

*Société*  
*Géologique du*  
*Nord*

**LA GÉOLOGIE REGIONALE  
DE JULES GOSSELET A NOS JOURS**

*ANNALES*

**Tome 10 (2<sup>ème</sup> série), Fascicule 3**  
*parution 2003*

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD  
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

## CONSEIL D'ADMINISTRATION

— 2003 —

<i>Président</i> .....	M. J-L. MANSY
<i>Premier Vice-Président</i> .....	M. N. TRIBOVILLARD
<i>Seconds Vice-Présidents</i> .....	M <sup>lle</sup> D. BRICE
	M. A. BLIECK
<i>Conseillers</i> .....	M <sup>me</sup> Ch. VINCHON
	M. F. AMEDRO
	M <sup>me</sup> B. VANVLIET-LANOE
	M. J.F. DECONINCK
	M. O. AVERBUCH
	M. F. ROBAZYNSKI
<i>Secrétaires</i> .....	M <sup>lle</sup> C. CRONIER
	M. A. GAUTHIER
<i>Trésorier</i> .....	M. J.M. DÉGARDIN
<i>Déléguée aux Publications</i> .....	M <sup>me</sup> Paule CORSIN (*)
<i>Bibliothécaire</i> .....	M. A. TRENTESAUX

---

## CONSEIL SCIENTIFIQUE

— 2003 —

MM. W. CHRISTENSEN (Copenhague), A. DELMER (Bruxelles), W. KUNHT (Kiel),  
B. PEYBERNES (Toulouse), M. PRICE (Reading) et H. ZIJLSTRA (Utrecht).

---

## CONSEIL ÉDITORIAL

— 2003 —

MM. A. BLIECK, J.F. DECONINCK, J. FERRIÈRE, B. MISTIAEN et J. SOMMÉ  
M<sup>me</sup> Ch. VINCHON.

(\*) *Mes remerciements vont à M. Philippe Recourt qui m'a beaucoup aidée pour la mise au point de ce fascicule.*

## GOSSELET ET LA NOTION DE TEMPS EN GEOLOGIE

### Gosselet and the notion of time in geology

par Patrick DE WEVER (\*) & Jean-Yves REYNAUD (\*)

*« Il faut fouiller les archives du monde, tirer des entrailles de la Terre les vieux monuments ... C'est le seul moyen de fixer quelques points dans l'immensité de l'espace et de placer un certain nombre de pierres numéraires sur la route éternelle du temps » (Buffon, les Epoques de la Nature, 1778)*

*Résumé.* — La notion de temps est difficile à définir, tant elle relève d'approches différentes. Le temps de l'Histoire est celui qui intéresse plus particulièrement celui du géologue. La stratigraphie est le livre de l'histoire de la Terre. Ce livre est lu depuis longtemps, chaque lecteur essayant d'en améliorer la compréhension générale. Dans le fil de ces améliorations successives, un saut significatif fut la découverte du temps long. Cette notion de temps long fut difficile à imposer et eut des implications en géologie, certes, mais aussi en biologie, en philosophie etc.. L'apport de Gosselet dans ce domaine fut essentiellement la découverte d'une zone de transition, ignorée jusque là car représentée par une lacune. Son apport eut un « effet léthal » sur le catastrophisme de Cuvier et d'Orbigny.

*Abstract.* — *The notion of time seems obvious at first glance, but is in fact very difficult to define. It proceeds from various approaches. The geologist is mainly concerned by the time of history, and stratigraphy is the book of Earth history. This book has been read for a long time, and each reader tries to improve its general understanding. From successive improvements a significant step was the discovery of very long time. This notion had some difficulty to stand out and had implications not only in geology but also in biology, in philosophy... The input of Gosselet in this domain has mainly be the discovery of a transition zone, unsuspected because expressed as a lacuna of time record. His contribution had a lethal effect on the Cuvier and d'Orbigny catastrophism.*

#### I. — INTRODUCTION : LE TEMPS ?

Le temps possède diverses acceptions. Il peut être ressenti comme cyclique (le renouvellement des saisons) ou comme vectoriel (la flèche du temps qui passe). De nombreuses appréhensions du temps sont possibles selon les cultures, selon les religions, et les sciences. Le temps est parfois abordé comme un temps social, un temps psychologique, un temps de la conscience. Ces acceptions ont chacune leur raison d'être, leur champ d'étude et d'application. La notion du temps la plus fréquente reste celle du temps vectoriel, celui de l'histoire. C'est celui dont il est question ici.

Le temps n'est ni de la matière que l'on peut toucher, ni de l'espace que l'on peut parcourir, ni des ondes, ni de l'énergie ou de la chaleur que l'on peut ressentir. Il n'est directement perceptible par aucun des 5 sens, et pourtant il a une réalité. Saint Augustin avait déjà cette réflexion : « qu'est-ce que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais, mais si on

me le demande et que je veuille l'expliquer, alors je ne le sais plus ».

Depuis toujours le temps est une notion que l'on a cherché à comprendre, à mesurer : dans la civilisation mégalithique, les alignements de Carnac par exemple (fig. 1), comme les cercles de Stonehenge, en Grande-Bretagne, sont des repères astronomiques (direction du soleil levant le jour du solstice d'été). Des calendriers égyptiens et babyloniens procèdent quant à eux de repères temporels saisonniers. Divers types d'appareils, divers types de systèmes, ont été imaginés pour mesurer le temps : la clepsydre, le cadran solaire, l'horloge puis les montres sont tous des moyens qui utilisent l'espace pour se repérer dans un cadre temporel.

Le temps a d'abord été mesuré grâce à des cycles. Le plus simple étant celui du jour et de la nuit. Le plus simple ? Voire ! car le jour et la nuit n'ont pas la même durée. Qui plus est, leur rapport varie tout au long de l'année et selon les latitudes.

(\*) Muséum National d'Histoire Naturelle . Géologie, 43, rue Buffon, 75005 Paris, France. Tél. 01 40 79 34 82 [dewever@mnhn.fr](mailto:dewever@mnhn.fr)

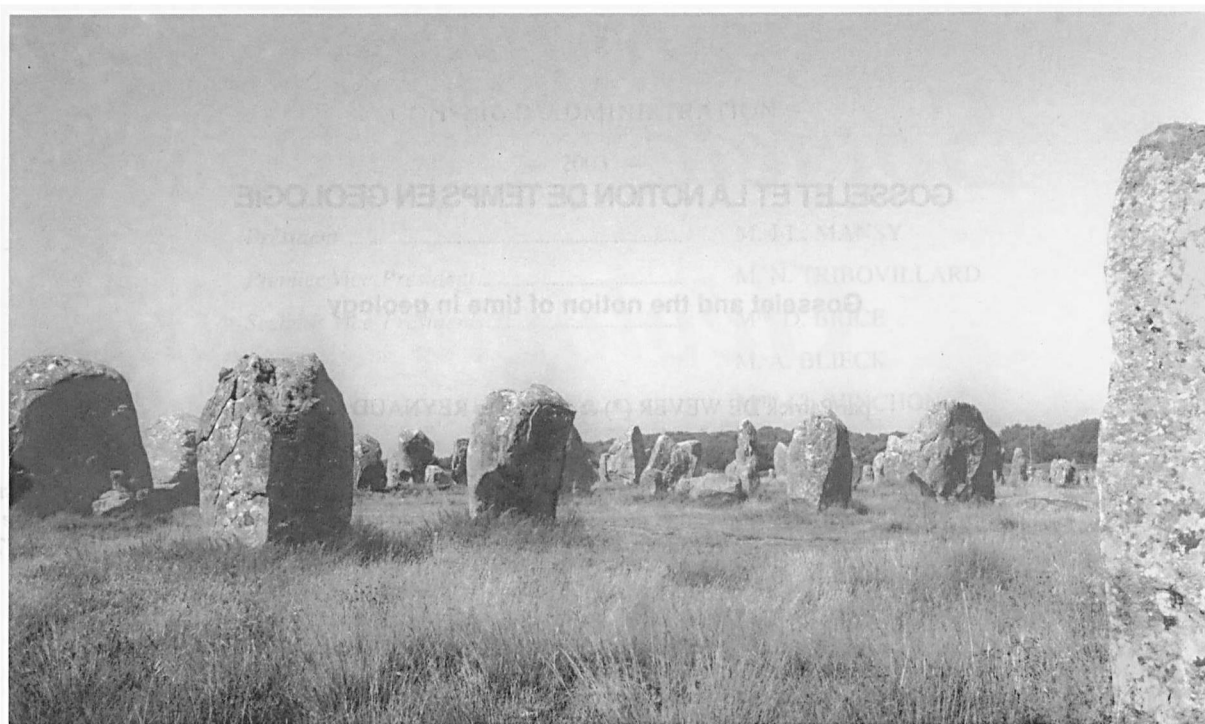


Fig. 1. — Alignement de menhirs de Carnac (Morbihan).

Fig. 1. — The Carnac alignments (southern Brittany, France).

Les chinois ont utilisé des cierges qui brûlent pour se repérer (on retrouve cette pratique dans certaines ventes aux enchères). Ils ont poussé la sophistication jusqu'à faire brûler des bâtons d'encens avec des parfums différents ; ainsi on ne lisait pas le temps, on le humait ! Le temps n'existe pas en soi, il nous apparaît grâce à des enregistrements ; il peut être appréhendé grâce à des repères. Le sablier en est la représentation la plus commune et la plus pertinente : il est du temps matérialisé dans l'espace.

Le temps est généralement simple et compréhensible quand il est court, il devient plus flou, plus difficile d'accès quand il est long. Il est alors nécessaire de disposer de repères. La mémoire collective permet d'amplifier la dimension du temps accessible. On peut dire : "autrefois, c'est là-bas et non ici que coulait la rivière". Des exemples dans la région se trouvent sur la côte : des blockhaus de la deuxième guerre mondiale (fig. 2), construits en arrière des dunes littorales, sont aujourd'hui sur la plage. Il est bien évident, même pour les générations qui ne les ont pas vu construire, qu'ils étaient sur la terre ferme. Alors que le recul de la côte n'est pas perceptible à l'œil nu, un marqueur spatial, tel qu'un blockhaus, démontre cette réalité. La recherche du temps est une notion fondamentale de l'approche de la nature. Il est en effet ce qui caractérise l'approche scientifique du géologue. Le physicien par exemple cherche à comprendre une loi, qui est valable quel que soit le moment, quel que soit l'instant, quand bien même le processus qu'elle explique s'inscrit dans la durée (voir le champ de la mécanique, par exemple). Le temps physique est généralement un paramètre extrinsèque dont la variation est indépendante de la loi qu'il permet de révéler. Le temps géologique, en revanche, est une variable intrinsèque, qui commande les lois géologiques. Le fait que la

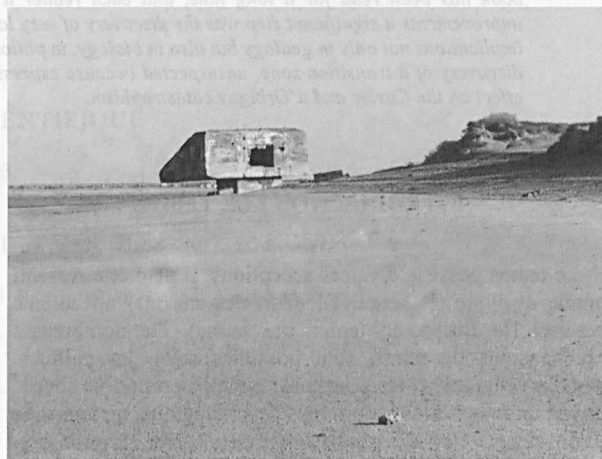


Fig. 2. — On a beau regarder la côte, on ne la voit pas reculer. Pourtant un repère spatial : le blockhaus, peut aussi servir de repère temporel et atteste de ce mouvement.

Fig. 2. — Even if one look at the coastline for a while : it does not move landward. However, a spatial landmark : a blockhouse acts as a temporal mark that testifies this movement.

physique explique théoriquement toutes les lois de la nature (même celles qui ne sont pas encore formulées) signifie seulement que cette opposition résulte d'un saut d'échelle. A grande échelle (l'échelle géologique), les processus sont régis par la physique du chaos, où l'élément temporel devient déterministe. Sans posséder la théorie de ces rapports entre physique et géologie, le géologue prend intuitivement le

temps en compte comme acteur et l'unité qu'il utilise est couramment le million d'années, dimension qui lui est propre. Et ceci, dans un cadre plus général, trahit peut-être un rapport particulièrement étroit entre science et humanité. Car la Terre et le temps sont liés dès l'Antiquité grecque, comme en témoigne la mythologie : le dieu Chronos est né de l'union d'Ouranos, le ciel et de Gaïa, la Terre.

