène et l'existence d'une auréole claire à leur périphérie sont des caractères remarquables qui ont aussi été décrits dans des faciès de granites à enclaves dioritiques du massif de l'Adamello (Alpes italiennes). Ils y ont fait l'objet d'investigations expérimentales par Blundy et Sparks (1992).

Les travaux de ces auteurs démontrent la contemporanéité des deux magmas et permettent de préciser les conditions de leur mise en présence. Le magma basique, dont la température initiale est estimée à environ 1100°C, doit être injecté dans le matériel acide incomplètement cristallisé dont la température est voisine de 800°C. Ce contraste de température conduit à un refroidissement rapide du magma basique. La texture aciculaire résulte de ce processus. Le refroidissement rapide du magma basique jusqu'à des températures de l'ordre de 900-950°C, c'est à dire dans les conditions de stabilité de l'amphibole et du plagioclase, inhibe la cristallisation du pyroxène qui devrait se former en cas de refroidissement progressif.

Les mêmes auteurs ont aussi montré que le refroidissement des enclaves dioritiques doit s'accompagner d'une importante diminution de volume. Ce processus crée, en périphérie des enclaves, une zone en dépression relative qui collecte les liquides résiduels de la matrice granodioritique. La composition de ces liquides, très proches de l'eutectique et pratiquement dépourvus de minéraux colorés, implique que les granodiorites étaient en fin de cristallisation lors de l'injection du magma dioritique.

Nous suggérons que le filon microdioritique qui traverse tout le massif parallèlement à sa structure générale et le long duquel se répartissent les faciès les plus riches en enclaves, représente le conduit d'alimentation du magma basique, constituant ainsi un *dyke synplutonique* typique.

B- Diorite de Neuntelstein:

Cette unité dioritique, la plus importante du massif avec une largeur de l'ordre du kilomètre, montre un faciès dominant largement grenu (cristaux centimétriques). Ses relations avec les granitoïdes sont contrastées. Sur sa bordure nord, elle présente un contact net et une bordure à grain très fin impliquant une

intrusion nettement postérieure à celle du granite du Champ du Feu. En revanche, le contact avec la granodiorite du Hohwald, c'est à dire la bordure sud, montre une zone de "mélange" évoquant une *brèche magmatique* sur une largeur d'une centaine de mètres au moins. La granodiorite y contient des enclaves dioritiques représentant parfois plus de 50% du volume total de la formation.

Dans cette zone de "mélange" les enclaves ont des contours le plus souvent nets et une forme généralement arrondie quoique parfois complexe dans le détail. Elles possèdent une écorce centimétrique à grain fin dans laquelle une texture fluidale, marquée par l'orientation des minéraux parallèlement au contact avec la matrice granodioritique, est souvent observée (fig. 3-d). Cette texture implique que le matériel dioritique était bien à l'état magmatique lors de sa mise en contact avec la granodiorite du Hohwald.

La texture aciculaire n'a pas été observée dans cette zone, proche des diorites massives, où les enclaves représentent une proportion importante de l'ensemble. Elle existe en revanche dans les enclaves dispersées à plus grande distance du contact avec les diorites. Cette observation confirme que la texture aciculaire est bien liée à un refroidissement très rapide du magma basique, ce qui n'est envisageable que lorsque son volume est peu important (cas des enclaves dispersées).

En conclusion, les relations entre granodiorites et diorites, dans l'ensemble du massif du Champ du Feu, impliquent que les deux magmas sont pénécontemporains, l'injection du magma basique étant légèrement postérieure à celle du magma acide. Il est en effet nécessaire, pour rendre compte de la géométrie des intrusions dioritiques, que les granodiorites aient un comportement mécanique suffisamment rigide, c'est à dire que leur cristallisation soit déjà avancée (magma riche en cristaux) mais qu'il reste une part de liquide pour expliquer les interactions entre les deux matériaux et la morphologie très complexe de leurs contacts à l'échelle de l'échantillon ou de l'affleurement.

Soulignons enfin que toutes les figures d'interactions décrites entre les deux magmas sont communes dans les plutons calco-alcalins des régions orogéniques.

IV- DONNEES CHIMIQUES (Table 1)

Les plutonites du Champ du Feu constituent une lignée continue depuis les roches basiques et intermédiaires ($50 < \text{SiO}_2 < 60\%$) jusqu'aux granites (SiO_2 voisin de 70%). Leur disposition dans le diagramme modal Q.A.P. (fig. 4) confirme cette continuité. Les teneurs en Al_2O_3 sont élevées (18 à 20% pour SiO_2 voisin de 50%) et TiO_2 reste toujours inférieur à 1%.

Ces caractères sont classiques dans les séries calco-alcalines. L'absence de discontinuité entre les roches basiques et acides peut être l'expression d'une simple différenciation magmatique ou, plus vraisemblablement d'une hybridation partielle des deux magmas mis en présence.

Les données relatives aux éléments en traces confirment sans équivoque ce caractère calco-alcalin. Les termes basiques sont pauvres en Ni (12 à 38 ppm) comme en Cr (5 à 35 ppm) et relativement riches en Ba (340 à 640 ppm), Sr (310 à 455 ppm) et Rb (80 à 168 ppm) notamment. Les profils de terres rares normés aux chondrites (fig 5), avec des rapports $(\text{La}/\text{Yb})_N$ variant de 3,75 à 8,59 pour les diorites et de 9,10 à 11,82 pour les granitoïdes, sont aussi très typiques des séries calco-alcalines. On remarquera que les spectres des plutonites sont très

	N° Ech	CF 9	CF 15	CF 35	CF 40	CF 30	CF 39
Majeurs (% poids)	SiO2	64,12	69,26	71,91	54,63	53,16	56,95
	Al2O3	16,39	14,81	14,07	17,39	17,18	16,48
	Fe2O3t	4,77	3,12	2,04	8,83	9,71	7,76
	TiO2	0,56	0,38	0,23	0,99	1,09	1,01
	CaO	3,13	2,02	1,48	6,39	6,21	5,73
	MgO	1,69	0,87	0,41	3,92	4,67	3,28
	MnO	0,09	0,06	0,04	0,18	0,19	0,21
	K2O	3,34	3,96	3,75	2,21	2,01	2,52
	Na2O	3,71	3,59	4,64	3,18	3,12	3,65
	P2O5	0,17	0,12	0,03	0,27	0,29	0,24
	P.F.	1,94	1,52	1,11	1,62	2,14	1,68
	Total	99,91	99,71	99,71	99,61	99,77	99,51
Traces (ppm)	Ba	650	596	726	560	555	506
	Nb	8	8	11	10	9	10
	Zr	127	165	195	140	107	129
	Y	19	18	36	34	28	35
	Sr	386	211	148	383	393	325
	Rb	105	134	128	92	80	146
	Zn	75	56	35	141	134	108
	Cu	17	5	10	33	32	15
	Ni	18	15	19	22	33	14
	Cr	22	10	10	35	46	7
	V	83	34	10	194	223	173
Terres rares (ppm)	La	26,87	29,40	25,59	-	19,25	18,8
	Ce	47,92	53,31	46,27	-	37,87	41,14
	Nd	20,30	21,86	20,38	-	21,18	23,39
	Sm	4,24	4,62	4,70	-	5,33	5,93
	Eu	1,20	1,01	1,23	-	1,42	1,39
	Gd	3,83	3,61	4,08	-	5,14	5,74
	Dy	3,23	3,21	3,37	-	4,51	5,62
	Er	1,47	1,55	1,74	-	2,14	2,9
	Yb	1,70	1,77	1,81	-	2,24	3,38
	Lu	0,23	0,25	0,27	-	0,31	0,45

Table 1: Analyses chimiques représentatives des plutonites du Champ du Feu.

- CF 9 : Granodiorite du Champ du Feu (Rocher de l'Edelweiss).
- CF 15 : Granodiorite de la Serva (Col de la Perheux).
- CF 35 : Granite de Fouday (route de Fouday à Solbach).
- CF 14 : Enclave de diorite à texture aciculaire (Col de la Perheux)
- CF 30 : Diorite de Neuntelstein (Rocher de Neuntelstein).
- CF 39 : Enclave de diorite à texture aciculaire (Vallon de La Magel).

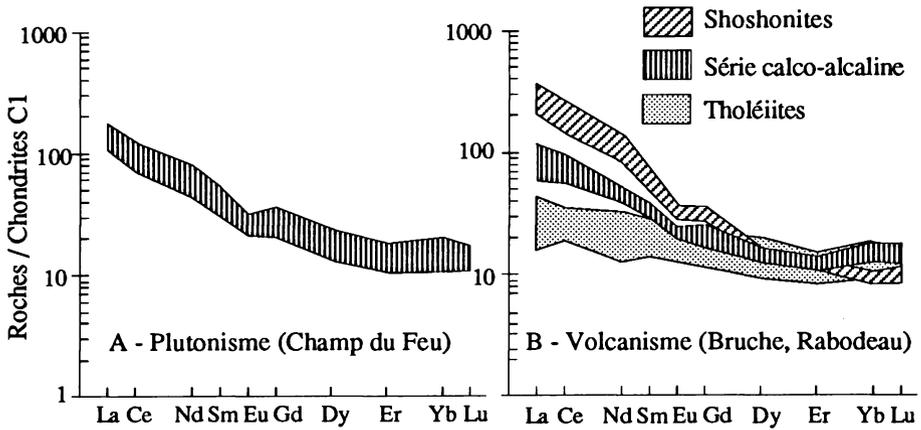


Figure 5: Spectres de terres rares, normés aux chondrites C1, du magmatisme des Vosges septentrionales.

Remarquer l'identité des spectres des plutonites et des volcanites calco-alcalines

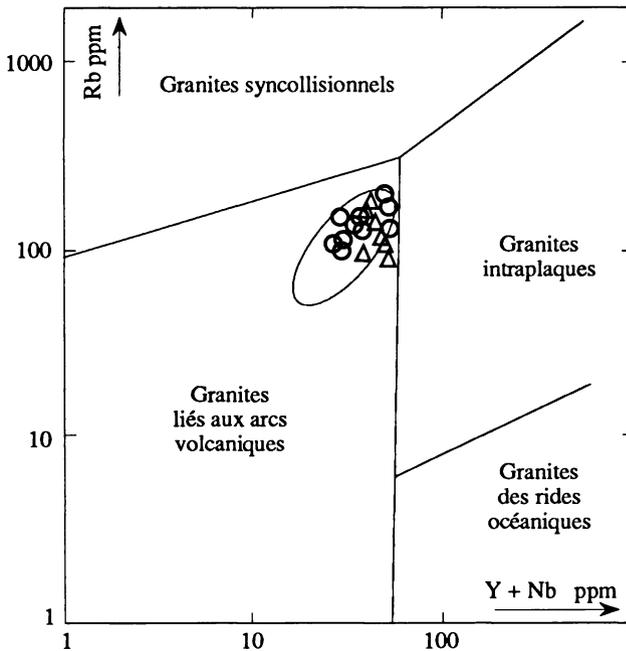


Figure 6 : Plutonites du Champ du Feu dans le diagramme de discrimination tectonique de Pearce et al. (1984)

○ granitoïdes △ diorites
 (○) granitoïdes de la Cordillère Occidentale du Chili

comparables à ceux des volcanites calco-alcalines du massif du Rabodeau et de la "bande volcanique médiane", ce qui pourrait impliquer une parenté entre les plutonites du Champ du Feu et les volcanites des séries encaissantes.

Le diagramme de discrimination géotectonique de Pearce et al. (1984) met enfin en évidence la ressemblance étroite entre les plutonites du Champ du Feu et les granitoïdes liés aux arcs volcaniques, notamment ceux de la cordillère occidentale du Chili, représentatifs du plutonisme lié à une subduction récente (fig. 6). Cette approche ne permet cependant pas de distinguer les granitoïdes contemporains des processus de subduction des granitoïdes post-collisionnels.

V- CONTEXTE GÉODYNAMIQUE

La caractérisation du contexte géodynamique, à l'époque de la mise en place du complexe plutonique du Champ du Feu, entre Dévonien supérieur et Carbonifère inférieur, demeure sujette à discussion.

Nous avons souligné la ressemblance du massif du Champ du Feu avec des plutons calco-alcalins plus récents dont la genèse est manifestement liée à des processus de subduction. Les caractères des terrains volcaniques voisins du Champ du Feu (Bruche, Rabodeau, bande volcanique médiane) renforcent cette ressemblance et nous conduisent à envisager la possibilité de liaison de l'ensemble de ce magmatisme avec la subduction de lithosphère océanique. Des associations magmatiques comparables sont cependant également possibles en contexte post-collisionnel, c'est à dire après la fin des subductions. Or, pour différents auteurs (Matte, 1991; Lagarde et al., 1992 par exemple), la chaîne hercynienne aurait atteint son stade collisionnel dès 380 Ma c'est à dire bien avant la mise en place du Champ du Feu.

Il est donc indispensable, pour tenter de lever l'incertitude sur le contexte qui prévalait lors de la formation du Champ du Feu, de prendre du recul et de s'interroger sur la situation et l'âge de la fermeture des aires océaniques au sein de la chaîne varisque.

1- Domaines océaniques dans la chaîne varisque:

Des études récentes ont mis en évidence, après un important épisode d'extension de la croûte continentale européenne au Cambro-Silurien, l'ouverture de deux domaines océaniques dans l'Europe hercynienne.

- Le premier (Pin, 1990; Matte, 1991) est représenté en France par une paléosuture qui s'étend (fig. 7) du Sud de la Bretagne (Ile de Groix) au Massif Central (Limousin) et peut-être aux massifs cristallins externes des Alpes (ophiolite de Chamrousse). Le métamorphisme haute pression (schistes bleus et éclogites) qui marque sa fermeture est daté d'environ 380 à 400 Ma (Peucat et al., 1982) c'est à dire du Dévonien inférieur.

- Le second, plus septentrional, est représenté par des affleurements sporadiques de roches à caractère ophiolitique reconnues notamment au Cap Lizard et dans les Sudètes polonaises et datées respectivement à 375 et 350 Ma (Davies, 1984; Pin et al., 1988). A ce domaine, situé entre les zones rhénohercynienne et saxothuringienne (fig. 7), se rattachent aussi probablement les basaltes océaniques dévoniens du Massif Schisteux Rhénan (Nappe de Giessen) et du Harz.

La fermeture de ce second océan, par subduction sur sa bordure sud (Massonne et Schreyer, 1983), est donc d'âge dévonien ou carbonifère précoce c'est

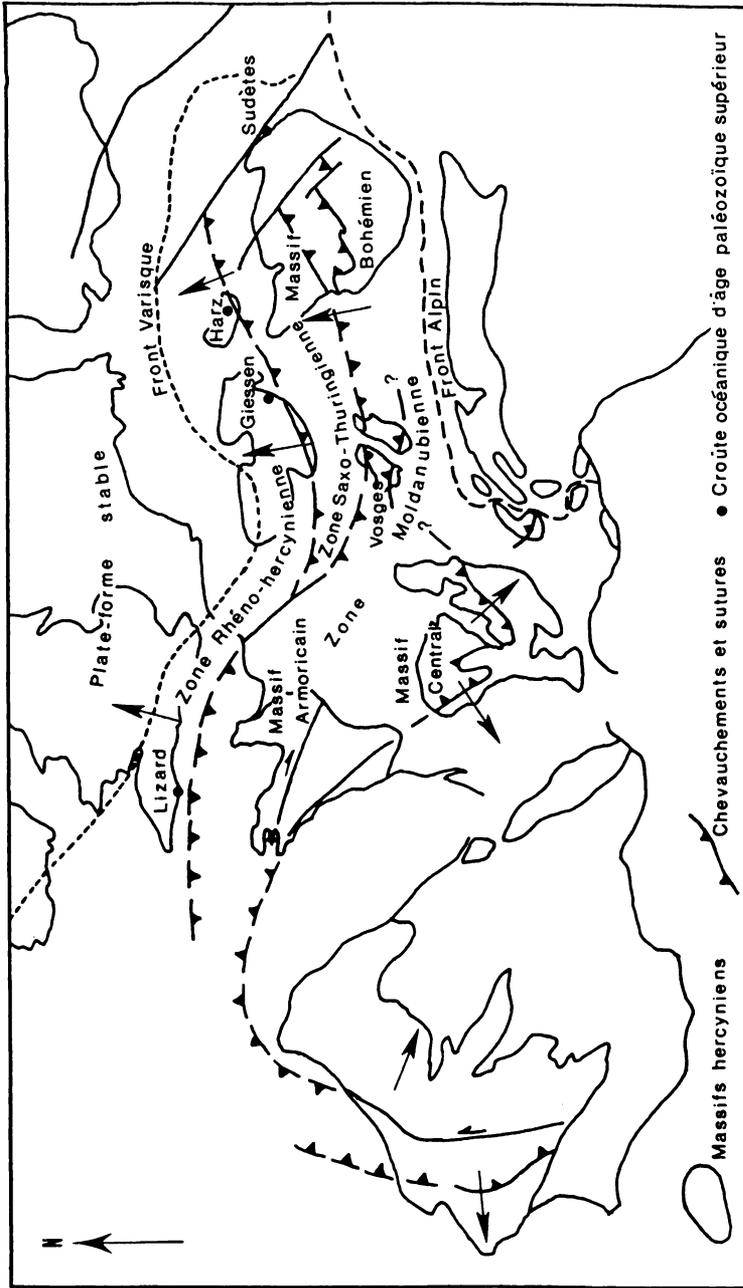


Figure 7: La chaîne varisque ouest-européenne avec situation des sutures continentales supposées (d'après Franke, 1989) Les flèches indiquent la polarité des structures plissées.

à dire contemporaine du magmatisme des Vosges du Nord. Nous pensons qu'elle pourrait rendre compte des caractéristiques de ce magmatisme à condition toutefois que l'océan en question ait atteint une largeur significative. Des incertitudes considérables subsistent cependant à cet égard:

- Les observations de Franke (1989) suggèrent une ouverture océanique limitée. En effet les basaltes océaniques dévoniens de Giessen sont recouverts par des flyschs synorogéniques dès le Dévonien supérieur, ce qui laisse peu de temps pour ouvrir un océan large. En revanche, les données géochimiques relatives à ces mêmes basaltes (Wedepohl et al., 1983) impliquent que l'ouverture a bien dépassé le stade d'un simple rift intracontinental (Pin, 1990).

- Les données paléomagnétiques et paléoclimatiques récentes (Van der Voo, 1988; Ocslon, 1994) plaident pour la réouverture, durant le Dévonien, d'un océan de largeur significative (de l'ordre de 2000km). Ce processus ferait suite à une première fermeture océanique responsable, au Dévonien inférieur, de l'orogénèse acadienne. La fermeture du nouveau domaine océanique, par collision d'âge fini-dévonien à carbonifère précoce, engendrerait la phase hercynienne au sens strict.

- Aïfa et al. (1990) confirment, sur la base de données paléomagnétiques également, l'existence d'un mouvement de convergence entre l'Afrique et l'Europe de l'ordre de 2500 km entre le Dévonien et le Carbonifère. Ils considèrent cependant que ce mouvement représente un raccourcissement crustal post-collisionnel. Un tel raccourcissement post-collisionnel, c'est à dire *intracontinental*, est-il réellement plausible ? Nous n'en sommes pas sûr et pensons au contraire que l'amplitude de ce mouvement de convergence pourrait constituer un argument supplémentaire en faveur de la fermeture d'un domaine océanique relativement large durant cette période.

- Les études morphoscopiques et les datations U/Pb des zircons détritiques du bassin rhénohercynien (Haverkamp et al., 1992) confirment également, par une méthode tout à fait indépendante des précédentes, l'existence d'une séparation durable entre ce bassin et le domaine saxothuringien durant le Dévonien.

Toutes ces données plaident donc bien en faveur de l'existence de ce domaine océanique durant le Dévonien supérieur. L'estimation de sa largeur reste cependant peu précise. La suture qui marque la cicatrice de cet océan jalonne la limite entre les zones rhénohercynienne et saxothuringienne de la chaîne (fig. 7). Elle n'est située qu'à environ 200 km au Nord du massif vosgien.

2- Discussion

L'hypothèse de la genèse du magmatisme du Nord des Vosges sous l'influence de la subduction de la lithosphère océanique rhénohercynienne peut donc être envisagée. Elle se heurte cependant aussi à des problèmes non résolus:

- l'une des objections principales réside en l'existence, dans les Vosges moyennes, de granites peralumineux datés entre 320 et 330 Ma (Montigny et al., 1983) et postérieurs aux chevauchements crustaux qui accompagnent la collision continentale. Ces granites, assurément post-collisionnels, sont donc à peine plus jeunes que le Champ du Feu. De plus, selon Rey et al. (1991), la mise en place de certains de ces granites est contemporaine d'une phase d'extension au cours de laquelle les chevauchements crustaux collisionnels ont joué en failles normales ductiles liées à l'effondrement gravitaire de la chaîne.

Il est clair que ces processus, s'ils sont confirmés, sont difficilement compatibles avec une situation dans laquelle les Vosges du Nord seraient encore, à la même époque, sous l'influence de la subduction de l'océan rhénohercynien, c'est à dire soumises à un régime essentiellement compressif.

- dans les Vosges méridionales, un important volcanisme d'âge carbonifère inférieur est également présent. Ce volcanisme est en tous points comparable à celui des Vosges du Nord dont il est contemporain. L'éventualité de sa liaison avec une subduction a aussi été envisagée par Lefèvre et al. (1994) et jugée peu probable par ces derniers considérant que tous les bassins océaniques dévoniens étaient déjà refermés à cette époque. Au demeurant, si nous envisageons la liaison du volcanisme des Vosges du Nord avec la subduction de l'océan rhénohercynien, il paraît difficile de relier le volcanisme du Sud au même processus, ces deux domaines étant séparés par la dislocation de Lalaye-Lubine et par les terrains métamorphiques des Vosges moyennes représentatifs de la croûte continentale profonde.

A ces deux objections on peut cependant opposer le fait que *nous ne connaissons pas les positions relatives des Vosges du Nord d'une part et des Vosges moyennes et méridionales d'autre part au Carbonifère inférieur*. La juxtaposition de ces deux régions le long de la dislocation de Lalaye-Lubine il y a environ 320 Ma (Matte et al., 1986) est en effet postérieure de plusieurs dizaines de millions d'années à l'activité magmatique des Vosges du Nord. L'amplitude du mouvement de coulissage dextre de cet accident n'est pas connue avec précision mais estimée à plusieurs centaines de kilomètres.

VI- CONCLUSIONS

Les résultats de notre étude mettent donc en évidence les faits suivants:

- Le massif du Champ du Feu représente l'entité majeure d'une association plutonique très volumineuse dont la mise en place succède de peu à un important complexe volcanique orogénique avec lequel il est, au moins en partie, apparenté.

- Au niveau de la chronologie relative des magmatismes basique et acide, et contrairement aux idées antérieures (Flück et al., 1991), les diorites ne représentent pas les formations les plus anciennes du Champ du Feu. Leur intrusion apparaît légèrement postérieure à celle des granodiorites.

- De même, la bande volcanique médiane, jusqu'à présent considérée comme représentant l'expression la plus ancienne du volcanisme des Vosges du Nord en constitue au contraire la forme la plus jeune et la plus évoluée, sub-contemporaine du plutonisme granodioritique du massif.

- Les relations des magmas acides et basiques sont typiques d'une mise en place synchrone mais sans hybridation notable, du moins au niveau actuel d'observation. Les données géochimiques mettent clairement en évidence le caractère calco-alkalin du massif. L'ensemble de ces caractères est compatible aussi bien avec une mise en place syn-subduction qu'avec un contexte post-collisionnel. Les différents outils de discrimination géochimique utilisés, y compris les plus récents, ne permettent pas de résoudre ce problème.

En conclusion, le magmatisme du Champ du Feu représente clairement les expressions synchrones d'un magmatisme basique d'origine mantellique et d'un

magmatisme acide résultant vraisemblablement de la fusion partielle de la croûte continentale inférieure. La contemporanéité de ces magmatismes et les interactions qui en découlent sont observées dans la majorité des complexes calco-alcalins.

L'incertitude sur les données chronologiques et paléomagnétiques ne permet pas, en l'état actuel des études, de prendre définitivement position sur le contexte géodynamique - syn-subduction ou post-collision - dans lequel s'est mis en place le massif. L'importance du volcanisme orogénique des Vosges septentrionales nous conduit cependant à envisager favorablement l'hypothèse de l'influence de la subduction même si cette dernière n'était plus active lors de l'intrusion des plutonites du Champ du Feu. Il est clair en effet que la subduction doit modifier durablement la composition du manteau sous-continentale et influencer ainsi la nature du magmatisme longtemps encore après la fermeture effective des aires océaniques.