La biodiversité et l'environnement actuels ne sont que la dernière image d'un film que les géologues reconstituent. Certaines images anciennes s'estompent, ou ont été gommées, ou n'ont jamais été enregistrées. Le travail du géologue est de restaurer le film à partir de données fragmentaires, d'où certaines méthodes spécifiques.

## II. — TEMPS STRATIGRAPHIQUE, UN TEMPS RABOUTE

En stratigraphie, seules sont gardées dans les terrains, et nous sont donc accessibles, des traces du temps et non le temps lui-même. Un phénomène même fugace, s'il est enregistré, nous parvient. C'est ainsi par exemple que l'on trouve des traces de gouttes d'une pluie tombée il y a 250 millions d'années, événement d'une fugacité extrême, mais qui a néanmoins été enregistré dans des sédiments.

Un autre exemple nous est fourni par des arbres silicifiés (fig. 3) dont les troncs présentent des cernes très bien conservés. On peut donc y retrouver les variations d'environnement d'une saison à l'autre (plus ou moins chaud et humide) pendant quelques décennies. Extrême précision donc, et pourtant l'âge de ces saisons ne nous est accessible qu'à quelques *milliers* ou *millions* d'années près.

Les phénomènes visibles laissent des traces qui nous permettent de reconstituer une histoire, donc l'accès à un temps ponctué de repères. Chaque couche représente une unité de temps. La superposition de couches est un

empilement de tranches de temps hétérogènes. Certaines couches, en certains endroits, peuvent servir de référence à valeur locale et, pour certaines, à valeur nationale, voire internationale. Ces localités, ces couches de référence, ces étalons du temps géologique, constituent des stratotypes, dans l'acception d'Alcide d'Orbigny (1849-1852). Il y a ainsi 43 stratotypes en France (fig. 4). Un stratotype ne peut être enfermé dans un pavillon de Breteuil, au même titre que d'autre étalons de mesure, il doit rester sur place, dans la nature. Aussi convient-il de le préserver et, par cette notion de temps, on accède tout naturellement à la notion de patrimoine géologique. Les stratotypes permettent de découper le temps, mais fournissent aussi une échelle discontinue par nature, puisqu'elle repose sur l'identification de ruptures biostratigraphiques majeures (ubiquistes et significatives d'un important changement).

Les premières études des géologues de terrain portaient presque exclusivement sur les caractères pétrographiques des roches sédimentaires et beaucoup d'anciens noms attribués à des séries de couches témoignent de ce rôle essentiel de leur nature pétrographique ("Crétacé", "Houiller", "Corallien" etc.). Pour avoir une signification, ces termes supposent implicitement que des couches de même composition sont de même âge. Or nous savons par la simple considération des environnements actuels de dépôt que la réciproque de ce postulat est souvent mise en défaut. Depuis William Smith (1815), la preuve habituelle du synchronisme des couches géologiques, surtout lorsqu'il s'agit de formations rencontrées à de grandes distances les unes des autres, est la présence de fossiles communs à ces divers dépôts ou de fossiles dont l'équivalence chronologique a été démontrée en un lieu donné (biostratigraphie).

Établir l'âge relatif des couches est *a priori* aisé, par la simple application du principe général qu'une couche géologique superposée à une autre est plus récente que celle-ci. Encore faut-il que la jonction spatiale des couches considérées soit directement observée. Ceci limite l'extension des aires où une stratigraphie directe peut être établie. Par

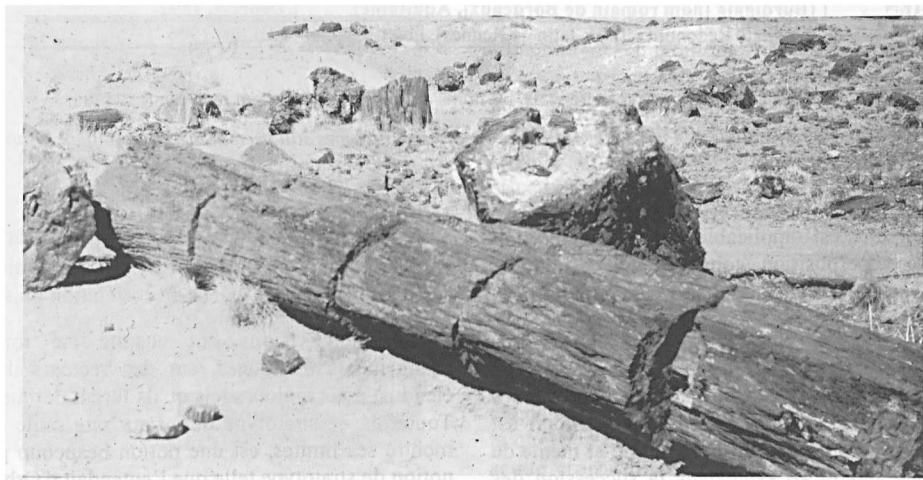


Fig. 3. — Le tronc silicifié permet de retrouver les variations saisonnières d'une année à l'autre

Fig. 3. — This silicified tree trunk allows to investigate seasons variability some millions years ago.

Etages	Origine	Auteurs
PENTEVRIEN	(Pays de Penthièvre, baie de Saint-Brieuc)	Cogné, 1959
BRIOVERIEN	( <i>Brioveria</i> , ancien nom celte de Saint-Lô, Manche)	Barrois, 1899
GIVÉTIEN	(Givet, Ardennes)	Gosselet, 1879
STRUNIEN	(Etroeungt, Nord)	Barrois, 1913
STEPHANIEN	(St Étienne, Haute-Loire)	Munier-Chalmas et de Lapparent, 1893
AUTUNIEN	(Autun, Saône-et-Loire)	Bergeron, 1889
HETTANGIEN	(Hettange-Grande, Moselle)	Renevier, 1864
SINEMURIEN	(Semur-en-Auxois, Yonne)	D'Orbigny, 1849-1850
LOTHARINGIEN	(Lorraine ; de Lotharingie, province mérovingienne)	Haug, 1910
TOARCIEN	(Thouars, Deux-Sèvres)	D'Orbigny, 1849
BAJOCIEN	(Bayeux, Calvados)	D'Orbigny, 1849
VESULIEN	(Vesoul, Haute-Saône)	Marcou, 1848
SÉQUANIEN	(des Séquanes, tribu gauloise de sources de la Seine)	Marcou, 1848
CRUSSOLIEN	(Crussol, Ardèche)	Rollier, 1909
ARDESCIEN	(Ardèche [Ardesca] )	Toucas, 1890
BERRIASIEN	(Berrias, Ardèche)	Coquand, 1862
BARRÉMIEN	(Barrême, Alpes-de-Haute-Provence)	Coquand, 1862,
APTIEN	(Apt, Vaucluse)	D'Orbigny, 1840
BÉDOULIEN	(Bédoule, Bouches-du-Rhône)	Toucas, 1888
GARGASIEN	(Gargas, Vaucluse)	Kilian W., 1887
CLANSAYÉSIEN	(Clansayes, Drôme)	Breitschiff, 1947
ALBIEN	(de <i>Alba</i> , rivière l'Aube, Aube)	D'Orbigny, 1842
CÉNOMANIEN	(Cenomanum, [n.lat. de Le Mans], Sarthe)	D'Orbigny, 1847
TURONIEN	(Tours, Indre-et-Loire)	D'Orbigny, 1842
SENONIEN	(Sens, Yonne ; de la tribu gauloise des Sénones)	D'Orbigny, 1842
CONIACIEN	(Cognac, Charente)	Coquand, 1857
SANTONIEN	(Saintes, Charente-Maritime)	Coquand, 1857
CAMPANIEN	(pays de Champagne, Charente)	Coquand, 1857
VALDONNIEN	(Valdonne [lieu-dit], Bouches-du-Rhône)	Matheron, 1878
FUVÉLIEN	(Fuveau, Bouches-du-Rhône)	Matheron, 1878
BÉGUDIEN	(La Bégude [lieu-dit], Bouches-du-Rhône)	Villot, 1883
ROGNACIEN	(Rognac, Bouches-du-Rhône)	Villot, 1883
VITROLIEN	(de Vitrolles, Bouches-du-Rhône)	Matheron, 1878
GARUMNIEN	(Garumna [n. lat. de Garonne], Haute-Garonne)	Leymerie, 1862
SPARNACIEN	(Sparnacum [n. lat. d'Epemay], Mame)	Dollfus, 1880
CUISIEN	(Cuise-la-Motte, Oise)	Dollfus, 1880
LUTÉTIEN	( <i>Lutetia</i> [n. lat. de Paris] )	De Lapparent, 1883
BIARRITZIEN	(Biarritz, Pyrénées-Atlantiques)	Hottinger et Schaub, 1960
AUVERSIEN	(Auvers-sur-Oise, Val d'oise)	Dollfus, 1880
MARINESIEN	(Marines, Val d'oise)	Dollfus, 1907
LUDIEN	(Ludes, Marne)	Munier-chalmas et de Lapparent, 1893
SANNOISIEN	(Sannois, Seine-et-Oise)	Munier-chalmas et de Lapparent, 1893
STAMPIEN	(Stampae [n. lat. d'Etampes], Essonne)	D'Orbigny, 1852
AQUITANIEN	(Aquitaine)	Mayer-Eymar, 1858
BURDIGALIEN	(Burdigala [nom romain de Bordeaux], Aquitaine)	Depéret, 1892
REDONIEN	(Condate Redonum – [nom latin de Rennes], Ile-et-Vilaine)	Dollfus, 1906

Fig. 4. — Liste des 43 stratotypes français, les noms qui restent valides sont mentionnés en gras.

Fig. 4. — List of the 43 french stratotypes. In bold characters are reported stratotypes still used in the International Stratigraphic Scale.

ailleurs, ce principe n'est applicable qu'à la condition essentielle que la superposition constatée soit originelle, vérification parfois fort délicate dans les régions très déformées.

Les premiers stratigraphes européens s'attachent donc à décrire des histoires locales. Parmi eux, William Smith est considéré comme le fondateur de la stratigraphie et même de la biostratigraphie ; il voit en effet dans la succession des dépôts sédimentaires une figuration de l'écoulement du temps ; il reconnaît leur continuité dans l'espace et a recours aux fossiles pour distinguer entre elles des couches lithologiquement semblables.

La notion d'étage fut introduite en 1842 et reprise en 1847 et 1849 par d'Orbigny avec le souci majeur de donner à ces subdivisions une valeur de corrélation plus générale.

Les subdivisions ont ensuite été fondées sur des changements de faunes, sur des secteurs de plus en plus étendus, mais toujours tels qu'ils furent définis par d'Orbigny. Toutefois, le stratotype défini sur une seule coupe, et qui a montré ses limites, est une notion beaucoup plus tardive. La notion de stratotype telle que l'entendait d'Orbigny était basée sur des catastrophes, des grands changements de la biosphère (séparant les « créations » successives). Il succédait en cela à Cuvier (fig. 5) et ses grandes « révolutions du globe ». La Terre était ainsi découpée en périodes qui n'avaient presque rien à voir les unes avec les autres (fig. 6).

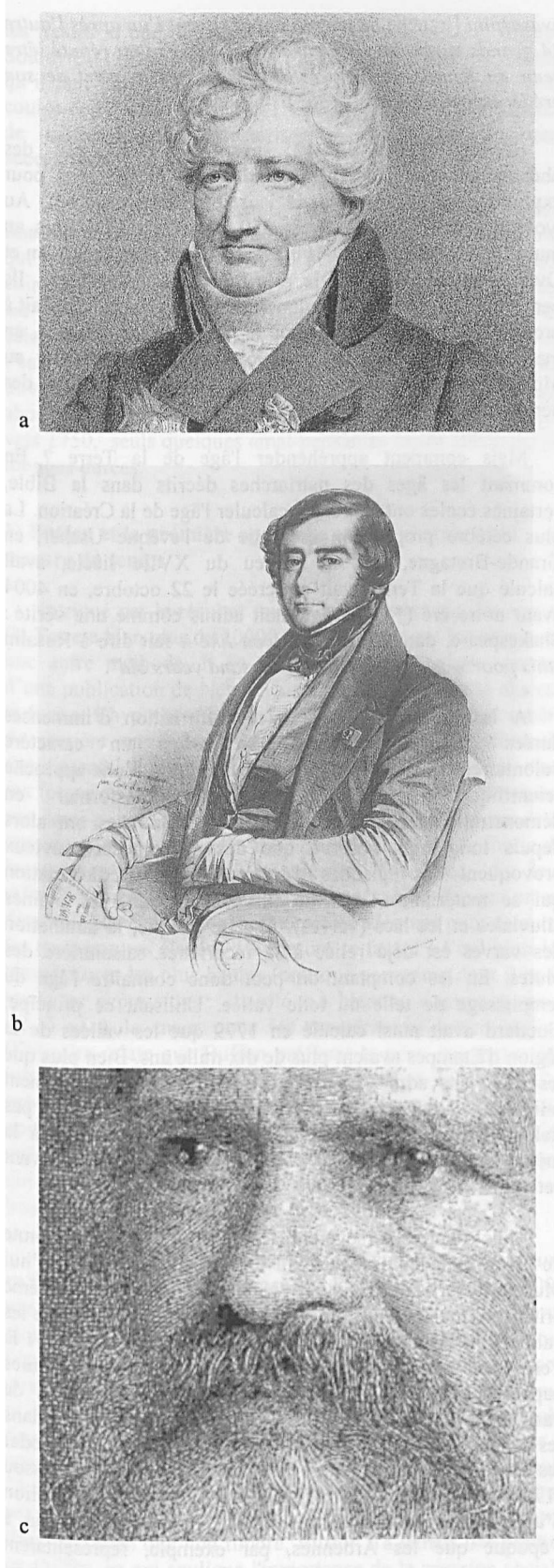


Fig. 5. — Portraits de Georges Cuvier (a), Alcide d'Orbigny (b) et Jules Gosselet (c) (extrait)

Fig. 5. — Portraits of Georges Cuvier (a), Alcide d'Orbigny (b) and Jules Gosselet (c) (part).

Gosselet a participé à ce mouvement de « découpage » du temps en modifiant des étages ou en créant de nouveaux. C'est ainsi par exemple qu'en 1879, il subdivise le Famennien en trois et en exclut le Frasnien, à qui il donne la signification actuelle. En 1879, il réduit le terme Eifélien (introduit par Dumont en 1848) à l'assise à *Calceola* (partie supérieure de l'étage couvinien). Il donne des sens différents au Coblencien (introduit aussi par Dumont en 1848). Il groupe d'abord (1880) la grauwacke de Montigny et les couches qui correspondent à l'Emsien actuel. Puis, en 1888, Gosselet réunit le Coblencien de Dumont et les couches de l'Ardenne équivalant aux *Coblenschisten* des Allemands. Ce nom de Coblencien a finalement été abandonné du fait de ses trop nombreux sens différents. L'étage correspondant a été découpé en Siegénien et Emsien. En 1876, Gosselet définit le Givétien (introduit en 1839 par d'Omalius d'Halloy) avec deux parties bien individualisées : le calcaire de Givet ou calcaire à *Stringocephalus burtini* et l'assise de Fromelennes à *Lyriopecten gilsoni*.

En 1857, alors qu'il a vingt-cinq ans, Gosselet présente une coupe détaillée qu'il a levée dans les carrières d'Etrœungt. Le Strunien (le terme ne sera introduit par Barrois qu'en 1913), qui correspond à la zone d'Etrœungt, est caractérisé par un niveau de calcaires coquilliers et de schistes contenant la dernière faune dévonienne, dans laquelle s'insèrent des fossiles de la base du Carbonifère (Toumaisien). "Gosselet, pour ses débuts, faisait beaucoup de bruit, il était taxé de révolutionnaire en géologie par le vénérable d'Omalius d'Halloy" dira Barrois en 1920. Ce Strunien dont parle Gosselet ne contient rien de plus que des faunes de transition, mais elles signifient que les changements sont beaucoup moins brutaux que ce qu'ils étaient supposés être jusque-là. Cette découverte de Gosselet met un terme au catastrophisme de Cuvier et d'Orbigny.

D'Orbigny, suivant en cela Cuvier, affirmait que chacun des étages qui se sont succédés dans les âges du monde renferme sa faune spéciale, bien tranchée, distincte des faunes inférieures et supérieures, et que ces faunes ne se sont pas succédées par passage de forme, ou par remplacement graduel, mais par un « anéantissement brusque » (1842, 1849). D'Orbigny va même plus loin que Cuvier sur cette voie : si ce dernier admettait peu de catastrophes (car il admettait des migrations), d'Orbigny admet seulement « la création successive des espèces à chaque époque géologique ». Ce radicalisme a pû gêner, à la fois ceux de ses collègues athées qui voyaient dans ces créations une voie ouverte sur l'intervention divine dans l'élaboration du monde et ceux qui, dévots, pouvaient en déduire que Dieu avait dû s'y reprendre à plusieurs fois pour parachever sa Création.

### III. — TEMPS COMPTE

A mesure qu'on approfondissait les connaissances sur les temps anciens et qu'on s'enfonçait dans le passé de la Terre, la question de l'âge absolu de ces terrains se posait avec une acuité croissante, et avec elle celle de l'âge de la Terre. La stratigraphie, en étudiant de proche en proche les terrains superposés, déterminait leur âge relatif et permettait de les disposer en une colonne comme l'avaient fait les *géognostes*, mais sans pouvoir dire leur durée et leur ancienneté en années.

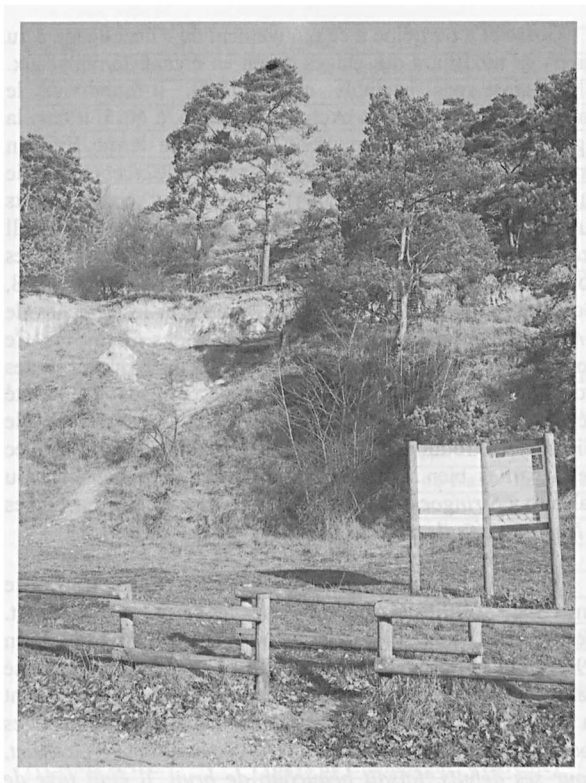


Fig. 6. — Un stratotype préservé : le Stampien à Etrechy.  
Le défi du stratigraphe est de reconstituer les événements du passé dans un temps continu à partir d'enregistrements fondamentalement discontinus. Les stratotypes ont une valeur scientifique puisqu'ils sont des étalons. Ils relèvent du domaine patrimonial et méritent d'être sauvegardés ; peu d'entre eux le sont. Ainsi, sur les 43 stratotypes français, seulement 12 sont protégés.

Fig. 6. — A preserved stratotype : Stampien (Etrechy, Essonne).  
The challenge for a stratigrapher is to reconstruct passed events in a continuous story from records which are fundamentally discontinuous. Stratotypes have a scientific value, being a standard. They belong to geological heritage and are worth to be preserved. Only some of them are: among the 43 stratotypes in France, only 12 are protected.

Le mouvement lent des étoiles dans le ciel nous enseigne un temps long, astronomique, et nous, par rapport à ces astres, nous avons conscience de n'appartenir qu'à un temps court. Ainsi le temps terrestre est un temps court. Pourtant, même à l'échelle humaine, on constate que la Terre change (fig. 2) : le temps court a donc comme corollaire des événements brefs, violents, des catastrophes. Toute prête dans les esprits, tenue pour historique, la catastrophe du déluge est très tôt apparue comme une nécessité.

De fait, depuis longtemps se heurtaient les tenants de la durée « courte » et ceux de la durée « longue ». Dans la mythologie indoue, bien avant notre ère, le concept de temps long semble accepté : « chez les jaïns, le temps est représenté par une roue qui fait une révolution complète en deux quadrillions d'océans d'années (...) au cours de chaque

*avasarpini* [tranche de temps] apparaissent l'un après l'autre 24 grands sages, les *tirthankaras* (...) le 23<sup>e</sup> est réputé être venu au monde, à Bénarès, 84 000 après la mort de son prédécesseur » (Grimal, 1963).

Hérodote (env. 484-425 avant J.C.) évoquait des phénomènes qui puissent s'étendre sur 20 000 ans pour expliquer certains aspects de la sédimentation du Nil. Au lycée d'Athènes encore (vers 350-200 avant J.C.) puis au musée d'Alexandrie (280-100 avant J.C.), Aristote, Straton et Ovide se penchèrent sur le rôle du temps en géologie. Ils pensaient déjà que l'accumulation de petites causes suffisait à produire de grands effets. Mais la pensée gréco-romaine, en matière de durée des temps géologiques, va péricliter au Moyen-Age, relayée par les enseignements bibliques des pères de l'Eglise.

Mais comment appréhender l'âge de la Terre ? En sommant les âges des patriarches décrits dans la Bible, certaines écoles ont cherché à calculer l'âge de la Création. La plus célèbre proposition est celle de l'évêque Ussher, en Grande-Bretagne, qui, au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle, avait calculé que la Terre avait été créée le 22 octobre, en 4004 avant notre ère (\*). Cet âge était admis comme une vérité : Shakespeare, dans la pièce *As you like it* fait dire à Rosalind "this poor world is almost six thousand years old".

A la fin du XVII<sup>e</sup> siècle, l'affirmation d'immenses durées (millions d'années) a parfois un caractère volontairement subversif, qu'il relève ou non d'une approche scientifique. L'affirmation va se transformer en démonstration au XVIII<sup>e</sup> siècle. Les naturalistes ont alors depuis longtemps observé que des événements pluvieux provoquent des épisodes d'érosion-transport-sédimentation qui se matérialisent par de fins dépôts dans les plaines alluviales et les lacs (varves). A cette époque, la lamination des varves est déjà reliée à la récurrence saisonnière des pluies. En les comptant on peut donc connaître l'âge du remplissage de telle ou telle vallée. Utilisant ce principe, Guettard avait ainsi calculé en 1779 que les vallées de la région d'Etampes avaient plus de dix mille ans. Bien plus que les 6000 ans admis pour l'âge de la Terre. Profondément religieux, Guettard en déduisit que sa méthode n'était pas fiable. Outre Manche, l'abbé Needham était parvenu à la même conclusion en 1769 et avait reculé également devant cet abîme temporel.

Mais d'autres persévèrent. Georges Louis Leclerc, comte de Buffon, célèbre régent du Jardin du Roi, aujourd'hui Muséum National d'Histoire Naturelle, applique le même principe dans ses terres de Bourgogne. Il trouve alors que les vallées ont beaucoup plus de 10 000 ans, et qu'*a fortiori* la Terre est encore bien plus âgée. Quelques décennies auparavant, H. Gautier (1721) avait calculé « combien de vase les rivières emportent des continents chaque année dans les mers » et il en avait déduit le temps nécessaire pour éroder les continents. En suivant cette méthode, l'abbé Palassou (1784) était arrivé à dire qu'il faut au moins un million d'années pour éroder les Pyrénées. Or, on savait déjà à l'époque que les Ardennes, par exemple, représentaient

(\*) Pour être tout à fait précis sur les faits et la date, le calcul a été formalisé en 1654 par l'archevêque James Ussher qui est remonté jusqu'à Adam et Eve, puis repris et affiné quelques années plus tard à Cambridge par le Dr. John Lightfoot, qui écrivit : "Heaven and Earth, center and circumference, were made in the same instance of time, and clouds full of water, and man was created by the Trinity on the 26th of October 4004 B.C. at 9 o'clock in the morning."



les restes d'une ancienne chaîne de montagnes. L'abbé Soulavie (1784), à partir de l'étude de l'altération, estime qu'il faut plus de 6 millions d'années pour araser une seule coulée de lave. Cuvier, en 1812, parle également de « milliers de siècles » pour caractériser la durée des créations successives.