BIBLIOGRAPHIE

- AÏFA T., FEINBERG H. AND POZZI J.P. (1990) Devonian-Carboniferous paleopoles for Africa: consequences for Hercynian geodynamics. *Tectonophysics*, 179, 287-304.
- BLUNDY J.D. AND SPARKS R.S.J. (1992) Petrogenesis of mafic inclusions in granitoids of the Adamello massif, Italy. *Journal of Petrology*, 33, 5, 1039-1104.
- BURRET C.F. (1972) Plate tectonics and the hercynian orogeny. *Nature*, 239, 155-157.
- DAVIES G.R. (1984) Isotopic evolution of the Lizard complex. *J. Geol. Soc. London*, 141, 3-14.
- DESCHAMPS M. (1991) Plutonisme calco-alcalin et évolution post-collision de l'orogénèse varisque dans la zone saxo-thuringienne: Le massif du Champ du Feu (Vosges septentrionales). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 312, II, 265-271.
- EDEL J.B., MONTIGNY R., ROYER J.Y., THUIZAT R. ET TROLARD F. (1986) Paleomagnetic investigations and K-Ar dating on the variscan plutonic rocks of the Champ du Feu and its volcanic-sedimentary environment, Northern Vosges, France. *Tectonophysics*, 122, 165-185.
- ELLER J.P. von (1964-69) Granitisation, dioritisation et métamorphisme dans les Vosges cristallines du Nord. *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 17, 3 (1964), 171-210; 18, 3 (1965), 117-143; 19, 2 (1966), 137-161; 22, 3 (1969), 185-198 et 199-233.
- FLUCK P., PIQUÉ A., SCHNEIDER J.L., WHITECHURCH H. (1991) Le socle Vosgien. *Sci. Géol. Bull., Strasbourg*, 44, 3-4, 207-235.
- FRANKE W. (1989) Variscan plate tectonics in central Europe - current ideas and open questions. *Tectonophysics*, 169, 221-228.
- GELDRON A. (1987) Génèse et contexte magmatique des stockworks à molybdénite de la chaîne hercynienne française. *Thèse Univ. Orléans*, 448p.
- HAVERKAMP J., HOEGEN J., KRAMM U. AND WALTER R. (1991-1992) Application of U-Pb systems from detrital zircons for paleogeographic

- reconstructions - a case study from the Rhenohercynian. *Geodinamica Acta (Paris)*, 5, 1-2, 69-82.
- IKENNE M., RASAMIMANANA G., BAROZ F. et BÉBIEN J. (1991) Magmatismes tholéïtiques et calco-alcalins d'âge dévono-dinantien dans le massif du Rabodeau (Vosges septentrionales). *Géologie de la France*, 1, 1991, 3-16.
- LAGARDE J.L., CAPDEVILLA R. ET FOURCADE S. (1992) Granites et collision continentale: l'exemple des granitoïdes carbonifères dans la chaîne hercynienne ouest-européenne. *Bull. Soc. Géol. France*, 163, 5, 597-610
- LEFEVRE C, LAKHRISSE M ET SCHNEIDER J.L. (1994) Les affinités magmatiques du volcanisme dinantien des Vosges méridionales (France); approche géochimique et interprétation. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 319, II, 79-86.
- MASSONNE H.J. AND SCHREYER W. (1983) A new experimental phengite geobarometer and its application to a Variscan subduction zone at the southern margin of the Rhenohercynicum. *Terra Cognita*, 3, 187 (Abstr.).
- MATTE PH. (1991) Accretionary history and crustal evolution of the Variscan belt in Western Europe. *Tectonophysics*, 196, 309-337.
- MATTE PH., RESPAUT J.P., MALUSKI H., LANCELOT J. ET BRUNEL M. (1986) La faille NW-SE du Pays de Bray: un décrochement ductile hercynien; déformation à 320 Ma d'un granite à 570 Ma dans le sondage Pays de Bray 201. *Bull. Soc. Géol. France*, (8), 2, 55-69.
- OCZLON M.S. (1994) North Gondwana origin for exotic variscan rocks in the Rhenohercynian zone of Germany. *Geol. Rundsch.*, 83, 20-31.
- PEARCE J.A., HARRIS N.B.W. AND TINDLE A.G. (1984) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, 4, 956-983.
- PIN C. (1999) Variscan oceans: Ages, origins and geodynamic implications inferred from geochemical and radiometric data. *Tectonophysics*, 177, 215-227.
- REVE J.M. (1985) Répartition de l'uranium et du thorium dans les roches alcalines des Vosges du Nord. *Thèse 3^{ème} cycle, Univ. Paris-Sud*, 136 p. + annexes.
- RIZKI A., DESCHAMPS M., BAROZ F. et BÉBIEN J. (1992) Le volcanisme de la bande médiane du Champ du Feu: sa place et sa signification dans le magmatisme dévono-dinantien des Vosges septentrionales. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 315, II, 995-1001.
- ROSENBUCH H. (1877) Die Steiger Schiefer und ihre Kontaktzone an den Granititen von Barr-Andlau und Hohwald. Traduction française : *Bull. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.*, 17, 2, 91-168.
- VOLKER F. AND ALTHERR R. (1987) Lower carboniferous calc-alkaline volcanics in the Northern Vosges: evidence for a destructive continental margin. *Terra Cognita*, 7, 174.
- WEDEPOHL K.H., MEYER K. AND MUECKE G.K. (1983) Chemical composition and genetic relations of meta-volcanic rocks from the Rhenohercynian belt of northwest Germany. In: H. Martin and F.W. Eder (Editors), *Intracontinental Fold Belts*. Springer, Berlin, 245-256.

LES PLANTES CARNIVORES, ESSAIS DE MICROPROPAGATION.

Jacques BOULAY

Université Henri Poincaré, Nancy I, Faculté des Sciences, Laboratoire de Biologie Forestière, associé INRA, Equipe Vitro méthodes et Variabilité, BP 239, 54506 Vandœuvre Cédex, France

accepté pour publication le 3 mai 1995

RESUME

La plupart des plantes carnivores connues sont classées parmi les espèces protégées soit au niveau national, soit au niveau international par la Convention on International Trade in Endangered Species de Washington.

Une des solutions de préservation des espèces végétales en voie de disparition est la culture *in vitro*. Dans cette optique, des essais de micropropagation de représentants des principaux genres de plantes carnivores ont été effectués.

Actuellement, plus de trente espèces des genres *Dionaea*, *Drosera*, *Sarracenia*, *Darlingtonia* et *Nepenthes* sont cultivées *in vitro*. Seize de celles-ci sont classées parmi les espèces citées dans le C.I.T.E.S.

Plantes carnivores, micropropagation, *Droseraceae*, *Sarraceniaceae*, *Nepenthaceae*.

CARNIVOROUS PLANTS, MICROPROPAGATION ASSAYS

ABSTRACT

Most of the carnivorous plants are listed in list of the protected species either at national level or international level by the Convention on International Trade in Endangered Species of Washington.

A solution to preserve vegetal species is vitro culture. With this object, assays of vitrocultivating have been done with the main genera of carnivorous plants.

Actually, more than 30 species of the genera *Dionaea*, *Drosera*, *Sarracenia*, *Darlingtonia* and *Nepenthes* are micropropagated. 16 are listed in the C.I.T.E.S.

Carnivorous plants, micropropagation, *Droseraceae*, *Sarraceniaceae*, *Nepenthaceae*.

Note présentée à la séance du 09 Février 1995 par M. J. Fr. PIERRE.

INTRODUCTION.

Les 570 espèces environ que comptent les plantes carnivores sont classées en 11 familles. Elles sont présentes sur les quatre continents dans des milieux pauvres tels que les tourbières acides, les marécages, la forêt vierge, les tépuy (Vénézuéla).

Les plantes carnivores sont étroitement adaptées aux milieux naturels particuliers dans lesquels elles se développent. En effet, elles sont capables de coloniser des sols dont les caractéristiques physico-chimiques sont telles qu'elles rendent impossible la minéralisation de la matière organique.

Les plantes carnivores pallient à cette carence trophique en se nourrissant de petits arthropodes (insectes et arachnides) qu'elles capturent. La grande variabilité des systèmes de capture, mis en place par ces plantes, leur confère un attrait scientifique particulier. De plus, certaines espèces, comme *Drosera rotundifolia* L., sont actuellement encore utilisées dans l'industrie pharmaceutique.

Toutefois, du fait de cette adaptation extrême, le devenir de ces plantes est étroitement lié à celui de leurs biotopes, actuellement menacés de disparition. C'est la raison pour laquelle la majorité d'entre elles sont protégées aussi bien au niveau national qu'au niveau international. C'est le cas des *Nepenthes* classés en annexe I (*N. rajah* HOOK. et *N. khasiana* HOOK.) et en annexe II du C.I.T.E.S. (Convention on International Trade in Endangered Species).

Une des solutions de préservation de ces espèces est la culture *in vitro*. Cette technique permet d'une part, la conservation d'espèces rares maintenues dans des conservatoires botaniques et d'autre part, elle permet la multiplication à grande échelle de la *Dionée* (*Dionaea muscipula* ELLIS ex L.) et de certaines *Droseras* offrant ainsi au public quelques unes des plantes les plus spectaculaires.

L'application des techniques de culture *in vitro* à la multiplication des plantes carnivores nécessite une mise au point méthodologique préalable. Ce travail a été mené en étroite collaboration avec le Conservatoire Botanique du Montet, à Nancy, et l'Association Française d'Amateurs de Plantes Carnivores DIONEÉ.

MATÉRIEL ET MÉTHODES.

Plantes testées.

Les essais ont été menés sur les genres *Dionaea* (*Dionaea muscipula* ELLIS ex L.), *Darlingtonia* (*Darlingtonia californica* TORR.), *Nepenthes*, *Drosera* et *Sarracenia*. La diversité de ce matériel biologique permet de couvrir l'ensemble des familles principales des plantes carnivores.

Dionaea muscipula présente l'avantage de produire facilement des graines.

Les espèces de *Nepenthes* ont été retenues selon des critères de préservation et cultureaux. Les *Nepenthes* étant classés en deux groupes cultureaux, de haute ou de basse altitude (Danser, 1928), les essais préalables ont été faits sur *N. lowii* HOOK. (de haute altitude) puis sur *N. rafflesiana* JACK. (de basse altitude).

Les trois classes de *Drosera* sont déterminées d'après leur répartition géographique et leur biotope : les *Droseras* en rosette, présentes en Europe, Afrique, Amérique, Australie ; les *Droseras* tubéreuses et les *Droseras* pygmées spécifiques des déserts australiens où elles subissent une période de forte sécheresse estivale au cours de laquelle elles entrent en repos (Lowrie, 1989). La partie aérienne apparaît pendant la saison hivernale et simultanément se forme le bulbe en préparation à la période de repos. En été, la partie aérienne disparaît. Les essais d'introduction et de multiplication ont été faits sur *D. capensis* L. et *D. adelae* F.MUELL. (*Droseras* à rosette) puis sur *D. peltata* THUNB., *D. gigantea* LINDL., *D. erythrorhiza* LINDL. (*Droseras* tubéreuses). Nous n'avons pas pu obtenir de graines de *Droseras* pygmées.

Les espèces de *Sarracénias* ont été choisies pour leur localisation géographique. *S. flava* L. est originaire du New-Jersey (Etats-Unis) et *S. purpurea* var. *purpurea* L., de St Pierre et Miquelon.

Techniques de culture in vitro.

L'application des techniques de culture *in vitro* se déroule suivant trois étapes principales :

- L'étape d'introduction consiste à faire germer les graines.
- L'étape de multiplication proprement dite, où les plantules obtenues par germination sont divisées pour former plusieurs individus.
- La phase d'acclimatation consiste à transférer les plantes sur leur milieu définitif.

Les conditions de culture étant, d'une façon générale, favorables au développement de tous les organismes (pathogènes et autres), les deux premières étapes sont réalisées en conditions aseptiques, pour inhiber toute prolifération indésirable.

Lors de la phase d'introduction, les graines sont, dans un premier temps, mises à tremper dans un mouillant (le mercryl laurylé). Ceci a pour

but de favoriser leur imbibition. Les graines sont ensuite désinfectées pendant 10 à 15 min. dans une solution d'hypochlorite de calcium à 5% (Vidalie H., 1989). Après rinçage à l'eau distillée stérile, elles sont déposées sur un milieu nutritif de Murashige et Skoog (Murashige *et al.* 1962) et maintenues à 25°C, avec une photopériode de 12 h. Ce dispositif tend à réunir les conditions les plus favorables au développement de ces organismes végétaux.

Le délai d'obtention des plantules varie de 2 à 3 semaines selon les espèces. Chez *Drosera* il peut aller jusqu'à 10 semaines. L'individu formé à la suite de la germination d'une graine, va produire des rejets aboutissant ainsi à la mise en place d'une touffe d'individus. Les individus composant ces touffes sont ensuite séparés avant d'être repiqués sur un milieu de multiplication. Il s'agit du milieu de Murashige et Skoog auquel un facteur de croissance a été ajouté (AIB à 0,5 mg/l). Cette auxine favorise la rhizogenèse. Cette étape de multiplication et de repiquage permet à la fois de multiplier le nombre d'individus et de conserver l'espèce.

Techniques d'acclimatation.

Pour l'ensemble des espèces, l'acclimatation, ou transfert, est une phase délicate qui se mène progressivement. En effet, les plantes, jusque là, maintenues dans des conditions favorables à leur croissance (température, éclaircissement, nutrition, humidité, absence de pathogènes et parasites...) sont transférées dans un milieu qui leur est beaucoup moins favorable. Afin de limiter les pertes inévitables inhérentes à cette étape, de nombreuses précautions sont prises. La plante est extraite du bocal. L'agar qui adhère aux racines, pouvant être une source de contamination, est éliminé par rinçage dans de l'eau distillée. Les éventuelles attaques parasitaires sont également limitées par un passage rapide des racines dans une solution antifongique (Bénomyl à 1g/l). Les touffes trop compactes sont séparées et repiquées dans des bacs contenant un mélange composé de tourbe blonde de sphaigne et de perlite en proportion 3:1 (Slack A., 1988). Les bacs sont placés dans des mini-serres maintenues entrouvertes afin d'éviter une atmosphère confinée trop humide, favorable au développement des moisissures. Les mini-serres sont placées à température ambiante et exposées à une lumière indirecte.

Au bout de trois semaines à un mois, les plantes sont repotées séparément, dans leur compost définitif. Elles sont alors exposées à la lumière directe.

RÉSULTATS ET DISCUSSION.

Pour une même famille, les protocoles de mise en culture sont très variables suivant les exigences écologiques de la plante vis à vis de son milieu naturel.

Essais avec Dionaea muscipula

Dionaea muscipula se prête très bien à la culture *in vitro*. Les rosettes peuvent atteindre jusqu'à 6 cm de diamètre.

Elle présente une certaine capacité de régénération. En effet, une culture âgée de 3 mois, maintenue dans un milieu nutritif riche en auxines (AIB à 0,5mg/l.), est capable de néoformer des plantules sur les feuilles et les pièges. Leur repiquage par contre donne des résultats très variables, avec un fort taux (jusqu'à 50%) de vitrification (nécrose de la plante qui présente alors un aspect vitreux). Pour un même lot de graines, nous avons obtenu trois variétés différant entre elles par la couleur de leurs pièges. Certains individus ont des pièges présentant une face externe verte et une face interne orange. D'autres produisent des pièges verts à l'extérieur et rouges à l'intérieur, alors qu'une troisième variété possède des organes de capture entièrement rouges. C'est probablement, un amalgame de graines provenant de différentes variétés de *Dionaea muscipula* qui est à l'origine de cette variation morphologique. Toutefois, les semences utilisées dans cette étude sont issues d'une collection privée, il est donc impossible de contrôler leur origine génétique. La variété à pièges entièrement rouges est plus délicate à repiquer. Les plantules vitrifient plus facilement lors du changement de milieu. La formation de racines se fait spontanément sur un milieu de multiplication (apport d'auxines).

L'acclimatation de la *Dionée* ne pose pas de problèmes particuliers à condition qu'un fort taux d'humidité et d'éclairement soit maintenu. Au bout de trois semaines, les Dionées peuvent être repotées dans leur pot définitif. Au bout de trois mois, dans de bonnes conditions, la rosette peut atteindre 10 à 12 cm de diamètre.

Essais avec Darlingtonia californica

Les graines de *Darlingtonia californica* possèdent un tégument duveteux qui leur confère un caractère fortement hydrophobe. Par conséquent, la désinfection de ces graines se déroule sous vide.

La croissance est rapide et la division de touffe ne présente aucune difficulté, la plante croissant naturellement en rhizome. Par contre, en culture *in vitro*, le stade juvénile de *s* est d'une plus longue durée que celui observé dans les conditions naturelles. En effet, ce n'est qu'au bout de deux ans que les pièges caractéristiques, en forme de cobra, apparaissent.

L'acclimatation s'est révélée des plus délicates pour plusieurs raisons. D'une part, même sur un milieu inducteur de la rhizogenèse, *Darlingtonia* produit peu de racines. De plus, cette espèce est particulièrement sensible aux attaques fongiques. Ainsi, lors de l'acclimatation, il est indispensable

de bien séparer les touffes et de les traiter avec un antifongique. Le compost doit être humide mais pas détrempé. La jeune plante doit pas être placée dans une atmosphère confinée. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec la mini serre entrouverte.

Essais avec le genre Nepenthes

Les graines de *Nepenthes* sont très fragiles. Leur durée de vie est variable suivant les espèces, et le taux de réussite dépend, en grande partie, des conditions de conservation de ces graines. Il est possible de les conserver plusieurs mois à 4°C même s'il est recommandé de les mettre à germer le plus tôt possible. Son tégument étant très fin, le temps de désinfection de la graine doit strictement correspondre à l'attaque du tégument afin d'éviter que l'hypochlorite de calcium n'atteigne l'embryon qui n'est pas protégé par un tissu de réserve. Le taux de germination est cependant très faible : environ 20% et parmi lesquels 30% ne dépassent pas le stade dicotylédone. Cependant, ces résultats ne peuvent être généralisés à l'ensemble des *Nepenthes* ni même à une espèce. En effet, trop de facteurs extrinsèques à l'espèce (conditions de récolte, de stockage...) interviennent avant la mise en culture. Ainsi, les résultats diffèrent sur une même espèce, selon les travaux (Redwood, 1990).

Le cap délicat de la germination étant passé, les résultats sont très variables suivant les espèces. *N. lowii* se multiplie très bien par division de touffe, mais il reste de taille petite, présentant des ascidies (pièges en forme d'urnes) mais pas d'activité rhizogène. Par contre, les espèces comme *N. rafflesiana*, *N. mirabilis* DRUCE, *N. gracilis* KORTH., atteignent des tailles comparables à celles obtenues avec une croissance en serre, avec formation d'ascidies et une forte production racinaire. Cette différence de croissance pourrait trouver une explication dans le fait que *N. lowii* soit une espèce de haute altitude alors que les autres *Nepenthes* sont de basse altitude (Danser, 1928). En effet, la température constante de la salle de culture (25°C) pourrait générer un effet de serre à l'intérieur du bocal en verre provoquant ainsi une condition de croissance défavorable aux *Nepenthes* de haute altitude. Des essais alors ont été fait dans des bocal en plastique de type Magenta (Prolabo), placés à une température plus faible (20°C). Dans ces nouvelles conditions, les *Nepenthes* de haute altitude doublent de volume et présentent une croissance plus vigoureuse. La multiplication peut se faire par division de touffe, ou par bouturage de la plante. L'ablation de la partie apicale de la plante stimule le développement des bourgeons axillaires. Après deux repiquages, il est possible de séparer les jeunes plants ainsi obtenus du pied-mère.

Les résultats de multiplication sont variables suivant les espèces. Les espèces de basse altitude ont un taux de multiplication bien supérieur aux espèces de haute altitude (de 3 à 5 fois). De plus, la durée de subculture est la plus longue de toutes les plantes carnivores cultivées : 4 mois. Des essais de périodes de repiquage plus courtes entraînent une baisse de production d'ascidies et une baisse de vigueur des plantes. Le repiquage semble provoquer un stress particulièrement important chez ces plantes.

La vitesse de croissance, qui détermine en grande partie la période entre deux repiquages successifs, est également très différente entre les espèces de haute et de basse altitude. Chez les espèces de haute altitude, la croissance est très lente et la plupart des pieds sont peu vigoureux. Il se peut que les conditions de culture ne soient pas optimales, comparativement aux résultats obtenus par les travaux de Redwood (Redwood, 1990). En effet, ces plantes nécessitent de grands écarts de températures jour / nuit, ce que n'offre pas la salle de culture. En outre, des essais de nouveaux milieux sont en cours.

L'acclimatation des *Nepenthes* se déroule dans une atmosphère fermée, sous un éclairage moyen qui favorise la rhizogenèse. Les explants peuvent être sortis des mini-serres au bout de deux mois.

Essais avec le genre Drosera

Les graines de *Drosera* sont de très petite taille (à peine un millimètre de long). Il a donc fallu adopter une technique de désinfection proche de celle utilisée pour les graines d'Orchidées. La taille des semis rend impossible le calcul du pourcentage de germination. Les graines de *Drosera* se conservent très mal. Par conséquent l'intervalle de temps séparant la récolte des semences et leur mise en culture, doit être le plus réduit possible. Ainsi, des graines "fraîches" provenant de collections françaises (*D. capensis* et *D. adelae*) germent dans une proportion de 60% alors que des graines originaires d'Australie n'ont donné qu'un faible pourcentage de germination, allant jusqu'à 1% pour *D. gigantea*.

La multiplication des *Droseras* en rosette peut être obtenue de différentes façons. La division de touffe donne un enracinement de la plante au cours du deuxième mois. Les racines ainsi produites ont toutes un diamètre plus important que celui des racines de plantes cultivées en serre. La croissance est variable suivant les espèces. Il a été constaté que les *Droseras* à rosette présentent toutes une croissance rapide ainsi qu'une formation de racines très vigoureuses. Lorsque la multiplication est obtenue par séparation des plantules émergeant des racines, des différences ont été constatées dans la formation des pièges. Ainsi, *D. binata* présente des pièges avortés ; les deux branches restant enroulées sur elles-mêmes. Par contre les boutures de feuilles n'ont jusqu'ici pas donné de résultats concluants. En ce qui concerne les *Droseras* tubéreuses, à port érigé, leur multiplication est obtenue par division de touffe. Elles génèrent toutes des pièges fonctionnels. Toutefois, la plante de *D. peltata* dépérit vite, mais une nouvelle pousse repart au niveau d'un bourgeon axillaire situé à 3 ou 4 nœuds du bourgeon terminal. Cette nouvelle pousse présente les mêmes caractéristiques que la plante-mère : avec une partie aérienne à port érigé, munie de pièges, et une racine, unique, d'1 cm environ. La formation des bulbes ne s'est pas produite chez *D. peltata* en trois ans de culture. Par contre, chez *D. gigantea*, plusieurs formations de bulbes ont été observées dans des cultures non renouvelées depuis quatre mois.

Ces bulbes ont été retirés pour des essais d'acclimatation. Actuellement, des essais d'induction de formation de bulbes sont en cours sur d'autres espèces. Leur formation pourrait faciliter l'acclimatation des *Droséras* et leur conservation hors du bocal. L'acclimatation des *Droséras* ne pose aucune difficulté particulière, on obtient jusqu'à 80% de réussite pour *D. capensis* et *D. adelaë*. *D. binata*, formant des touffes compactes, doit être préalablement traitée avec un antifongique.

Essais avec le genre *Sarracenia*

Les graines de *Sarracenia* étant à l'état de dormance, elles nécessitent une préparation préalable à leur introduction. Cette dormance est levée par un traitement des graines de 3 semaines à 4°C, puis elles sont imbibées pendant 24 h. dans de l'eau distillée.

Après la germination, le repiquage se fait toutes les 10 semaines sur un milieu Murashige et Skoog de multiplication. L'induction racinaire est obtenue spontanément, sans avoir recouru à un milieu particulier.

Lors du transfert, il convient de séparer les touffes afin d'éviter l'apparition de moisissures. Le taux de réussite a été de 90% environ. Les *S. purpurea* acclimatées présentent une grande vigueur de croissance. Il n'y a pas eu d'essai de transfert effectué sur *S. flava*.

CONCLUSION.

La culture *in vitro* s'est révélée particulièrement efficace chez *Dionaea*, et pour toutes les espèces de *Drosera* et de *Sarracenia*. Le taux de multiplication est de 5 à 6, voire 10 chez certaines *Drosera* et la période entre deux repiquages successifs est courte (environ deux mois). Pour les *Sarracenia*, celle-ci est plus longue : 3 mois environ.

Concernant les *Nepenthes*, la fraîcheur des graines est un facteur essentiel de réussite de germination lors de l'introduction (Redwood *et al.*, 1990). Comparativement aux autres espèces de plantes carnivores, la période nécessaire entre deux repiquages est très longue et le taux de multiplication est très faible entre chaque subculture (1,5 à 2) surtout pour les *Nepenthes* de haute altitude. Cependant, si on compare la culture *in vitro* avec les méthodes traditionnelles de multiplication (bouturage, marcottage), celle-ci se révèle de loin la plus efficace. Le microbouturage *in vitro* réussit à 95% alors qu'en méthodes traditionnelles, la réussite n'est que de 20% en moyenne.

Le transfert n'a, pour les espèces cultivées, présenté aucune difficulté particulière. La période la plus délicate étant le passage progressif de l'air confiné de la cloche de propagation à l'air libre. Le taux de réussite n'est cependant pas toujours aussi élevé : *Byblis gigantea* LINDL., s'acclimate très difficilement. Chez ceux qui y sont parvenus, le taux ne dépasse pas 5% (Guy Sez nec, communication personnelle).

Actuellement, plus 30 espèces différentes de plantes carnicores sont cultivées en laboratoire, dont 16 sont classées parmi les espèces protégées par la Convention de Washington.

REMERCIEMENTS.

A Mr le Professeur J.M. FAVRE qui m'a si aimablement ouvert son laboratoire, ainsi qu'à toute son équipe.

A MM. P. VALCK, Conservateur, B. CUNIN et G. SEZNEC des Jardins et Conservatoires botaniques du Montet pour leurs précieux conseils et leur étroite collaboration.

A tous les membres de l'association DIONEE et de International Carnivorous Plant Society pour leurs nombreux dons.

BIBLIOGRAPHIE.

DANSER B.H., 1928 - The Nepenthaceae of the Netherlands Indies. Bull. Jard. Bot. Buitenz., Ser. III. Vol. IX, 275 p.

DEGREEF J.D., 1994 - Vleesetende Planten. Drosera vzw, Plantentuin Universiteit Gent, 25 p.

LOWRIE A., 1989 - Carnivorous plants of Australia, vol.2, University of Western Australia Press, 282 p.

MURASHIGE T., and SKOOG F., 1962. A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiol.Plant.* 15 : 473-497.

REDWOOD G., BOWLING D., 1990 - Micropropagation of Nepenthes species, *Botanic Gardens Micropropagation News*, vol.1, 2, 19-20

SEENI S., 1990 - Micropropagation of some rare plants at the tropical Botanic Garden and Research Institute, Trivandrum, India. *Botanic Gardens Micropropagation News*, vol.1, 2, 16-18

SLACK. A., 1988 - Les plantes carnivores, comment les cultiver ? ed. Diagone-Calmann. Levy, Paris, 172 p.

VICTOR A. ALBERT, STEPHEN E. WILLIAMS, WARK W. CHASE, 1992 - Carnivorous plants : phylogeny and structural evolution. *Science*, 257, 1491-1495

VIDALIE H., 1989 - La culture in vitro et ses applications horticoles. 3^eed., ed. Lavoisier, Paris, 225 p.