La nécessité de longues durées géologiques traduit finalement un mouvement collectif de la pensée européenne, qui s'appuie de plus en plus sur la phénoménologie physico-chimique. Une estimation de la durée des temps géologiques est tentée par l'astronome Halley, en 1715, sur la base de calculs fondés sur l'accroissement inexorable de la salinité de l'eau de mer depuis la condensation de l'océan primitif. Ses travaux sont repris par Joly à la fin du XIXe siècle (1899) qui aboutit à un âge de 90 millions d'années. Toutefois, jusque vers 1750, seuls quelques « mal-pensants » isolés affirment les longues durées.

### 1) Buffon et la première approche expérimentale de la mesure du temps

Intrigué par le résultat fourni par le comptage des varves (la Terre a bien plus de 10000 ans), Buffon veut le tester avec une autre méthode. Il se tourne vers la physique, partant d'une publication de Newton sur la propagation de la chaleur et faisant l'hypothèse que la Terre originelle était une sphère de matière en fusion. Buffon définit alors un protocole expérimental rigoureux. Il fait forger 10 boulets de fer, dans ses forges de Bourgogne, dont le diamètre varie régulièrement par demi-pouce, avec comme diamètre minimum ½ pouce et maximum 6 pouces. Il les fait ensuite chauffer à la limite de leur point de fusion et mesure la durée de leur refroidissement. Notons au passage qu'à cette époque on ne disposait pas encore des thermomètres adéquats pour mesurer les températures élevées : la mesure se faisait à l'œil pour les températures les plus hautes (pratique commune dont il reste quelques expressions : chauffé « à blanc », « rouge cerise » etc...) et à la main pour les températures intermédiaires (l'histoire relate que Buffon préférait la peau des mains des jolies dames : plus sensibles elles étaient réputées plus précises). Les mesures obtenues montrent une corrélation positive entre diamètre des boulets et durée de refroidissement, ce dont Buffon tire une régression graphique qui lui permet d'extrapoler à la durée de refroidissement d'un boulet dont la taille serait celle de la Terre.

Dans une première publication, *Les époques de la Nature* en 1779, Buffon annonce ainsi que la Terre doit avoir 25 000 ans, un âge on l'a vu bien plus important que celui admis alors par l'Eglise. La hardiesse de la pensée de Buffon, pour l'époque, confine à la témérité. D'ailleurs, à la sortie de son ouvrage, Buffon écrit de Paris à un ami : « *Je mets donc pour le moment présent mon salut dans la fuite et je pars dimanche pour arriver à Montbard* » (son fief de Bourgogne). Mais il continue ses travaux et publie successivement 50 000 puis 75 000 ans. Les carnets de Buffon révèlent quant à eux que ses expériences donnent à la Terre plus de 10 millions d'années. Bien que non timoré, Buffon n'a jamais osé publier ce chiffre, ce qui souligne l'importance de la pression sociale et morale sur les déductions scientifiques. Mais sa conviction était intacte et la vertu de son étude transparait dans la dernière phrase de son livre : « *Le temps semble fuir et s'étendre à mesure que nous cherchons à le saisir (...) plus nous étendrons le temps et plus nous approcherons de la*

*vérité et de la réalité de l'emploi qu'en a fait la nature* ». S'il s'en tient finalement à une chronologie officielle plus courte, il ne peut s'empêcher d'en expliquer la cause en ces termes : « *néanmoins il faut raccourcir autant qu'il est possible pour se conformer à la puissance limitée de notre intelligence.* »

Les expériences de Buffon ont un retentissement important sur la pensée de son époque : c'est tout à la fois la réémergence et la démonstration de la notion de longue durée des temps géologiques. Certains de ses contemporains le soutiennent, d'autres s'opposent à lui. Guettard lui écrit : « *Encore des Buffonades mon cher comte, jusqu'à quand serez-vous le Cyrano de Bergerac. Comment avec l'esprit brillant que vous avez, avec la plume élégante et délicate dont vous tracer vos idées hypothétiques, est-ce que vous ne pouvez embellir les vérités connues. Votre esprit est donc porté au romanesque. Eh bien faites des romans, mais qu'ils ne soient pas physiques, ou plutôt n'en faites d'aucun genre. (...) vous voulés briller tout ce que vous dites. Mais pour quoy donner ce brillant à la vérité (...) Elle serait toute nue, jugez qu'elle attrait l'on aurait pour elle, si vous n(e l') aviez pompomadaé à votre façon. Il est bien tard, il est vrai, pour revenir sur vos pas (...) mais vous êtes donc incorrigible. Cela n'est pas bien mon cher comte, cela n'est pas bien.* » D'un autre côté, Buffon bénéficiait de soutiens tel celui de Lamarck qui écrivait : « *Oh ! qu'elle est grande, l'antiquité du globe terrestre ! et combien sont petites les idées de ceux qui attribuent à l'existence du globe une durée de six mille et quelques cents ans, depuis son origine jusqu'à nos jours !* ». Avec Lamarck le temps long fait également irruption en biologie et c'est un progrès fondamental, qui ouvre la porte à la théorie de l'évolution des espèces. En effet, s'il est difficile d'admettre que les espèces ont pu évoluer en 6000 ans, on conçoit facilement qu'elles ont pu le faire si elles ont disposé de plusieurs dizaines de milliers d'années. Les idées de Buffon seront également reprises en Angleterre par Charles Lyell (1830) : « *si on est convaincu de l'immense durée des temps géologiques, les catastrophes deviennent superflues et tout peut s'exprimer par une évolution lente : évolution et non révolution* ». La reconnaissance d'un temps long n'invalidait pas pour autant les catastrophes en tant que facteur de changement global, mais cette idée ne sera à nouveau dominante que dans le courant du XXe siècle, avec le débat sur les crises biologiques.

### 2) L'avènement de la physique

Buffon fait figure de pionnier pour avoir contribué à développer le concept de temps et la notion de la durée en histoire naturelle. Il s'exprime sans ambiguïté sur ce sujet : « *Tout s'opère parce qu'à force de temps tout se reconstruit. Le grand ouvrier de la nature c'est le temps, par degrés, par nuances, par succession, il fait tout* ». Il dit encore : « *pour juger de ce qui est arrivé et même de ce qui arrivera, nous n'avons qu'à examiner ce qui arrive. Rien n'autorise à s'écarter des effets qui arrivent tous les jours. La géologie, comme l'histoire humaine, est la résurrection de passé à la lumière du présent* ». Ceci pourrait constituer l'une des premières formulations de l'actualisme.

Au XIXe siècle, les géologues vont développer considérablement leurs travaux sur le terrain. L'essor de la paléontologie stratigraphique va leur livrer des points de repères (apparitions et extinctions des fossiles), permettant

des corrélations au niveau d'un pays, puis d'un continent. Cependant, l'utilisation des fossiles, eu égard aux théories de l'époque sur l'évolution des êtres vivants, ne va pas sans poser d'importantes et lancinantes interrogations sur le temps nécessaire à cette évolution et, partant, sur la durée des époques distinguées à partir des fossiles. Darwin (1859) va s'y essayer dans *L'origine des espèces* et propose l'écoulement du temps de l'ordre de 300 millions d'années depuis la fin du Secondaire. Ce temps, obtenu à partir d'un calcul sur la durée nécessaire au creusement d'une vallée dans le Sud-Est de l'Angleterre, est trop long, mais l'ordre de grandeur est correct. Cependant, à l'époque de Gosselet, quelques années avant la fin du XIXe siècle, l'âge de la Terre reste encore très indéterminé. Les propositions vont de quelques millions à des centaines de millions d'années. Albert de Lapparent, à la fin du XIXe siècle, écrit qu'un âge entre 90 et 100 millions d'années « *semble raisonnable* », ce qui sera admis par la plupart des géologues français mais montre clairement le vide méthodologique qui demeure.

Ce sont les physiciens qui vont le combler. Déjà, en 1820, dans une approche comparable à celle de Buffon (refroidissement par rayonnement d'énergie), mais uniquement fondée sur le calcul, Fourier aboutit lui aussi à un âge de plusieurs dizaines de millions d'années. Lord Kelvin propose en 1864 un âge de 98 millions d'années dans une fourchette comprise entre 20 et 400 Ma. Après beaucoup de révisions il se prononcera en faveur d'un âge de 24 millions d'années. Kelvin, en tant que physicien, combat farouchement les principes formulés par Charles Lyell et tout particulièrement la notion de temps très long. En effet, au nom du principe de la conservation de l'énergie et compte tenu de l'existence aisément vérifiable du gradient géothermique, la Terre perd de la chaleur. Or l'énergie d'un système est finie. L'activité terrestre liée à cette dissipation d'énergie va donc en diminuant au cours du temps. Pour Kelvin, l'idée d'une activité terrestre cyclique est donc fautive sur le plan fondamental. Pour contrer l'attaque de Kelvin, Lyell propose alors qu'il y ait création d'énergie à l'intérieur de la Terre : intuition géniale mais écartée par Kelvin.

Le saut qualitatif et quantitatif dans la nuit des temps se produit grâce à la découverte de la radioactivité par les frères Becquerel, en 1896, au Muséum National d'Histoire Naturelle. Rutherford montre que la désintégration radioactive est calculable en fonction du temps, ce qui en fait une horloge potentielle. Avec lui, Holmes établit une échelle chronologique absolue. On estime alors l'âge de la Terre à au moins 3 milliards d'années. C'est le début du XXe siècle. On s'aperçoit au passage que Lyell avait raison et que Kelvin avait tort : l'énergie nécessaire à un renouvellement des processus géologiques est bel et bien produite dans les matériaux terrestres.

### 3) La radiochronologie et ses retombées disciplinaires

Avec la radiochronologie, le géologue accède à des âges chiffrés et cela va tout changer. Les étages ne se placent plus seulement dans le calendrier en vertu de leur contenu en fossiles mais aussi de leur âge absolu. Sur le terrain, les roches sédimentaires azoïques et les roches cristallines prennent subitement place dans l'histoire géologique. Grâce à l'aptitude à dater systématiquement, un modèle géologique global est en marche.

En ce qui concerne la stratigraphie, l'avalanche de données quantitatives liées à la mise en œuvre systématique de datations absolues a forcé la recherche à produire de nouvelles théories paléontologiques ou du moins à préciser les anciennes. Le concept stratigraphique fondateur ayant le plus bénéficié de ces avancées est sans conteste la notion de lacune stratigraphique (de hiatus temporel). La présence de lacunes stratigraphiques n'était pas implicite dans la reconnaissance de discontinuités, de ruptures. Auparavant, les ruptures étaient considérées au contraire comme les « *clous d'or* », les points de passage du temps stratigraphique. Dater une discontinuité n'avait, dans la théorie des stratotypes, que le sens de préciser la date du passage de la série inférieure à la série supérieure. La connaissance, par datation absolue, des strates bordant les discontinuités a permis de comprendre que, généralement, elles ne sont pas des points mais des segments du temps unidimensionnel : des lacunes.

Cette évidence a été comprise globalement à partir de la reconnaissance sismique des marges continentales et mise en théorie par la suite avec la stratigraphie séquentielle. L'intérêt stratigraphique de ce modèle est de fournir un cadre chronologique et paléoenvironnemental prédictif aux passages latéraux de faciès et aux équivalents latéraux des lacunes/hiatus. Les stratotypes historiques (fig. 6) étaient généralement des coupes de domaines littoraux à infralittoraux de plateforme épicontinentale, paléo-écologiquement riches mais ponctuées de nombreuses érosions ou condensations. De nouveaux stratotypes issus du domaine marin profond ont vu le jour, forçant les paléontologues à évoluer dans leur perception de la paléoécologie marine, soit en donnant lieu à la définition de nouveaux groupes de fossiles utiles pour la biozonation, soit en modifiant l'extension bathymétrique et chronologique du domaine d'incidence d'autres groupes.

Les réflexions sur l'évolution des espèces ont également profité de la découverte de lacunes aux limites d'étages. En particulier, certains exemples de la théorie des équilibres ponctués (fig. 7) ont été rejetés car ils ont été développés à partir d'enregistrements biostratigraphiques non linéaires (une stase pouvant alors correspondre à un intervalle de dilatation de l'enregistrement de la spéciation et un saut à une phase de condensation de cet enregistrement).