**INFLUENCE DE LA PRESENCE D'UN COMPOSE
GRAPHITE-FeCl₃ LORS DE LA CARBONISATION D'UN BRAI
DE HOUILLE**

**ROLE OF THE GRAPHITE-FeCl₃ COMPOUND DURING THE
PYROLYSIS OF A COAL TAR PITCH**

**Emmanuelle ALAIN, Dominique BEGIN, Guy FURDIN, et
Jean-François MARECHE**

Laboratoire de chimie du solide minéral, URA-CNRS 158, Université Henri
Poincaré, BP 239, 54506 Vandoeuvre les Nancy cedex.

Note présentée à la séance du 06 avril 1995 par M. J. FLEHON.

Note acceptée pour publication le 10 juillet 1995.

RESUME

Nous décrivons dans cet article la synthèse d'une nouvelle variété de charbon actif en employant une méthode nouvelle et originale. En effet, la copyrolyse de brai de houille et de composé d'insertion du graphite (graphite- FeCl_3 (GIC)) doit permettre d'élaborer des semi-cokes chargés qui après activation conduisent à des matériaux aux propriétés adsorbantes sélectives.

Nous avons étudié le rôle du GIC lors de la pyrolyse des mélanges brai-GIC : la nette augmentation du rendement en semi-coke traduit l'activité catalytique de l'acide de Lewis FeCl_3 qui se désorbe des particules de GIC au cours de la pyrolyse. L'étude de la stabilité thermique du GIC (de formule C_7FeCl_3) a montré que la désorption de FeCl_3 s'effectue principalement entre 350 et 500°C, domaine de température au cours duquel le brai se transforme en semi-coke. Une étude détaillée de la mésophase (phase intermédiaire entre le brai et le semi-coke) a mis en évidence le rôle catalytique du GIC lors de cette transformation.

Enfin, les premiers essais quant au pouvoir adsorbant des semi-cokes activés sont prometteurs vis à vis de l'adsorption d'espèces gazeuses soufrées comme H_2S .

ABSTRACT

The synthesis of a new kind of adsorbent has been carried out, using an original method. Green cokes were elaborated from the pyrolysis of a coal tar pitch mixed with first stage FeCl_3 -graphite intercalation compounds (GIC). Carbonaceous materials with adsorbent properties can be obtained after activation of these green-cokes.

The influence of the GIC during the pyrolysis of mixtures of coal tar pitch-GIC has been studied : the presence of the Lewis acid (FeCl_3), because of its catalytic effect, leads to an increase in the green-coke yield. Thermal stability of the first stage GIC (which can be approximately formulated : C_7FeCl_3) under the same heat treatment conditions has been followed : the most significant desorption of FeCl_3 takes place in the same temperature range as that of the transformation of coal tar pitch into green-coke. Study of the mesophase (intermediate phase between coal tar pitch and green-coke) shows the catalytic effect of the GIC during this step. Finally, the adsorbing properties of the activated green cokes have been studied with gases such as H_2S .

MOTS-CLES : brai de houille, composé d'insertion du graphite, mésophase, pyrolyse, semi-coke, charbons actifs.

KEY-WORDS : coal tar pitch, graphite intercalation compound, mesophase, pyrolysis, green coke, adsorbents.

INTRODUCTION

Actuellement, les matériaux adsorbants et plus particulièrement les charbons actifs présentent un regain d'intérêt dû aux problèmes engendrés par la pollution de l'air ou encore de l'eau. Le but de notre travail est donc d'élaborer des matériaux carbonés dotés de propriétés adsorbantes spécifiques, c'est à dire des matériaux caractérisés par une texture poreuse développée, mais aussi une surface qui présente une sélectivité vis à vis de divers polluants.

Les brais de houille, solides à température ambiante, voient leur viscosité diminuer lorsqu'ils sont pyrolysés en atmosphère neutre : le milieu obtenu à environ 400°C est appelé phase plastique ou plus communément mésophase. Ensuite, le milieu se ressolidifie assez brutalement vers 500°C; cette dernière étape de la pyrolyse est accompagnée par le départ de matières volatiles qui entraîne l'appartition d'une porosité dans le semi-coke obtenu.

L'idée originale de ces travaux consiste à ajouter au brai de houille des particules de graphite initialement intercalées par FeCl₃. La littérature fait déjà état de l'effet gazéifiant d'un acide de Lewis tel FeCl₃ pendant la pyrolyse quand celui-ci est mélangé à du charbon (Lessing, 1925; Georgiadis, 1956), mais sa stabilité thermique est faible et sa température de sublimation peu élevée. C'est pourquoi, l'utilisation d'un composé d'insertion permet de prolonger l'activité de FeCl₃ lors de la pyrolyse. Le GIC assurera donc un effet gazéifiant au moment de la transformation mésophasique du brai ce qui devrait générer la formation d'une importante porosité. De plus, les semi-cokes obtenus seront "chargés" de l'hétéroélément fer, conséquence de la désorption de l'intercalat; l'activation de ces derniers conduira à des matériaux dont les propriétés adsorbantes spécifiques seront en relation avec la présence de fer dans la matrice carbonée.

Nous aborderons cette étude en décrivant tout d'abord la préparation et la stabilité thermique des GIC, suivi de la caractérisation des mélanges brai-GIC (Furdin et al, 1994). La deuxième partie fera référence à l'étude effectuée au niveau de la transformation mésophasique du brai lors de sa pyrolyse. Enfin, une dernière partie sera consacrée au rôle du GIC au niveau de la pyrolyse des mélanges.

TECHNIQUES PREPARATIVES ET METHODES D'INVESTIGATION

MATERIAUX PRECURSEURS

Un brai de houille est obtenu par distillation des goudrons issus de la fabrication de coke sidérurgique. Ce matériau composé à plus de 90% de carbone est constitué d'un mélange complexe de molécules aromatiques plus ou moins substituées. Le brai 1,142 utilisé pour notre étude, nous a été fourni par la société

Huiles, Goudrons et Dérivés (HGD, Atochem). Sa composition élémentaire est reportée dans le tableau I.

Tableau I : Analyse élémentaire du brai de houille 1,142
(% massique)

C	H	N	S	O	C/H*	Cendres
92,4	4,6	1,05	0,59	1,36	1,67	0,3

* : rapport molaire

Le graphite est formé par l'empilement de couches composées d'hexagones réguliers dont les sommets sont occupés par les atomes de carbone. Ces feuillets plans sont séparés par une distance caractéristique de 0,335 nm (Figure 1a). De par leur structure et leur caractère amphotère, le graphite possède la particularité de pouvoir accepter des molécules au niveau des espaces de Van Der Waals séparant chaque feuillet de graphène. Les composés obtenus sont appelés composés d'insertion (GIC) dont une des caractéristiques principales est le stade (voir Figure 1b); il correspond au nombre de feuillets de graphène qui sépare deux couches successives d'intercalat. Le graphite utilisé pour la synthèse des composés graphite- FeCl_3 est un graphite naturel finement broyé à sec (variété appelée UF4, fournie par Le Carbone Lorraine). Il présente un histogramme de répartition granulométrique compatible avec un diamètre médian de 5 μm . C'est un matériau polycristallin.

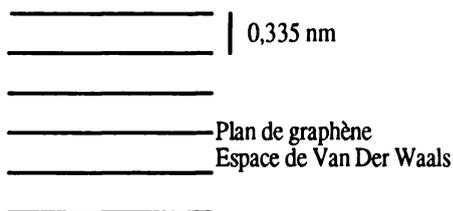


Figure 1a : graphite vierge

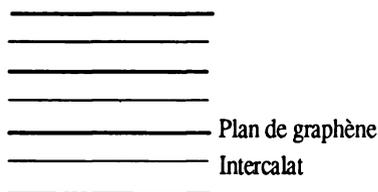


Figure 1b : composé d'insertion de stade 1

PREPARATION DES COMPOSES GRAPHITE- FeCl_3 DE 1^{er} STADE

Pour l'élaboration de nos composés d'insertion, nous avons réalisé un réacteur bitherme constitué de verre Pyrex (Figure 2). FeCl_3 a été distillé sous atmosphère de chlore et introduit (en léger excès) en présence de graphite UF4 préalablement dégazé à 400°C pendant une journée sous vide secondaire. Après introduction de chlore, le réacteur est scellé avant d'être introduit dans un four à deux zones de température (Héroid, 1955); la température de chacun des compartiments est indiquée sur la figure 2.

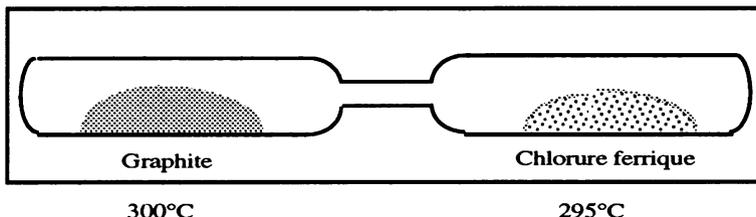


Figure 2 : Conditions de synthèse du composé de premier stade en réacteur bitherme

PREPARATION DES MELANGES BRAI 1,142-GIC

Les mélanges qui se différencient par le pourcentage massique de GIC dans le brai (2,4 et 8% massique), sont élaborés par introduction du GIC dans le brai préalablement fluidifié par chauffage. L'ensemble est laissé sous agitation à 150°C pendant deux heures en atmosphère inerte.

PYROLYSE

La pyrolyse est effectuée en réacteur ouvert sous courant d'azote (l'ensemble du montage utilisé est schématisé sur la figure 3). La température finale est maintenue pendant une durée de deux heures. Différentes vitesses de montée en température ont été utilisées. Les matières volatiles s'échappant du réacteur sont récupérées dans un piège refroidi à l'air liquide.

THERMOGRAVIMETRIE

La thermogravimétrie permet de suivre en continu l'évolution de la masse d'un échantillon soumis à une variation de température. Un dispositif d'autosuiveur permet de mesurer les variations de masse de l'échantillon suspendu à un ressort de silice étalonné et placé à l'intérieur d'une enceinte thermostatée. L'appareil utilisé est une thermobalance de type Mac Bain.

MICROSCOPE OPTIQUE POLARISANT

Les échantillons sont enrobés dans une résine de type époxy. L'observation en réflexion d'une section polie au microscope optique en lumière polarisée montre l'existence de domaines isochromatiques témoignant d'une organisation plus ou moins anisotrope au sein du matériau.

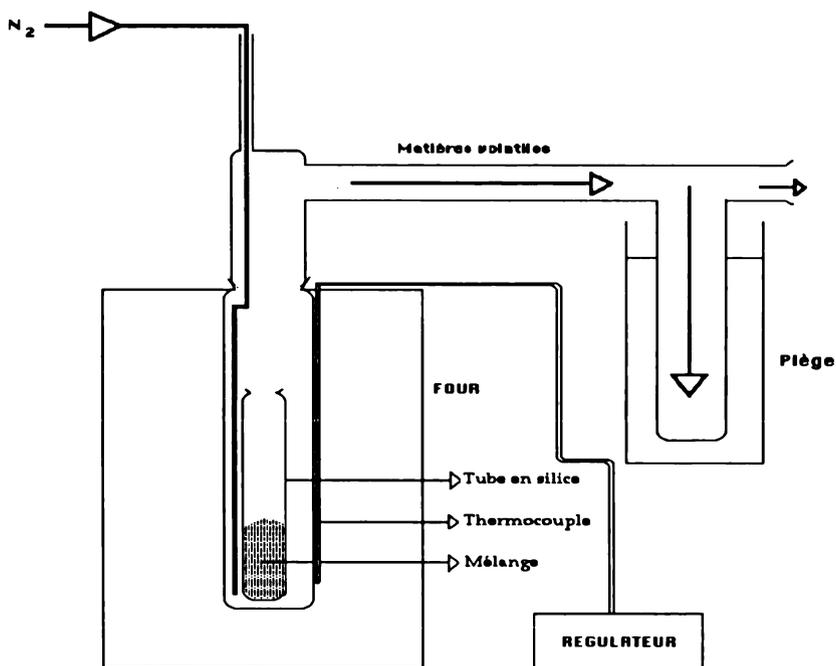


Figure 3 : Réacteur de pyrolyse

MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB)

Les échantillons sont préparés de la même manière que pour l'observation en microscopie optique. Les informations fournies par le MEB (S 2500 HITACHI) sont uniquement morphologiques.

MICROSCOPE ELECTRONIQUE A TRANSMISSION (MET)

Les échantillons sont finement broyés et dispersés dans l'éthanol. Cette préparation est ensuite déposée sur une grille carbonée. Les informations fournies par le MET (CM 20 PHILIPS) permettent grâce à la microanalyse X par dispersion d'énergie de caractériser chimiquement un volume de quelques nanomètres cubes.

DIFFRACTION DES RAYONS X (DRX)

Les diffractogrammes ont été obtenus en utilisant une anode tournante (RIGAKU-10kW) associée à un détecteur courbe (INEL). Les échantillons à

analyser sont finement broyés puis introduits dans un capillaire en verre de Lindemann avant d'être soumis au rayonnement Mo K α .

RESULTATS

STABILITE DU GIC

Les conditions opératoires décrites ci-dessus ont permis de préparer des GIC de formule C_7FeCl_3 . Les diffractogrammes correspondants confirment le stade 1. La figure 4 présente la décomposition thermogravimétrique de C_7FeCl_3 sous atmosphère d'azote. L'allure générale de la courbe est comparable à celle décrite par Gross (1962). Une faible perte de masse (environ 8% massique) apparait dès que la température est comprise entre 100 et 150°C : elle correspond soit à un départ de $FeCl_3$ adsorbé à la surface des particules d' UF_4 , soit à un départ d'eau ou de chlorure d'hydrogène consécutivement à l'hydrolyse qui n'est pas exclue malgré toutes les précautions opératoires, soit aux deux. La perte de masse principale s'effectue entre 350 et 550°C : elle est due à la décomposition partielle du chlorure ferrique en chlorure ferreux, réaction qui s'accompagne d'un dégagement de chlore, et également suite à la sublimation partielle de $FeCl_3$ qui quitte le graphite.

La figure 5 représente l'évolution du brai en fonction de la température. Par comparaison avec la figure 4 nous pouvons remarquer que la désorption de l'acide de Lewis $FeCl_3$ s'effectue dans une zone de température correspondant à la formation et à l'évolution de la mésophase (phase intermédiaire entre le brai et le semi-coke). Cette observation nous a donc permis de justifier l'utilisation d'un tel composé d'insertion.

Une analyse plus systématique des produits intermédiaires partiellement désorbés fut réalisée en utilisant un dispositif permettant de stopper le traitement thermique à des moments bien précis. Le tableau II rassemble les analyses élémentaires des échantillons après les différents traitements thermiques. La réduction du Fe(III) en Fe(II) est complète à 500°C. A 750°C, tout le chlorure ferrique intercalé a été désorbé. Tous ces résultats ont été confirmés par DRX où à 500°C la présence d'un composé d'insertion de deuxième stade graphite- $FeCl_2$ a pu être mis en évidence.

Il apparait donc que la moitié de $FeCl_3$ se désorbe avant 500°C dans des conditions de fluidité du brai telle que la diffusion du réactif est facilitée.

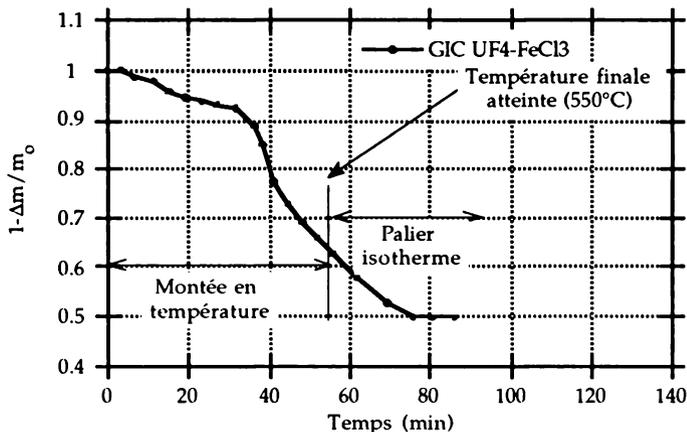


Figure 4 : Analyse thermogravimétrique de C_7FeCl_3 chauffé à $550^\circ C$ avec une vitesse de montée en température de $10^\circ C/min$.

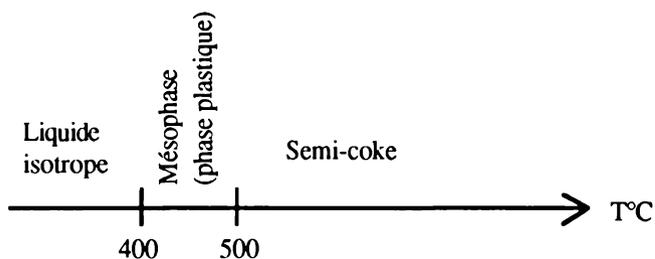


Figure 5 : Evolution du brai soumis à un traitement thermique

Tableau II : Evolution de la composition élémentaire du GIC de stade I en fonction de la température (% massique)

Température finale ($^\circ C$)	C	Fe	Cl	Cl/Fe (molaire)
initiale	32,3	20,9	41,3	3,10
300	41,7	21,2	31,8	2,40
400	48,1	19,8	28,1	2,20
500	53,1	19,4	24,4	1,98
750	96,6	0,4	0,4	

Les clichés de MEB (non représentés) montrent une distribution homogène des particules de GIC dans la matrice de brai, quelle que soit la concentration en GIC. De plus, le rapport molaire Cl/Fe, obtenu grâce aux analyses élémentaires effectuées ponctuellement sur les particules de GIC pour les différents mélanges, est proche de 3.

FORMATION ET DEVELOPPEMENT DE LA MESOPHASE

L'apparition d'un liquide nématique au cours des premières étapes de la carbonisation d'un brai a été observée pour la première fois par Brooks et Taylor (1965); au sein de la phase isotrope se développent vers 400°C des sphérules optiquement anisotropes de textures bien définies : ce sont les sphérules dites de mésophase. Les études concernant la cinétique de formation de la mésophase ont abouti à la détermination d'énergie d'activation correspondant à des réactions de type radicalaires (Greinke, 1994). La coalescence des sphérules précédemment formées, amène ensuite à la ressolidification du matériau (Marsh, 1979). Afin de comprendre le rôle du GIC lors de ces étapes, nous avons mené une étude comparative en carbonisant d'une part le brai seul et d'autre part un mélange brai-GIC 8%, dans le réacteur de pyrolyse décrit précédemment, en utilisant une vitesse de montée en température de 10°C/min et à des températures variant de 400 à 450°C. L'échantillon est maintenu deux heures à la température finale de carbonisation.

Il est couramment admis que la formation de la mésophase est liée à l'existence de molécules de tailles importantes et suffisamment planes. Les sphérules de mésophase naissent suite à l'empilement de ces molécules de grandes tailles reliées entre elles par des liaisons de Van Der Waals; La figure 6 présente le modèle structural d'une sphère de mésophase établi par Brooks et Taylor (1968) et confirmé par Honda et *al* (1971).

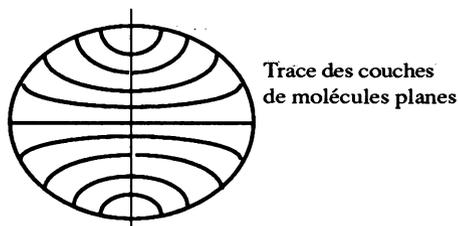


Figure 6 : Modèle de Brooks et Taylor décrivant la texture de la sphère de mésophase (coupe diamétrale passant par les deux pôles de la sphère)

Les réactions déshydrogénantes associées aux réactions de polymérisation donnant lieu à la formation des sphérules de mésophase diminuent la solubilité du milieu dans des solvants comme la pyridine, la

quinoléine ou encore le tétrahydrofurane (THF) (Honda, 1970; Hüttinger, 1991). C'est pourquoi la méthode la plus couramment utilisée afin d'étudier la cinétique de polymérisation est la détermination de la variation de solubilité du matériau. Cependant, cette étude doit être couplée à l'observation par microscopie optique polarisante des échantillons. En effet, une partie de la mésophase peut être soluble et inversement une partie de la phase isotrope peut être insoluble bien que non intégrée aux sphérules de mésophase (Lewis, 1978). Ces deux études ont donc été couplées afin de déterminer le rôle joué par le composé d'insertion lors de la pyrolyse.

A 400°C, les observations par microscopie optique à lumière polarisée montrent qu'aucune sphérule de mésophase n'est formée quelque soit l'échantillon.

A 430°C, de petites sphérules de mésophases de diamètres voisins apparaissent pour le brai seul (planche 1, photo 1), alors que le matériau homologue issu de la carbonisation du mélange brai-GIC 8% est caractérisé par de larges agglomérats de graphite autour desquels nous pouvons noter la présence de sphérules coalescées. De plus entre ces amas de graphite, existent des sphérules de mésophase de taille très différentes (planche 1, photo 2).

A 450°C, deux domaines anisotropes, dont un contient le graphite aggloméré, ont pu être observés pour l'échantillon brai-GIC 8%. A cette température, la mésophase massive est formée : toutes les sphérules de mésophase ont augmenté en taille et coalescé. Dans le cas du brai seul, l'échantillon est représenté par de larges domaines coalescés entourés de sphérules de mésophase de grandes tailles.

Le tableau III résume qualitativement les observations effectuées par microscopie optique à lumière polarisée des différents échantillons.

Tableau III : Observations au microscope optique polarisant des échantillons brai et brai-GIC 8% carbonisés à 400, 430 et 450°C.

Température de carbonisation (°C)	BRAI	BRAI-GIC 8%
400	Aucune anisotropie	Aucune anisotropie
430	Apparition de petites sphérules de diamètres voisins	Graphite en agglomérats + Sphérules de tailles différentes
450	Larges domaines anisotropes + Sphérules de grandes tailles	100% de mésophase

Les figure 7a et 7b représentent les histogrammes des distributions de taille des sphérules de mésophase. En premier lieu le mélange brai-GIC 8% et le

Planche 1 : Photos de microscopie optique à lumière polarisée

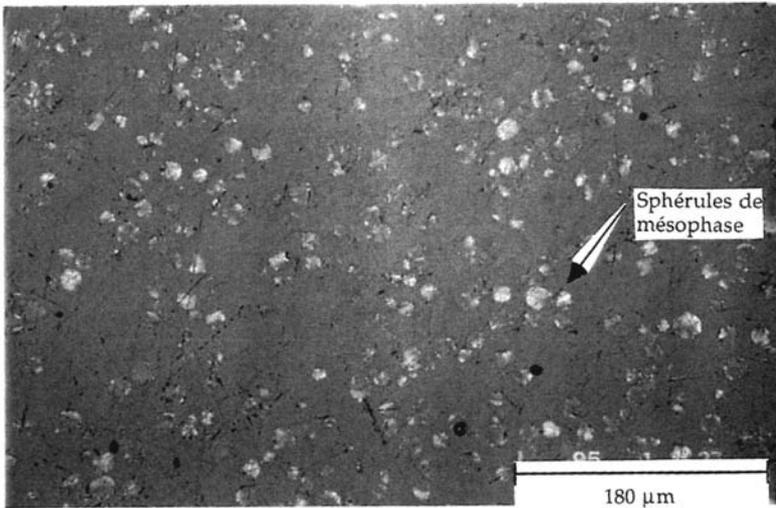


Photo 1 : Brai carbonisé à 430°C (10°C/min) pendant deux heures

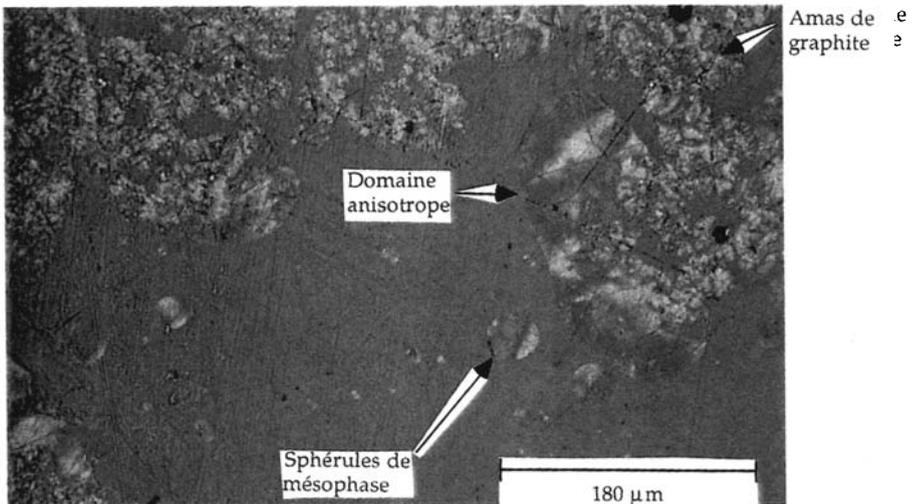


Photo 2 : Mélange brai-GIC 8% carbonisé à 430°C (10°C/min) pendant deux heures

brai seul carbonisés à 430°C ont été comparés (figure 7a). Ces distributions tout à fait différentes sont néanmoins caractérisées par un diamètre moyen des sphérules de mésophase (ϕ) très proche (13 μm et 13,5 μm), mais il est à remarquer que l'écart-type (σ) est trois fois plus grand dans le cas du précurseur brai-GIC 8% (voir tableau IV). La figure 7b présente la superposition des distributions des tailles des sphérules de mésophase pour les échantillons issus de la pyrolyse du brai seul à 430 et 450°C. Par comparaison avec la figure 7a, l'allure similaire des histogrammes traduit le fait que pour obtenir une distribution en taille de sphérules semblable dans le cas des échantillons brai et brai-GIC 8%, il faut se placer à plus basse température pour ce dernier.

Ces résultats mettent en évidence un effet catalytique du composé d'insertion lors de la formation et du développement de la mésophase. Mais il convient de distinguer deux aspects dûs à la présence du GIC : l'un est en relation avec le rôle des particules de graphite qui de par leur taille et leur forme doivent accélérer le processus de nucléation des sphérules au niveau du graphite même. Le deuxième aspect traduit l'accélération des réactions de polymérisation déshydrogénante de par la présence de l'acide de Lewis FeCl_3 .