On peut aujourd'hui dater les séries marines et continentales (fossiles et minéraux authigènes), les chaînes de montagnes (minéraux isobares), les subductions (phases fluides), le volcanisme (point de cristallisation) etc... Des bases de données chronologiques trans-disciplinaires fondées sur un référentiel en âges absolus sont constituées, sur lesquelles reposent les nouvelles chartes stratigraphiques internationales, ainsi que des progrès conceptuels, notamment en ce qui concerne les couplages biosphère-géosphère et, dans les « temps courts », le fonctionnement de la machine thermique de l'océan. Dans les « temps longs », un modèle « géognosique » global se dessine, reliant les grandes étapes et les grands rythmes de l'évolution des enveloppes, même profondes, du globe à celles de la biosphère. Les progrès les plus récents dans ce domaine concernent les grandes crises de la paléobiodiversité. Ils tendent à montrer la rétroaction, par le biais du volcanisme, des cycles des supercontinents sur la composition de l'atmosphère et de l'océan et, par là, sur les extinctions en masse.

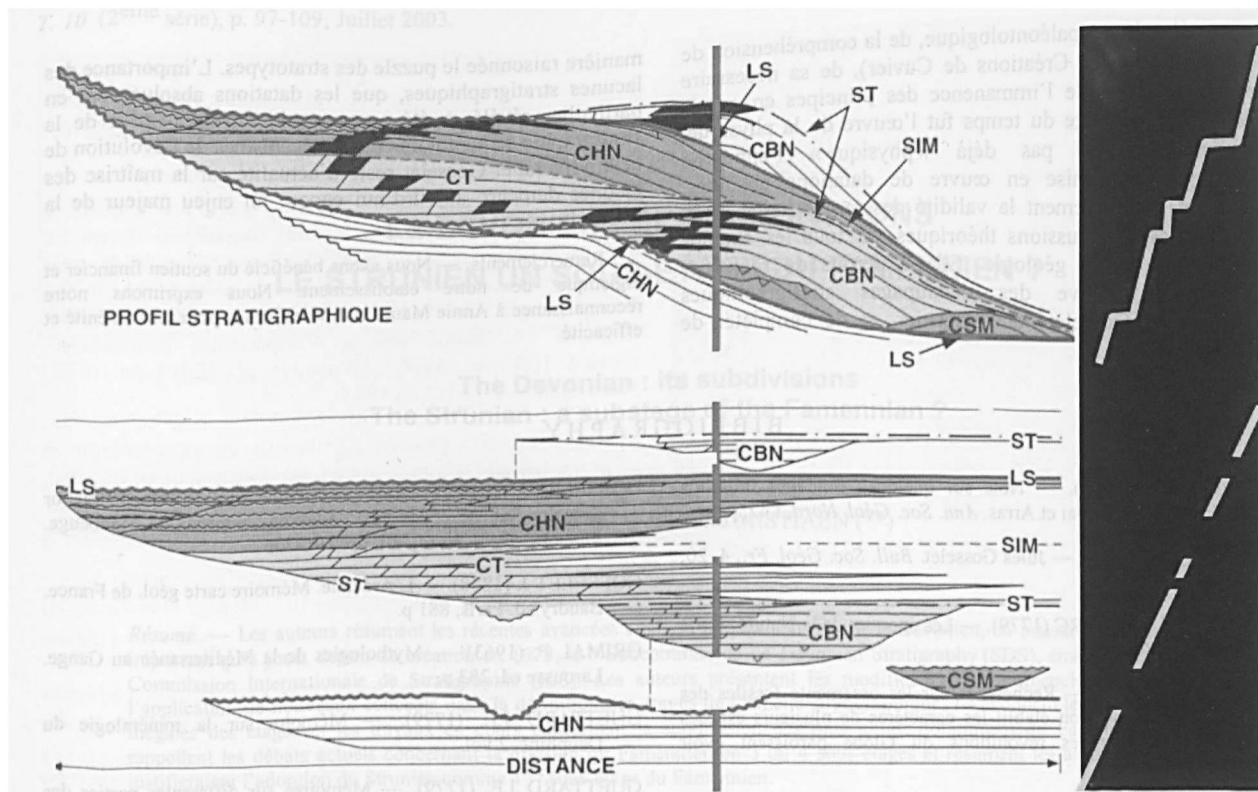


Fig. 7. — Modèle de stratigraphie séquentielle : la figure du haut montre l'empilement des cortèges sédimentaires dans un cadre spatial, et celle du bas leur occurrence dans le domaine temporel (diagramme espace-temps ou chronostratigraphique). Le cartouche noir à droite figure l'enregistrement unidimensionnel d'un paramètre du système dans les deux représentations.

Fig. 7. — Sequence stratigraphic model: sedimentary bodies are represented in a vertical spatial frame (upper figure) or in a vertical temporal frame (lower figure). The black cartoon to the right side of the figures represents the pattern of an unidimensional record in both displays.



Fig. 8. — Le Grand canyon du Colorado est l'un des meilleurs représentants de l'enregistrement du temps de la Terre ; la moitié de son histoire y est en effet exposée : environ 2000 millions d'années de là où coule le Colorado, jusqu'aux laves noires des plateaux. Il est aussi une excellente représentation de ce qu'est un enregistrement sédimentaire : essentiellement lacunaire. La discordance de Cambrien sur le Précambrien en est une illustration.

Fig. 8. — Great Canyon (Colorado) is one of the best example of the Earth age record: almost half of its history is exposed. Circa 2000Ma from where the Colorado river runs, up to the basaltic lavas capping the plateau. It is also an excellent image of what is the sedimentary record: essentially lacunas, as depicted here by the angular unconformity of Cambrian overlying Precambrian sandstones.

Curieux retour de l'histoire, l'accès au temps mesuré a permis de se défaire de l'idée (fausse) d'instantanéité des crises biologiques, correspondant, vers la fin du XXe siècle, à un retour des théories catastrophiques (l'exemple le plus célèbre étant celui de la grande météorite du Yucatan pour expliquer la disparition des dinosaures à la limite Crétacé/Tertiaire).

#### IV. — CONCLUSION

L'histoire de la géologie découle de la connaissance d'une chronologie, elle-même liée à une technique : la géochronologie. Les « techniques », en ce sens, sont porteuses de développements conceptuels. La géologie historique, y compris la grande géologie alpine qui mène à la tectonique des plaques en passant par la théorie des géosynclinaux, a toujours une origine stratigraphique. Et le fondement de la géologie stratigraphique est un intérêt consubstantiel pour le temps de la Terre. La perspective d'un temps long, présente dans les mythologies et dans la culture méditerranéenne de l'Antiquité, a été supplantée au Moyen-Âge par une vision biblique, révélée, de l'Histoire de la Terre, qui impliquait i) sa Création par Dieu *ex nihilo* ; ii) un âge « historique » de la Terre (6000 ans). Un des objectifs de la science en marche, à partir de Galilée, a été de substituer à l'histoire biblique de la Terre une histoire fondée sur la mesure des objets naturels reliques des temps passés. Après

une première étape, paléontologique, de la compréhension de la Terre passée (les Créations de Cuvier), de sa nécessaire durée (Buffon) et de l'immanence des principes en œuvre (Lyell), le décryptage du temps fut l'œuvre de la physique, mais n'appelait-on pas déjà « physique » l'approche scientifique ? La mise en œuvre de datations absolues, établissant définitivement la validité des temps longs, a en outre eu des répercussions théoriques sur tous les champs disciplinaires de la géologie. Elle a permis de réévaluer l'importance relative des découpages stratigraphiques anciens, dont Gosselet était l'héritier, et de compléter de

manière raisonnée le puzzle des stratotypes. L'importance des lacunes stratigraphiques, que les datations absolues ont en particulier révélé, a été au cœur du développement de la stratigraphie séquentielle et des mécanismes de l'évolution de la biodiversité. Gosselet reste d'actualité car la maîtrise des lacunes demeure aujourd'hui encore un enjeu majeur de la géologie.

Remerciements. — Nous avons bénéficié du soutien financier et logistique de notre établissement. Nous exprimons notre reconnaissance à Annie Maurs et Annie Cornée pour leur aménité et efficacité

## BIBLIOGRAPHY

- BARROIS Ch. (1913). — Note sur quelques sondages profonds exécutés entre Douai et Arras. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t.42, p.6.
- BARROIS Ch. (1921). — Jules Gosselet. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 4, 20, pp. 97-109.
- BUFFON G-L LECLERC (1779). — Les époques de la Nature. *Paris Imp. Royale*. 2 vol.
- CUVIER G. (1812). — Recherches sur les ossements fossiles des quadrupèdes où l'on établit les caractères de plusieurs espèces d'animaux que les révolutions du Globe paroissent avoir détruites. Paris.
- DARWIN C.R. (1859). — On the Origin of Species by means of Natural Selection, or Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life. J. Murray, Londres.
- D'ORBIGNY A. (1842-1860). — Paléontologie Française, Paris, 9 volumes.
- D'ORBIGNY A. (1849-1852). — Cours élémentaire de paléontologie et de géologie stratigraphiques. 3 volumes.
- DUMONT A. (1848). — mémoire sur les terrains ardennais et rhénan de l'Ardenne, du Rhin, du Brabant et du Condros. *Acad. Roy. Belgique*, 613 p.
- FOURIER J (1820). — Températures du globe terrestre, *Ann. Chim. Phys.*, 13, pp. 418-437.
- GAUTIER H. (1721). — Nouvelles conjectures sur le globe terrestre, A. Cailleau, Paris.
- GOSSELET J. (1857). — Note sur le terrain dévonien de l'Ardenne et du Hainaut. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 2, t.14,p. 364.
- GOSSELET J. (1860). — Mémoire sur les terrains primaires de la Belgique et des environs d'Avesnes et du Boulonnais. Paris, L. Martinet.
- GOSSELET J. (1876). — Le Calcaire de Givet. *Ann Soc géol. Nord*, Lille, t. III, p. 36
- GOSSELET J. (1879). — Descriptions géologiques du Canton de Maubeuge. *Ann. Soc. géol. Nord*, Lille, vol. 6, pp. 129-211.
- GOSSELET J. (1880). — Note sur la Famennien-Divisions à établir dans les Schiste et les Psammites des environs de Maubeuge. *Ann. Soc. Géol. Nord*, VII, pp. 196-206.
- GOSSELET J. (1888). — L'Ardenne. Mémoire carte géol. de France. Baudry ed. Paris, 881 p.
- GRIMAL P. (1963). — Mythologies de la Méditerranée au Gange. Larousse ed. 283 p.
- GUETTARD J.E. (1779). — Mémoire sur la minéralogie du Dauphiné, 2 vol.
- GUETTARD J.E. (1779). — Mémoires sur différentes parties des sciences et des arts, 6 vol., Paris
- HALLEY E. (1715). — Salure des océans *Phil. Trans.*, 29, pp. 296-300.
- J.B. OMALIUS D'HALLOY (1839). — Eléments de géologie, ou seconde partie des éléments d'inorganomie particulière, 3<sup>ème</sup> ed., Paris, Pitois-Levrault, 759 p....
- J.B. OMALIUS D'HALLOY (1816). — Mémoire sur l'étendue géographique du terrain des environs de Paris.
- JOLY J (1899). — Salure des océans comme chronomètre, *Trans. Roy. Dublin*, 7, pp. 23-66.
- LYEL Ch. (1830). — Principle of geology : being an attempt to explain the former changes of the earth's surface, by reference to causes now in operation. Londres, J. Murray, 3 vol.
- NEEDHAM J.T. (1767). — Nouvelles recherches physiques et métaphysiques sur la nature et la religion, avec une nouvelle théorie de la Terre et une mesure de la hauteur des Alpes, Londres et Paris, 294 p.
- PALASSOU P.B. (1784). — Essai sur la minéralogie des monts Pyrénées, Didot, Paris, 210p.
- SMITH W. (1815). — , A memoir to map and delineation of the strata of England and Wales.
- SOULAVIE J-L.G. (1784). — Histoire Naturelle de la France méridionale, Quillot, Paris.

## LE DÉVONIEN : SES SUBDIVISIONS LE STRUNIEN UN SOUS-ÉTAGE DU FAMENNIEN ?

### The Devonian : its subdivisions The Strunian : a substage of the Famennian ?

par Denise BRICE (\*) et Bruno MISTIAEN (\*\*)

*Résumé.* — Les auteurs résument les récentes avancées stratigraphiques concernant le Dévonien, en insistant sur le rôle important qu'a joué, depuis sa création en 1973, la "Subcommission on Devonian Stratigraphy (SDS), émanation de la Commission Internationale de Stratigraphie (ICS). Les auteurs présentent les modifications de nomenclature liées à l'application de nouveaux concepts dans la définition des étages de l'échelle stratigraphique. Ils évoquent les durées très inégales des étages et les travaux en cours concernant la subdivision des plus longs, notamment du Famennien. Ils rappellent les débats actuels concernant la division du Famennien en 3 ou 4 sous-étages et résument les arguments qui justifieraient l'adoption du Strunien comme 4<sup>ème</sup> sous-étage du Famennien.

*Abstract.* — The authors summarize the stratigraphic work relative to Devonian, and they emphasize on the importance, since its creation in 1973, of the "Subcommission on Devonian Stratigraphy (SDS), emanation of the International Commission of Stratigraphy (ICS). The authors present the modifications of nomenclature related to the application of new concepts in the definition of the stages of the stratigraphic scale. They also discuss the very unequal durations of the stages and the work in progress relative to the subdivision of the longest ones, in particular the Famennian. Finally, they mention the present debates affecting the division of Famennian in 3 or 4 substages and they summarize the arguments which would justify the adoption of Strunian as 4th substage of the Famennian.

#### I. — L'ÉCHELLE STRATIGRAPHIQUE

##### 1) Rappels

L'échelle stratigraphique (fig. 1) constitue un document indispensable pour la reconstitution de l'histoire de la terre. C'est une échelle de référence (sorte de calendrier) des événements qui se sont succédé sur terre dans le temps et l'espace.

Elle est basée sur des subdivisions des séries sédimentaires dont les limites sont datées en millions d'années par chronologie « absolue » (données numériques). Elle comprend des unités de temps (ères, périodes, époques, âges) auxquelles correspondent des ensembles de couches ou unités stratigraphiques (ères, systèmes, séries, étages). Elle est remise à jour au fur et à mesure des progrès des connaissances stratigraphiques.

##### 2) Avancées dans les connaissances stratigraphiques.

Les progrès dans les connaissances stratigraphiques ont donné lieu à une nouvelle définition des étages et à des modifications de leur nomenclature.

\* Autrefois, un étage était représenté par une coupe type, le stratotype (ensemble de couches renfermant des faunes caractéristiques), choisie dans une localité type (exemple Givétien à Givet).

\* Actuellement, on met l'accent sur les limites. Chaque étage est défini par deux limites. Les limites et les stratotypes de ces limites sont choisis par une sous-commission internationale de stratigraphie puis ratifiés par l'Union Internationale des Sciences Géologiques (IUGS - International Union of Geological Sciences). Chaque limite, et le stratotype qui la renferme, sont désignés par le sigle GSSP "Global Stratotype Section and Point".

(\*) Faculté Libre des Sciences. Laboratoire de Paléontologie stratigraphique. 13 rue de Toul. F 59046 Lille cedex. denise.brice@fls.fupl.asso.fr

(\*\*) Fédération Universitaire et Polytechnique de Lille. Laboratoire de Paléontologie stratigraphique, FLS & ISA, UMR 8014 & FR 1818 du CNRS. 13 rue de Toul. F 59046 Lille cedex. bruno.mistiaen@fls.fupl.asso.fr

ERE	PERIODE	EPOQUE	AGE	MA	
CENOZOÏQUE	TERTIAIRE	QUATERNAIRE		1.75	
		NEOGENE	PLIOCENE	5.3	
			MIOCENE	23.5	
		PALEOGENE	OLOGOCENE	33.7	
			EOCENE	53	
			PALEOCENE	65	
		MESOZOÏQUE	CRETACE	Supérieur	96
				Inférieur	135
			JURASSIQUE	Sup. = MALM	154
				Moy. DOGGER	175
Inf. = LIAS	203				
TRIAS	Supérieur		230		
	Moyen		240		
	Inférieur		250		
PALEOZOÏQUE	PERMIEN		Supérieur	295	
			Moyen		
		Inférieur			
	CARBONIFERE	Pennsylvanien	355		
		Mississipien			
	DEVONIEN	Supérieur	FAMENNIEN	370	
			FRASNIEN	375	
		Moyen	GIVETIEN	380	
			EIFELENIEN	390	
		Inférieur	EMSIEN	400	
PRAGUIEN			410		
LOCHKOVIEN	415				
SILURIEN	Pridoli(en)	415			
	Ludlow	425			
	Wenlock	430			
	Llandovery	435			
ORDOVICIEN	Supérieur	455			
	Moyen	465			
	Inférieur	500			
CAMBRIEN		540			
PROTEROZOÏQUE					
ERE	SYSTEME	SERIE	ETAGE		

Fig. 1. — Echelle - ou divisions stratigraphiques - des temps géologiques d'après ODIN, 2002.

Fig. 1. — Time and stratigraphic Scale after ODIN, 2002.

Ces GSSP doivent tenir compte des recommandations de la Commission Internationale de Stratigraphie (International Commission on Stratigraphy = ICS) à savoir : - être choisis dans une coupe accessible ; - correspondre à des dépôts marins, pélagiques, dans une série continue, bien contrôlée paléontologiquement ; - permettre l'application de la magnétostratigraphie, de la géochimie...

## II. — LE DÉVONIEN

### 1) Avancées paléontologiques et stratigraphiques relatives au Dévonien (\*)

Les avancées paléontologiques et stratigraphiques concernant le Dévonien ont été très importantes durant les trois dernières décades, notamment à l'occasion de trois réunions internationales : à Calgary (Canada) en 1967, à Bristol (Angleterre) en 1978 et à Calgary (Canada) en 1987. Celles-ci ont donné lieu à d'importantes publications : Oswald (Ed.) en 1968 ; House *et al.* (Eds.) en 1979 ; McMillan *et al.* (Eds.) en 1988.

En outre, des progrès significatifs en paléontologie et stratigraphie du Dévonien ont été enregistrés à partir de 1973, date de la création de la "Subcommission on Devonian Stratigraphy (SDS)", émanation de la Commission Internationale de Stratigraphie (ICS).

Les objectifs de la SDS sont :

- de revoir le nombre d'unités dans la colonne stratigraphique du Dévonien et leur nomenclature ;
- de proposer des limites et des stratotypes de ces limites en vue de leur ratification par l'Union Internationale des Sciences Géologiques.
- de tenir compte des recommandations de la Commission Internationale de Stratigraphie pour le choix des unités, de leurs limites et de leurs stratotypes.

En 2003, la SDS comprend environ une quarantaine de membres titulaires et plus de quatre-vingts membres correspondants. Ses réunions annuelles, organisées dans différents pays où le Dévonien est bien représenté et généralement précédées de plusieurs jours d'excursions sur les principaux affleurements dévoniens, ont fortement stimulé les recherches, discussions, vérifications et confrontations entre paléontologues spécialistes de différentes groupes fossiles. Elles ont abouti à de nombreuses décisions ratifiées par l'IUGS au cours des dernières décennies.

### 2) Nomenclature des séries et des étages du Dévonien (\*\*)

Suite aux recommandations de l'ICS, la succession des étages du Dévonien s'établit à présent comme suit (fig. 2), dans l'ordre ascendant :

Les trois étages de la série inférieure sont le Lochkovien, le Praguien et l'Emsien. Les deux premiers ont été choisis en Tchéquie (Bohême) en remplacement d'étages régionaux belge (Gédinnien) ou allemand (Siegenien), incomplets et/ou représentés par des faciès trop littoraux. Le troisième, l'Emsien, choisi en liaison avec les affleurements de la région rhénane en Allemagne de préférence aux étages régionaux, Zlichovien et Dalejien, en Bohême.

La base du Lochkovien coïncide avec la base du Dévonien et le sommet du Pridoli (sommet du Silurien).

Les deux étages de la série moyenne sont l'Eifélien et le Givétien, le premier ayant été préféré au Couvinién, étage régional en Belgique.

(\*) Pour plus de détails voir " Le Dévonien " dans " Stratigraphie du Paléozoïque " sur le site SGN

(\*\*) Ratifiée par l'IUGS en 1985

SYSTEME	SERIE	ETAGE	DATE DE RATIFICATION DU « GSSP »	STRATOTYPE DE LIMITE
CARBONIFERE	supérieure	FAMENNISIEN	► 1991	LA SERRE, Montagne Noire, France
		FRASNIEN	► 1993	COUMIAC, Montagne Noire, France
	moyen	GIVETIEN	► 1987	Col du Puech de la Suque, Montagne Noire, Fr
		EIFELIEN	► 1994	JEBEL MECH IRDANE, Tafilalet, Maroc
		EMSIEN	► 1985	WETTELDORF, Eifel, Allemagne
	inférieure	PRAGUIEN	► 1996	Gorge de ZINZIL'BAN, Ouzbékistan
		LOCHKOVIEN	► 1989	VELKA CHUCHLE, Bohême, Tchéquie
		SILURIEN	► 1973	KLONK, Bohême, Tchéquie

Fig. 2. — Les étages du Dévonien et les GSSP.

Fig. 2. — Devonian stages and their GSSP

Les deux étages de la série supérieure restent le Frasnien et le Famennien .

Le sommet du Famennien coïncide avec le sommet du Dévonien et la base du Carbonifère

### III. — LES GSSP DU DÉVONIEN

#### 1) La limite Silurien / Dévonien.

\* GSSP de la limite Silurien / Dévonien, base du Lochkovien (\*) (fig. 2). La limite coïncide avec la première apparition de *Monograptus uniformis* (graptolite) dans la couche n° 20 de la coupe de Klouk près de Suchomasty en Bohême (fig. 3). Le GSSP est proche de la limite historique du Gédinnien, elle correspond à l'entrée de *Icriodus woschmidti postwoschmidti* (conodonte) et de *Warburgella rugulosa rugulosa* (trilobite).

#### 2) La limite Dévonien / Carbonifère

\* GSSP de la limite Dévonien / Carbonifère, base du Tournaisien (\*\*). La limite coïncide avec l'entrée du conodonte *Siphonodella sulcata* (voir " Carbonifère " dans " Stratigraphie du Paléozoïque ", site SGN). Le GSSP se situe dans le massif de La Serre (Cabrières, Hérault) en France (fig. 4).

#### 3) Les limites des séries dévoniennes.

\* GSSP de la limite Dévonien inférieur/Dévonien moyen, base de l'Eifélien (\*\*\*). La limite correspond à la base de la Zone à *Polygnathus costatus partitus* dans la lignée *patulus, partitus, costatus* de la zonation standard des conodontes. Elle est localisée dans la Formation Heisdorf dans l'Eifel en Allemagne. Le GSSP est proche de la limite historique Heisdorf/Lauch. Le GSSP est situé dans la tranchée de Wetteldorf en Eifel (fig. 5).

\* GSSP de la limite Dévonien moyen/Dévonien supérieur, base du Frasnien (\*\*\*\*). La limite se situe à la base de la Zone Inférieure à *Polygnathus asymmetricus* (première

(\*) ratifié par l'IUGS en 1973.

(\*\*) ratifié par l'IUGS en 1991.

(\*\*\*) ratifié par l'IUGS en 1985.

(\*\*\*\*) ratifié par l'IUGS en 1987.

(\*\*\*\*\*) ratifié par l'IUGS en 1989.

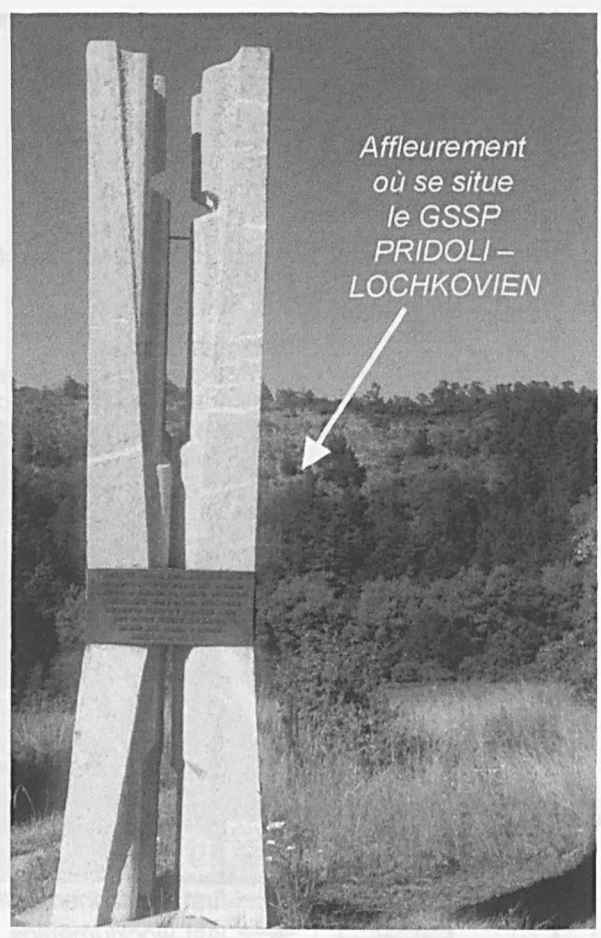


Fig. 3. — Monument du GSSP de la limite Silurien / Dévonien (= limite Pridoli - Lochkovien) à Klouk, Bohême (République Tchéquie).