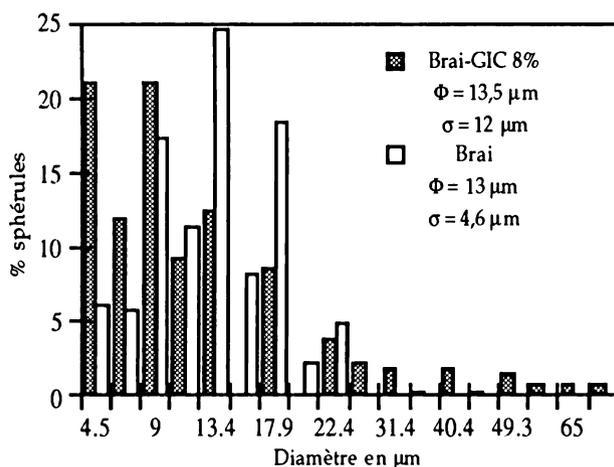


Figure 7a : Distributions en taille des sphérules de mésophase (diamètre en μm) pour les échantillons de brai et de brai-GIC 8% carbonisés à 430°C.

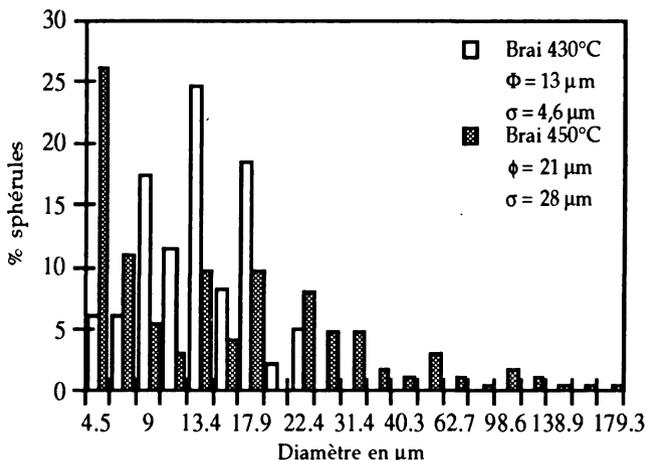


Figure 7b : Distributions en taille des sphérules de mésophase (diamètre en μm) pour les échantillons de brai carbonisés à 430 et 450°C.

Le tableau IV résume les données issues du traitement du brai seul et du mélange brai-GIC 8% aux différentes températures. En premier lieu, il est à remarquer que les rendements des réactions de carbonisation sont similaires à une température donnée pour les deux échantillons. En effet à ces températures et pour un temps de maturation de deux heures, les processus mis en jeu entraînent un dégagement d'hydrogène ou encore de composés de masses moléculaires faibles. C'est pourquoi ces phénomènes ne sont pas perceptibles au niveau du rendement de la carbonisation et ne différencient aucun des échantillons.

L'évolution du rapport molaire C/H (calculé à partir des analyses élémentaires des différents échantillons) pour le brai seul et le mélange brai-GIC 8% en fonction de la température de carbonisation est représentée figure 8. Ces résultats confirment une polymérisation plus avancée dans le cas du mélange brai-GIC 8% pour lequel le rapport C/H est plus important quelle que soit la température du traitement. Les valeurs de C/H corrigées indiquées dans ce tableau, ont été calculées en s'affranchissant de la quantité de carbone provenant du GIC ajouté au brai. Ces calculs montrent que l'apport en carbone dû à la présence du GIC est faible.

Enfin, le tableau IV rassemble les pourcentages d'insolubilité obtenus dans le THF. L'augmentation de ces pourcentages en fonction de la température traduit l'augmentation de la masse moléculaire moyenne des échantillons suite aux réactions de polymérisation. De plus, ces valeurs sont plus importantes lorsque la carbonisation du brai s'effectue en présence de GIC.

Tous ces résultats confirment l'effet catalytique du composé d'insertion sur le développement de la mésophase. Une étude plus approfondie nous permettra de relier son évolution à la texture finale du semi-coke.

Tableau IV : Rendement, rapport molaire C/H, diamètre moyen des sphérules de mésophase caractérisant les échantillons ainsi que l'écart-type définissant la distribution en taille des sphérules de mésophase, et pourcentage d'insolubilité dans le THF des matériaux après carbonisation à 400, 430, et 450°C

Température	BRAI			BRAI-GIC 8%		
	400	430	450	400	430	450
rendement**	83	75	63	86	75	65
C/H *	1,83	2,00	2,20	1,84	2,13	2,44
C/H corrigé*	1,83	2,00	2,20	1,78	2,06	2,37
Diamètre moyen (µm)		13	21		13,5	infini +
Ecart-type (µm)		4,6	28		12	
% THF insolubles	35	51,9	61	47,8	71,8	99,7

** : masse de matériau après carbonisation / masse initiale de matériau.

* : rapport molaire

+ : la mesophase massive est observée à cette température

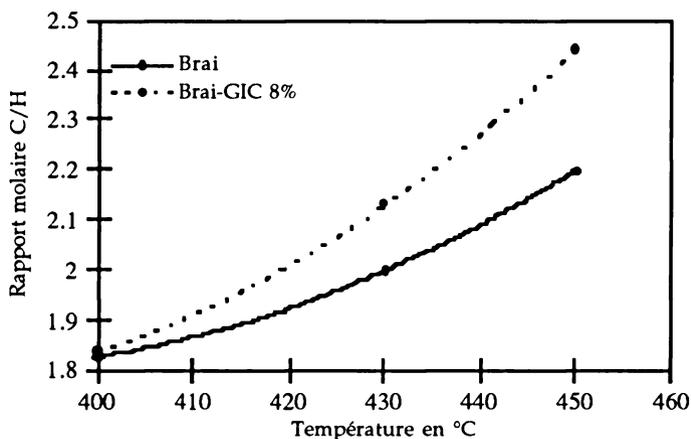


Figure 8 : Evolution du rapport molaire C/H avec l'augmentation de la température durant la carbonisation du brai et du mélange brai-GIC 8%.

ELABORATION DES SEMI-COKES

L'influence de la vitesse de montée en température sur le rendement en semi-coke (c'est à dire le rapport de la masse de semi-coke obtenue sur la masse initiale) a été étudiée pour une pyrolyse menée jusqu'à 550°C. Une forte augmentation de ce rendement a été observée lorsque la vitesse de montée en température diminue de 20 à 0,5°C/min et ceci quelque soit le précurseur considéré (le brai et les différents mélanges). Pour le mélange brai-GIC 8%, cette augmentation atteint même 31%. En effet, les matières volatiles ont plus de temps pour initier les réactions secondaires comme les réactions de polycondensation lorsque la vitesse de montée en température est faible, avec pour conséquence une nette augmentation du rendement (Bégin et *al*, 1995).

Dans le tableau V figurent les rendements en semi-coke et les compositions élémentaires des différents mélanges pyrolysés à 550°C avec une vitesse de montée en température de 20°C/min. L'augmentation du rendement en semi-coke avec l'augmentation du pourcentage massique de GIC dans le mélange de départ traduit l'action déshydrogénante de l'acide de Lewis, favorisant ainsi les réactions de polycondensation. Ces valeurs prenant en compte la présence des particules de carbone, de fer et de chlore provenant du composé d'insertion, la réelle augmentation du rendement en carbone a été calculée en ne considérant que le carbone provenant du brai. Cette augmentation est de 14, 16 et 17% pour les semi-cokes issus de la pyrolyse des mélanges 2, 4 et 8% respectivement. Ces résultats confirment donc l'activité catalytique du GIC impliqué dans les réactions de polycondensation.

De plus, les compositions élémentaires reportées montrent que le fer désorbé est toujours présent dans les semi-coke. Au cours de la pyrolyse, ce dernier se retrouve en contact avec la phase plastique du brai où il peut diffuser et réagir avec les hétéroéléments présents dans le brai comme le soufre. Le fer se retrouve donc piégé dans la matrice carbonée où il se présente sous différentes phases décrites dans la partie suivante.

Tableau V : Rendements en semi-coke et compositions élémentaires pour différents précurseur pyrolysés à 550°C (20°C/min)

	C *	H *	Fe *	Cl *	Cl/Fe	R*
Brai	94,4	2,9				45,5
Brai-GIC 2%	93,8	2,8	0,7	0,7	1,8	50,5
Brai-GIC 4%	90,9	2,7	1,5	1,7	1,9	52,9
Brai-GIC 8%	88,9	2,5	2,8	2,9	1,7	54,3

* : %massique

R : rendement en semi-coke

CARACTERISATION DES ETATS DU FER DANS LES SEMI-COKES

Sur la figure 9 sont superposés les diffractogrammes des semi-cokes obtenus après la pyrolyse des mélanges 2, 4 et 8% à 550°C en utilisant une vitesse de montée en température de 20°C/min. L'analyse des réflexions observées permet d'identifier trois phases en accord avec les résultats obtenus après l'étude par microanalyse X effectuée par MEB : FeCl₂, FeS et Fe α . Plus le taux de GIC est élevé, plus le pic correspondant à l'élément fer est important. Cette observation s'explique par le fait que la quantité de fer désorbé excède de plus en plus la quantité de soufre présent dans le brai lorsque la quantité de GIC augmente.

Une étude par spectrométrie Mössbauer a confirmé la présence des composés précédemment décrits. Dans le tableau VI sont rassemblés les résultats quantitatifs obtenus après analyses des semi-cokes issus de la pyrolyse à 550°C (20 °C/min) des mélanges chargés à 2, 4 et 8%.

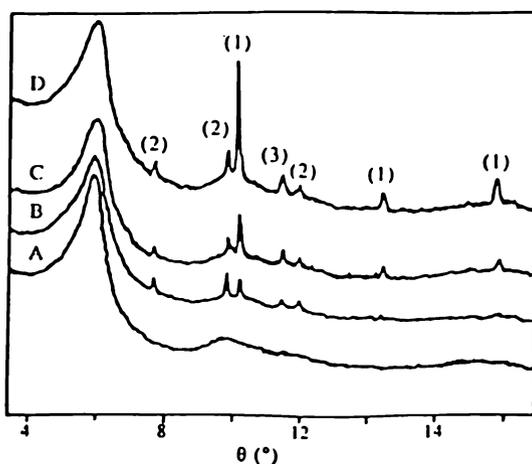


Figure 9 : Diffractogrammes des semi-cokes obtenus après pyrolyse à 550°C (20°C/min) d'un brai (A) et des mélanges brai-GIC 2% (B), 4% (C) et 8% (D). 1 : réflexions associés au Fe α ; 2 : au FeS; 3 : au FeCl₂.

Tableau VI : % des différentes phases dans les semi-cokes déterminés par spectrométrie Mössbauer

Semi-coke issus de la pyrolyse des mélanges :	(FeCl ₂)	Fe(0) (α et γ)	FeS Fe _(1-x) S	Fe(0)/FeS
2%	21 %	12 %	67 %	0.18
4%	17 %	48 %	34 %	1.4
8%	18 %	59 %	22 %	2.7

Ces pourcentages sont calculés par rapport à la quantité totale de fer dans les semi-cokes. La quantité de FeCl_2 reste à peu près constante quelque soit le pourcentage de GIC. Le fait que le rapport $\text{Fe}(0)/\text{FeS}$ soit plus important lorsque le mélange est plus chargé en GIC confirme les observations effectuées à partir de la diffraction des rayons X.

Par microscopie électronique à transmission, nous avons obtenu des résultats complémentaires : la présence de particules de graphite les unes insérées formant un composé graphite- FeCl_2 et les autres totalement vides ont pu être observées. De plus, l'analyse chimique effectuée directement sur la matrice carbonée nous a montré la présence de fer : cette dernière observation est très importante et est certainement à relier avec les propriétés d'adsorption sélectives de ces matériaux.

CONCLUSION

Une nouvelle variété de semi-coke a été élaborée à partir de la copyrolyse de mélanges de brai de houille et de composés d'insertion graphite- FeCl_3 . Les mélanges présentent une répartition homogène des particules de GIC dans la matrice de brai. Les particules de GIC ont une grande influence lors de la transformation du brai en semi-coke et ceci dès les premières étapes de la carbonisation : l'étude de la mésophase a en effet montré un effet catalytique du GIC durant les étapes de formation et de croissance de cette phase intermédiaire lors de la pyrolyse. D'autre part, la présence du GIC dans le mélange provoque une augmentation de rendement en semi-coke. Ce phénomène est encore une fois la conséquence du rôle catalytique de l'acide de Lewis qui au cours de sa désorption favorise les réactions de polycondensations pendant la transformation du brai en semi-coke.

Les états du fer dans les semi-cokes ont été identifiés par différentes méthodes complémentaires : les espèces observées sont : FeS , FeCl_2 , $\text{Fe}_{(1-x)}\text{S}$, $\text{Fe}\alpha$ et $\text{Fe}\gamma$.

Enfin, l'ultime étape de ces travaux consiste à activer par la vapeur d'eau les semi-cokes "chargés". Les premiers résultats montrent que le composé d'insertion est responsable d'un important développement de la mésoporosité (taille des pores comprises entre 2 et 50 nm). L'aire spécifique des matériaux est de $400\text{m}^2/\text{g}$ environ (Albiniak et al, 1995).