Fig. 3. — GSSP of the Silurian-Devonian boundary (= Pridoli - Lochkovian boundary). Monument at Klouk, Bohemia (Czech Republic).

apparition de *Ancyrodella rotundiloba*) dans la lignée *Ancyrodella binodosa, Ancyrodella rotundiloba rotundiloba* de la zonation standard des conodontes. Le GSSP est situé, en France, à la base du banc 42a' dans la coupe du stratotype au Col du Puech de la Suque au SE de la Montagne Noire (fig. 6). Cette limite est proche de la base de la Zone à *Manticoceras* (Goniatite) et de la base de l'Assise de Frasnien en Belgique, une des limites traditionnelles Givetien/Frasnien.

#### 4) Les limites des étages dévoniens.

a) GSSP Pridoli/Lochkovien cf. supra, limite Silurien/Dévonien.

b) GSSP Lochkovien/Praguien (\*\*\*\*\*). La limite est basée sur l'entrée d'*Eognathodus sulcatus sulcatus*

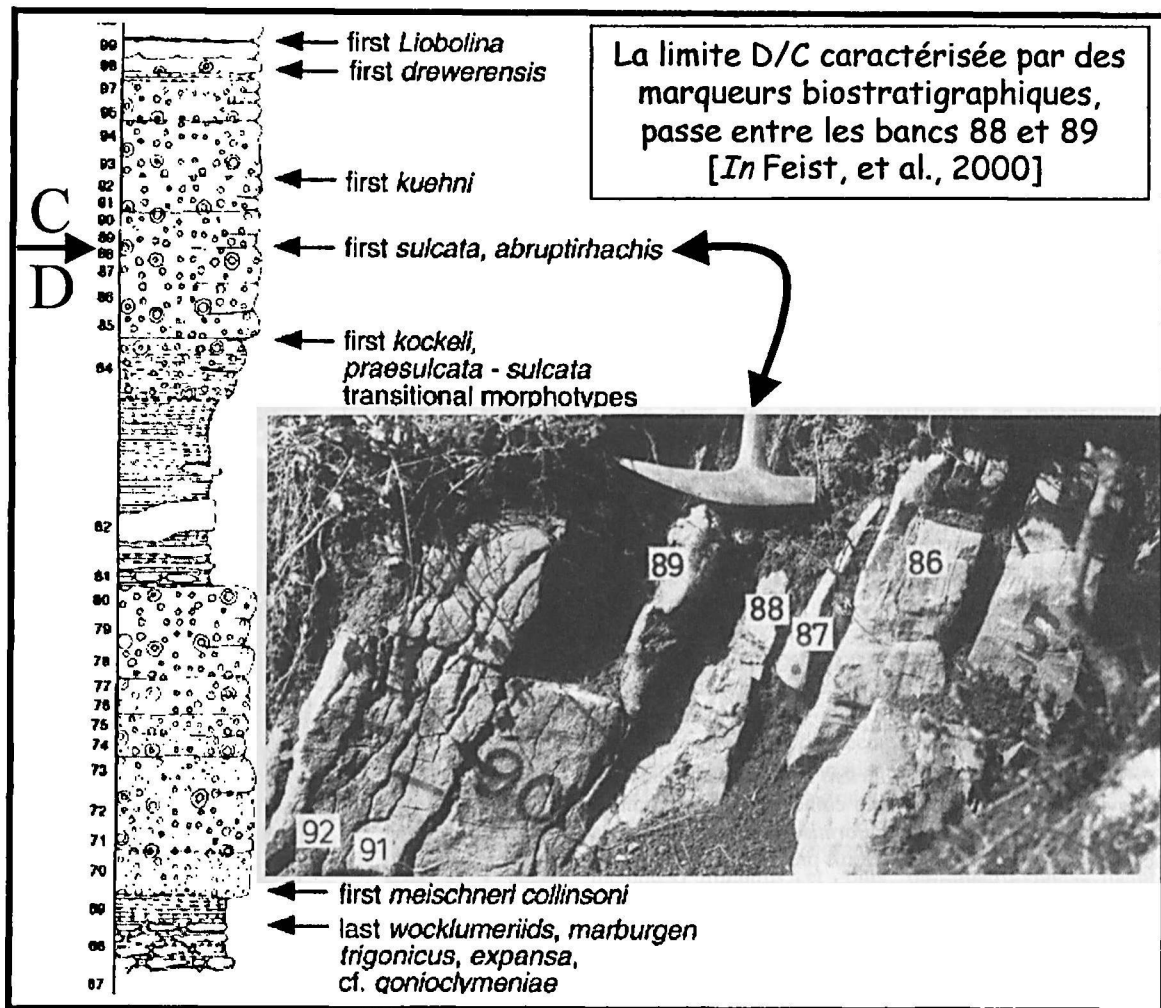


Fig. 4. — Le GSSP de la limite Dévonien / Carbonifère (= limite Famennien - Tournaisien) à La Serre, Montagne Noire (France) d'après Feist et al., 2000, modified

Fig. 4. — GSSP of the Devonian Carboniferous boundary (= Famennian - Tournaisian boundary) at La Serre, Montagne Noire (France) after Feist et al., 2000, modified.

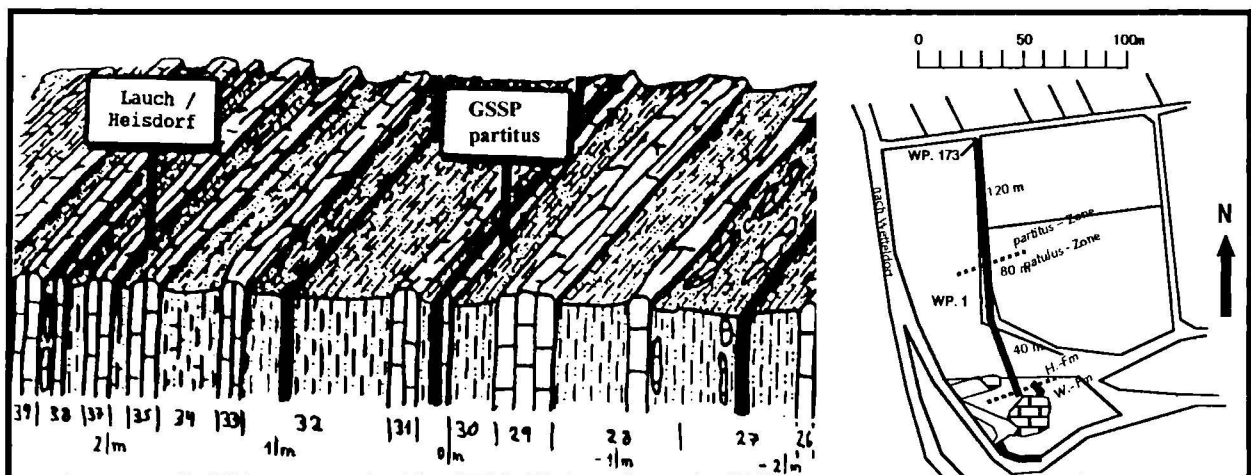


Fig. 5. — Le GSSP de la limite Dévonien inférieur - Dévonien moyen (= limite Emsien - Eifélien) à Wetteldorf, Eifel (Allemagne) d'après Ziegler, 2000, modified.

Fig. 5. — GSSP of the Lower Devonian - Middle Devonian boundary (= Emsian - Eifelian boundary) at Wetteldorf, Eifel, (Germany) after Ziegler, 2000, modified.



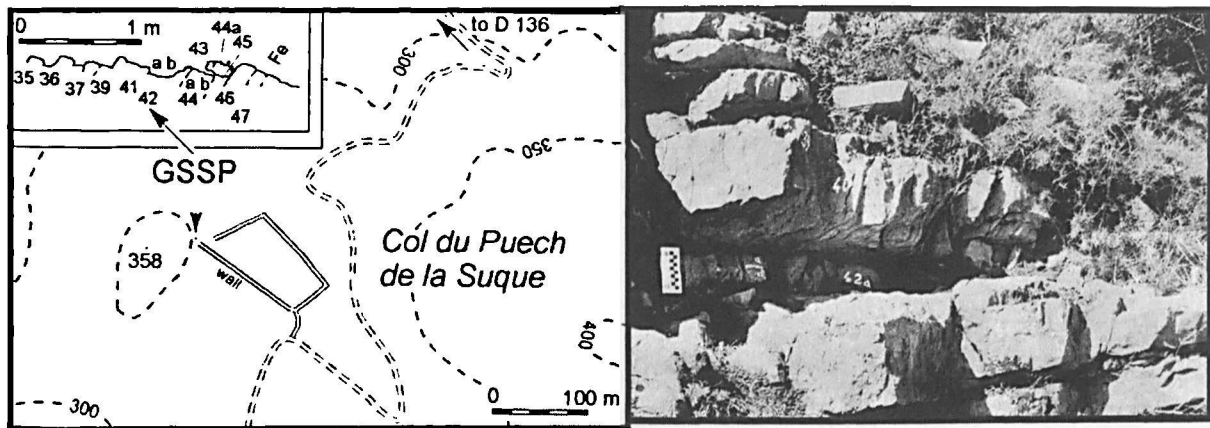


Fig. 6. — Le GSSP de la limite Dévonien moyen – Dévonien supérieur (= limite Givetien – Frasnien) au col du Puech de la Suque, Montagne Noire (France) d’après House *et al.*, 2000, modifié.

Fig. 6. — GSSP of the Middle Devonian – Upper Devonian boundary (= Givetian – Frasnian boundary) at Col du Puech de la Suque, Montagne Noire (France) after House *et al.*, 2000, modified.

(conodonte). Cette espèce apparaît, selon les coupes, de 10 à 70 cm sous l’ancienne limite lithologique Lochkovien/Praguien dans le Barrandien, ou encore 10 cm sous la limite inférieure traditionnelle du Praguien établie sur la macrofaune. Le GSSP est situé à la base du banc 12 dans la coupe de Velka Chuchle, ancienne carrière située à 8 km au SW du centre de Prague en Tchéquie (fig. 7).

c) *GSSP Praguien/Emsien (\*)*. La limite correspond avec la base de la Zone à *Polygnathus dehiscens* de la zonation standard des conodontes. Le GSSP est situé à la base de la Formation Zinzilban en Ouzbékistan, (« Asie centrale » de l’ex URSS), à “Zinzilban Gorge” dans le Parc National Kitab à environ 180 km au SSE de Samarkand (fig. 8).

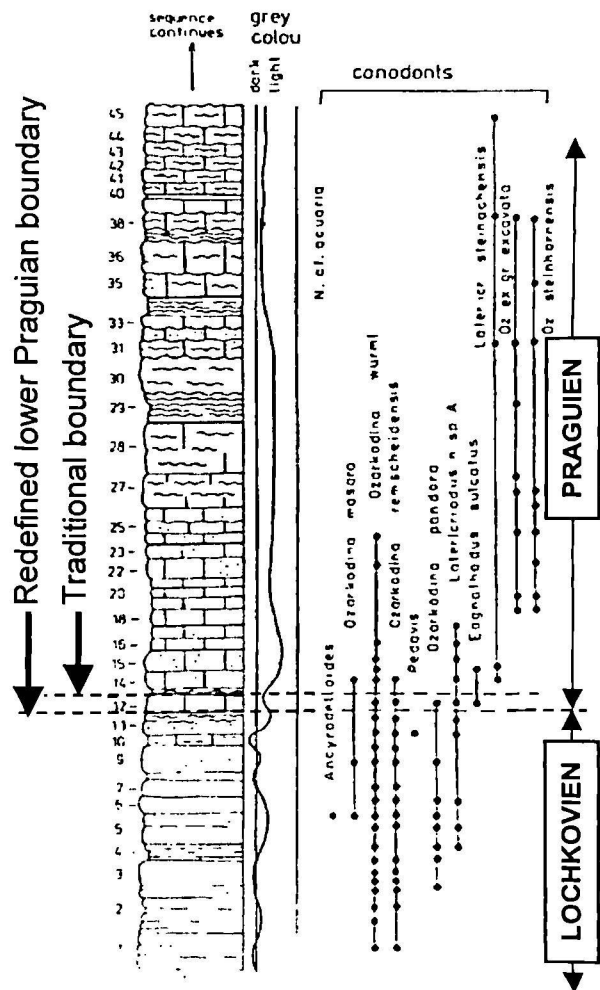
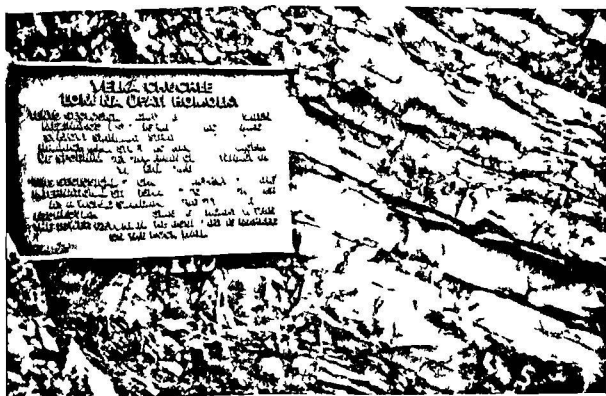


Fig. 7. — Le GSSP de la limite Lochkovien – Praguien, à Velka Chuchle d’après Chlupac, 2000, modifié,

Fig. 7. — GSSP of the Lochkovian - Pragian boundary at Velka Chuchle, Bohemia (Czech Republic) after Chlupac, 2000, modified.