Des premiers essais d'adsorption ont été réalisés avec H_2S gazeux : les sites actifs générés par le GIC se révèlent avoir des propriétés intéressantes puisque les semi-cokes activés issus de la pyrolyse des mélanges présentent une grande capacité de rétention de ce gaz. De plus, cette adsorption est réversible, ce qui permet de régénérer les semi-cokes activés (Boudou et al, 1995). Ces premiers résultats d'adsorption sélective correspondent à la finalité de notre étude. Nos travaux actuels visent d'une part à obtenir des matériaux caractérisés par de plus grandes surfaces spécifiques et d'autre part à tester ces matériaux en terme d'adsorption vis à vis d'autres gaz tels NH_3 , SO_2 et les mercaptants.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient P.Delcroix et Dr.G.Le Caer de l'Ecole des Mines de Nancy pour les mesures de spectrométrie Mössbauer; Pr.T.Siemieniewska de l'Université de Wroclaw (Pologne) pour l'activation et la caractérisation des textures poreuses des matériaux; Dr J.P.Boudou de L'Université P. et M. Curie (Paris VI) pour la détermination des propriétés adsorbantes des matériaux activés. Enfin, les auteurs tiennent à remercier le PICS 119 : "Carbochimie et Environnement"-CNRS-ECOTECH et l'ADEME pour leur support financier.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALBINIAK.A, BRONIEK.E, KACZMARCZYK.J, JANKOWSKA.A, SIEMIENIEWSKA.T, McENANEY.B, CHEN X.S, FURDIN.G, BEGIN.D, MARECHE.J.F and ALAIN.E - Coal structure (Oviedo), Septembre 1995.

BEGIN D, ALAIN E, FURDIN G et MARECHE J.F - Fuel, 74, 2 (1995), 139.

BOUDOU.J.P, DJEGA MARIADASSOU.G, BEGIN.D, ALAIN.E, MARECHE.J.F, FURDIN.G, SIEMIENIEWSKA.T and ALBINIAK.A - 8th J. Phys. Chem. Solids. (in press)

BROOKS J.D and TAYLOR G.H - Carbon,3 (1965), 185.

BROOKS J.D and TAYLOR G.H - Chemistry and physics of carbon (Eds P.L.Walker Jr and P.Thrower) Dekker, New York, 4 (1968), 271.

FURDIN G, BEGIN D, MARECHE J.F, PETITJEAN D, ALAIN E, et LELAURAIN M - Carbon, 32 (1994), 599.

GEORGIADIS G et GAILLARD G - Chaleur et industrie, 374 (1956), 247.

GREINKE R.A - Chemistry and physics of carbon (Eds P.L.Walker and P.Thrower) Dekker, New York, 24 (1994), 1.

GROSS R - Thèse, Université de Nancy, 1962.

HEROLD A, Bull.Soc.Chim.fr (1955), 999

HONDA H, KIMURA H, SANADA Y, SUGAWARA S. and FURUTA T - Carbon, 8 (1970), 181.

HONDA H, KIMURA H and SANADA Y - Carbon, 9 (1971), 695.

HUTTINGER K.J and PING WANG J - Carbon, 29 (1991), 439.

LESSING R and BANKS M.A.L - J.Chem.Soc, 125 (1925), 2344.

LEWIS I.C and LEWIS R.T - Carbon, 16 (1978), 156.

MARSH H and WALKER P.L Jr - Chemistry and physics of carbon (Eds P.L.Walker and P.Thrower) Dekker, New York, 15 (1979), 229.

PROCES-VERBAL DE LA SEANCE DU 11 MAI 1995

Le Président Jean-Marie KELLER ouvre la séance mensuelle à 17 heures en l'Hôtel Districale en présence de 39 personnes (dont 8 non-membres).

Parmi les membres étaient présents:

- Mesdames HEUSSER S., PATARD M.T., BERNA M.T., LIONEL-PELERIN M.J., GRAND'EURY J.M., KAYL M., MATHIOT B.,

- Messieurs KELLER J.M., MAUBEUGE P.L., FLECHON J., CHOUVIAC C., PUEYO G., BOULAY J., PARGNEY J.C., TOMMY-MARTIN J., BERNA G., DELIVRE J., ORY P., COUDRY G., DOSSMANN J., WENZEL G., PHILIPON J.P., CORNEVAUX J., GALOTTE L., GNEMMI J., FOSSARD J.M., STEPHAN F., BOURGOIN R., KAYL R., HADNI A., PENTENERO A..

Etaient excusés:

- Mesdames COLIN S., NONCLERCQ G., CLEVENOT M.,

- Messieurs COMBREMONT G., BAUDOT J., DUPONT N. (Frère Basile), LEONARD J.M..

COMMUNICATIONS

Le Président donne d'abord la parole à **Mademoiselle HEUSSER S.**, Professeur Agrégé des Universités à la Faculté des Sciences de Nancy, pour sa communication portant sur: **"L'ontogénèse intestinale chez les Amphibiens: importance de la métamorphose, comparaison avec les autres Vertébrés."**

A la suite de cet exposé, Monsieur KELLER s'interroge sur la diminution de la masse moléculaire relative de la villine au cours de l'évolution des Vertébrés. Selon Mademoiselle HEUSSER il s'agirait vraisemblablement d'une élimination de séquences "inutiles" au cours de l'évolution.

Monsieur KELLER ajoute que ces grands changements observés chez les Amphibiens s'expliquent car il y a un changement du régime alimentaire, mais que se passe-t-il chez les vertébrés supérieurs? Mademoiselle HEUSSER a précisé que chez les Oiseaux ou les Mammifères le régime alimentaire est également modifié, notamment chez ces derniers qui passent d'une alimentation placentaire à une alimentation lactée.

La parole est ensuite donnée à **Monsieur MAUBEUBE P.L.** pour la présentation de deux sujets: **"Ammonites rares ou nouvelles du Portlandien de la Meuse"** et **"Encore sur le problème du Bathonien à Neufchâteau (Vosges)"**.

A propos du premier thème, Monsieur KELLER a demandé si la répartition des Ammonites dans le monde est connue. Monsieur MAUBEUGE a répondu qu'effectivement les endroits où elles sont particulièrement abondantes sont connus.

Concernant le deuxième sujet, Mademoiselle HEUSSER s'est interrogée sur l'absence de la couche du Bathonien et sur l'explication qui peut en être donnée. Monsieur MAUBEUGE a répondu que vraisemblablement cette disparition pourrait être liée à des mouvements épirogéniques.

La quatrième communication a été présentée par Monsieur PARGNEY J.C. sur le thème suivant: "Etude cytologique des mycorhizes de *Sphaerospora brunnea*, champignon compétiteur de la truffe".

A la suite de cette présentation, Monsieur KELLER a demandé si ce n'est pas la préparation de microscopie électronique qui aurait dissout les ciments. Monsieur PARGNEY a répondu à cette question par la négative.

Mademoiselle HEUSSER s'est intéressée à la production des polyphénols notamment s'il s'agissait ou non d'une réaction de défense. L'intervenant a précisé que cette sécrétion est tout à fait normale avec toutefois une différence car dans le cas présent on observe une condensation du matériel en deux couches.

Monsieur MAUBEUGE a demandé si d'autres plantes produisent et excrètent des polyphénols au niveau racinaire et si cela intervient dans la cohabitation des espèces. Monsieur PARGNEY a répondu que toutes les plantes en sécrètent et que vraisemblablement cette production interviendrait dans les relations inter-individus.

CONFERENCE

Monsieur HADNI A., Agrégé de physique, Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy et Fondateur du Laboratoire d'Infrarouges lointains, a présenté la conférence du jour portant sur: "Les trois grandes découvertes de la deuxième partie du XX^{ème} siècle en opto-électronique: transistors (1948), lasers (1958) et supraconductivité des oxydes (1987)".

Résumé

I. TROIS GRANDES DECOUVERTES TECHNOLOGIQUES

Nous avons vu comment se sont produites, dans la deuxième partie du XXème siècle, ces trois grandes inventions. Il ne s'agit pas de découvertes en physique fondamentale comme l'électron au 19ème siècle par Millikan, l'émission lumineuse stimulée par Einstein en 1907, ou la théorie BCS (Bardeen, Cooper, Schrieffer), de la supraconductivité classique en 1957. J'ai dit grandes découvertes parce qu'elles ont modifié notre façon de vivre.

Le transistor a produit d'immenses changements dans la civilisation, complètement insoupçonnés au moment de sa découverte. Les jeunes lycéens d'aujourd'hui ignorent la règle à calcul, les tables de logarithmes, les tables de trigonométrie, et même les tubes électroniques. Les transistors sont partout, dans les montres digitales, les calculatrices de poche, les agendas

électroniques, les distributeurs d'essence, les cartes de paiement. Ils sont dans les centraux de téléphone, où ils ont remplacé les relais mécaniques, dans les minitels, les télécopieurs, les téléphones cellulaires, les récepteurs de TV, de radio, les réveils, les baladeurs, et autres gadgets, les jouets; dans les appareils de photo, les caméscopes, les magnétoscopes, dans les microprocesseurs, les ordinateurs, les allumages électroniques, les pilotages automatiques; les gyroscopes etc...

Le laser a permis les disques lasers, video et les télécommunications optiques. Tous les câbles transocéaniques en cuivre sont remplacés par des câbles optiques en verre. C'est le début des "autoroutes de l'information".

Les nouveaux supraconducteurs qui fonctionnent à la température de l'azote liquide vont sans doute permettre le développement de toutes les applications de la supraconductivité classique, mais à un moindre prix, en particulier dans le cas de l'imagerie médicale par résonance magnétique, et des magnéto-cardiogrammes.

Toutes ces inventions n'avaient rien de trivial, et c'est à des savants incontestés qu'elles sont dues, Shockley, Bardeen, Townes, Schallow, Muller, Bednorz, ..., et bien d'autres qui sont restés plus obscurs, car une idée naît généralement en plusieurs points à la fois, et résulte de toute une culture, présente et passée.

II. LA RECHERCHE PURE DEMANDE PEU DE FINANCEMENT.

Il a fallu du métier, de nombreuses relations scientifiques (généralement apportées par les congrès, les lectures), du travail, de la fantaisie, de la chance et du génie, mais pas forcément beaucoup d'argent. Le transistor, au départ, ce fut deux pointes de tungstène appuyées sur un bout de germanium. Le laser, un tube rempli d'un mélange de gaz carbonique et d'azote avec deux électrodes, et deux miroirs parallèles aux extrémités. Les oxydes supraconducteurs, c'était simplement un mélange de poudres qu'on peut acheter pour quelques francs chez n'importe quel fournisseur de laboratoire, un petit four pour les calciner, et une presse modeste pour former des pastilles supraconductrices.

III. LE DEVELOPPEMENT EST COUTEUX.

Le développement en vue d'application demande au contraire des budgets importants, beaucoup de monde, pour suivre toutes les pistes intéressantes, et n'en retenir souvent qu'une. Il faut arriver à une fiabilité quasi-totale. Dans la mission Apollo, il y avait des milliers de composants à réunir, et la probabilité pour qu'il y ait une seule défection, dans un seul de ces composants, devait être quasi négligeable. Le hasard, le destin, devaient être apparemment éliminés. Éliminer le hasard, faire de plus en plus compliqué, c'est un pari qu'on n'aurait jamais osé tenir avant la dernière guerre. Il a été gagné.

IV. LES MECENES.

La nécessité des mécènes pour le développement de la science et de la technologie remonte à l'Antiquité. C'est le Pharaon Ptolémé I^{er} qui, après la mort d'Alexandre le Grand, fonda la bibliothèque d'Alexandrie en Egypte. C'est le roi du Portugal, Jean I^{er}, qui amassa les connaissances de ses marins pour préparer les grandes expéditions. Plus proche de nous, Roosevelt lança le projet Manhattan d'où sortit la première bombe atomique, Kennedy, la mission Apollo et Nixon, "la guerre des étoiles". Aujourd'hui,

les mécènes sont les banques et les Parlements de nos démocraties. L'URSS est devenue la Russie, la guerre froide est terminée. Les grands projets scientifiques et technologiques vont-ils disparaître peu à peu ? Tout récemment le Congrès américain a arrêté la construction du fameux Superconductor-Supercollider (SSC).

Ce qui est nouveau à la fin de ce millénaire, c'est la richesse que l'homme a produite sur la terre grâce à la technologie: abondance de nourriture, de ressources énergétiques, de moyens de transport et de communications. Elle permet, si nos décideurs le veulent, d'imaginer de grands projets, et de leur donner des moyens énormes en argent et en hommes sans réduire le peuple en esclavage comme au temps des pharaons. Est-ce psychologiquement réalisable en période de paix ? La station spatiale développée en commun par les Russes et les Américains peut donner un espoir.

Après cet exposé, Monsieur FLECHON a tenu à préciser que ces découvertes dans le domaine de l'électronique ont trouvé des applications en médecine (utilisation du laser pour des petites surfaces dans les pathologies oculaires) mais aussi dans le domaine des communications (les téléphones électromécaniques qui sont devenus électroniques) et que tout ce progrès ne devrait pas faire oublier Monsieur KASTLER, physicien français, qui est l'inventeur du couplage optique.

Monsieur MAUBEUGE a demandé quels sont les producteurs actuels de germanium. Monsieur HADNI a répondu qu'aujourd'hui il est remplacé par le silicium. Monsieur MAUBEUGE s'est aussi interrogé sur la raison pour laquelle l'or n'est pas un supra-conducteur. Monsieur HADNI a expliqué que le platine et l'or ne sont pas des supra-conducteurs car le phénomène de supraconductivité est différent du phénomène de conductivité.

Après avoir remercié les différents intervenants et le public, le Président fixe la réunion de rentrée solennelle au 9 novembre 1995 à 17 heures et après avoir souhaité de bonnes vacances à tous, lève la séance à 20 heures.