(\*) ratifié par l’IUGS en 1995

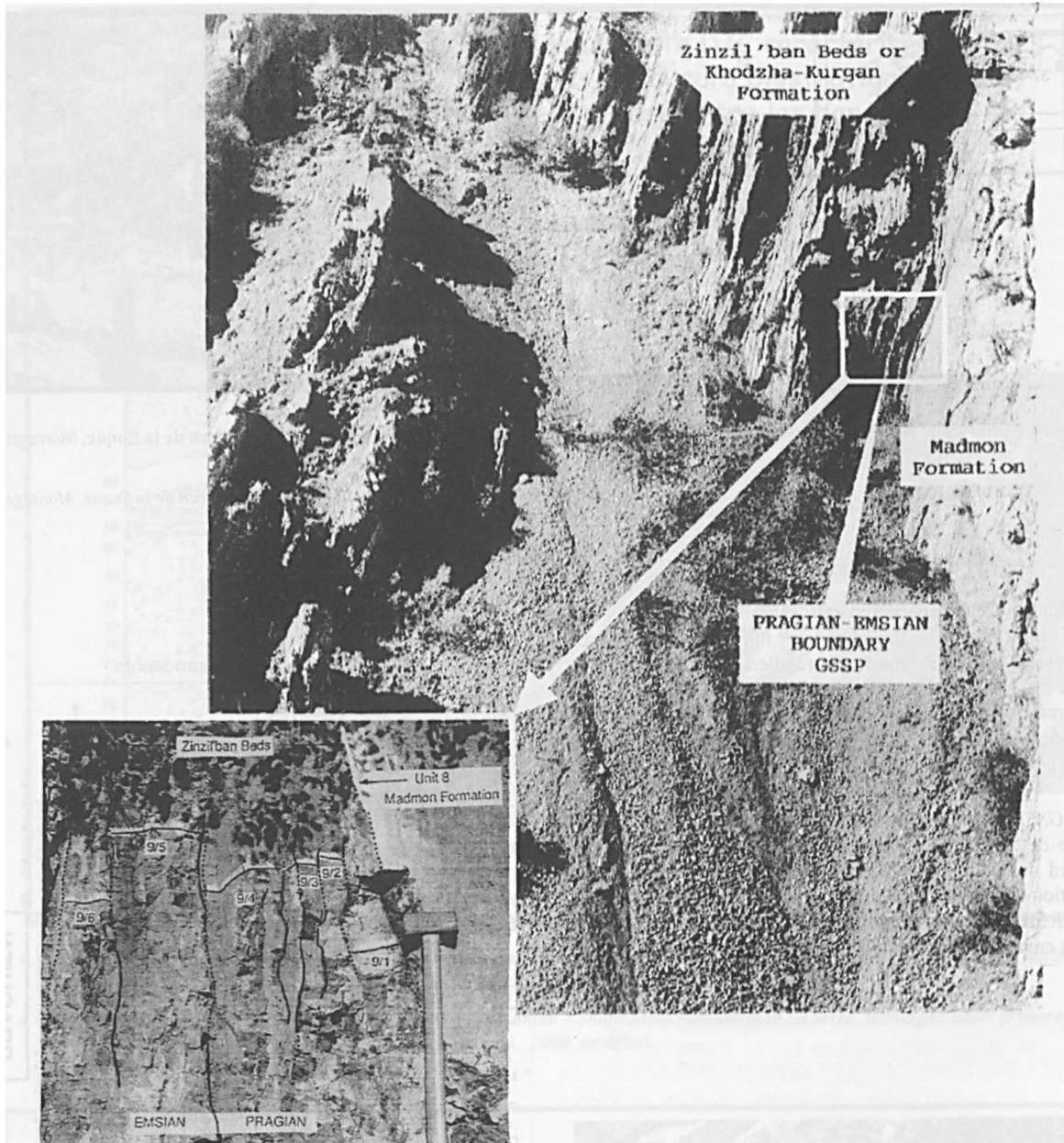


Fig. 8. — Le GSSP de la limite Praguén – Emsien, dans les gorges de Zinzilban (Ouzbékistan) d'après Yolkin *et al.*, 2000, modifié.

Fig. 8. — GSSP of the Pragian – Emsian boundary at the Zinzilban gorge (Uzbekistan) after Yolkin *et al.*, 2000, modified.

d) GSSP Emsien/Eifélien cf. supra, limite Dévonien inférieur/Dévonien moyen.

e) GSSP Eifélien/Givétien (\*). La limite se situe à la base de la Zone à *hémiansatus* de la zonation standard des conodontes qui correspond avec la base du niveau à *Maeniceras* (goniatite) qui se trouve sous l'apparition de *Gemnispora lemurata* (spore) associée à l'événement Kacak ou Otomari. Le GSSP est situé à Jebel Mech Irdane au SE du Maroc dans le Tafilalt près d'Erfoud (fig. 9).

f) GSSP Frasnien/Famennien (\*\*). La limite se situe à la base de la Zone Inférieure à *Palmatolepis triangularis* dans la zonation standard des conodontes qui coïncide avec la limite *Crikites holzapfeli/Phoenixites frechi* (goniatites). Le GSSP, sélectionné dans des faciès pélagiques, est situé en France, dans la carrière supérieure de Coumiac près de Cessenon, au SE de la Montagne Noire (fig. 10).

g) GSSP Famennien/Tournaisien cf. supra, limite Dévonien/Carbonifère.

(\*) ratifié par l'IUGS en 1994

(\*\*) ratifié par l'IUGS en 1993

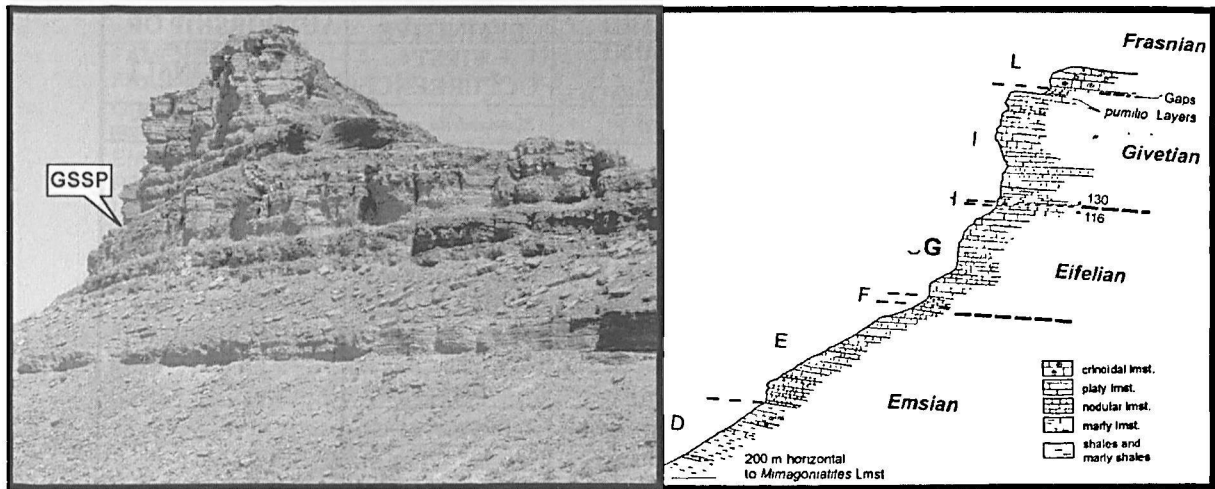


Fig. 9. — Le GSSP de la limite Eifélien – Givétien, *Jebel Mech Irdane*, Tafilalt (Maroc) d’après Walliser, 2000, modifié.  
 Fig. 9. — GSSP of the Eifelien – Givetian boundary at *Jebel Mech Irdane*, Tafilalt (Morocco) after Walliser, 2000, modified.

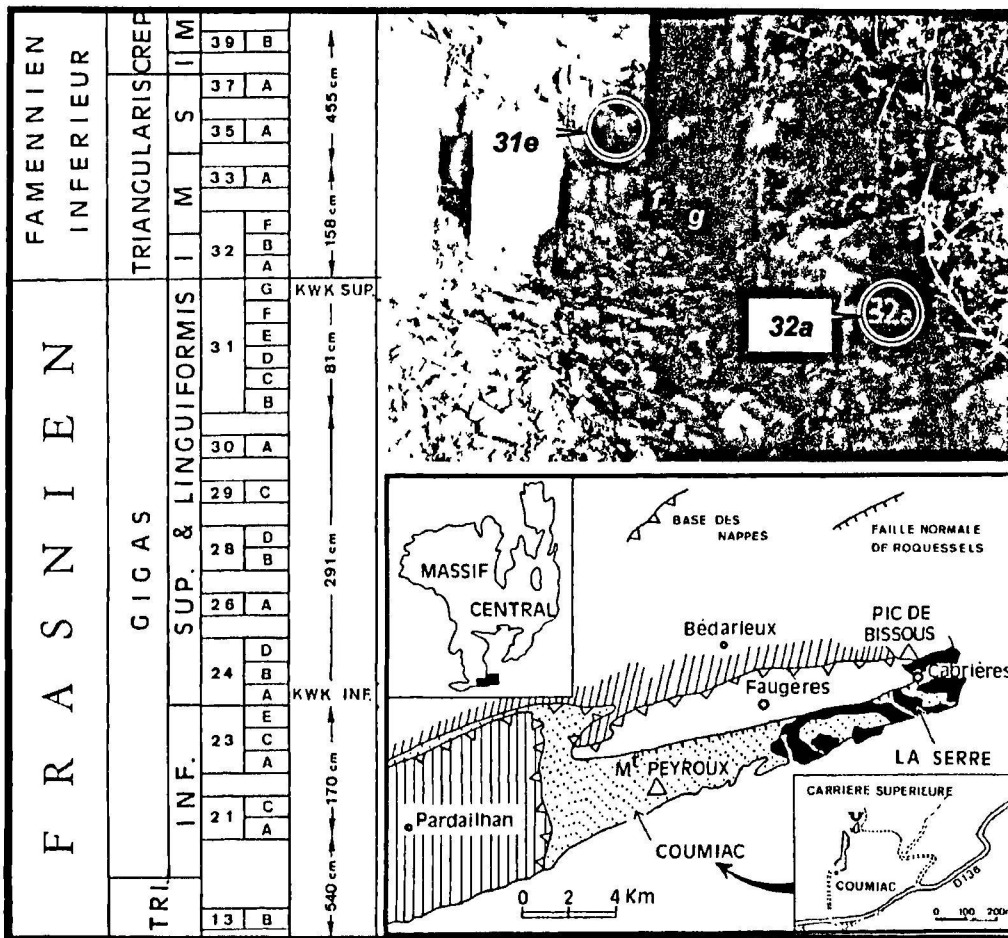


Fig. 10. — Le GSSP de la limite Frasnien – Famennien, à *Coumiac*, Montagne Noire (France) d’après Lethiers & Casier, 1994, modifié.  
 Fig. 10. — GSSP of the Frasnian – Famennian boundary at *Coumiac*, Montagne Noire (France) after Lethiers & Casier, 1994, modified.

EPOCH AGE	DCB ~m.y.	STANDARD CONODONT ZONE (PELAGIC BIOFACIES)	DEFINITIVE FIRST OCCURRENCE	AUTHORSHIP OF REVISED [OR ORIGINAL] ZONES		
					EARLY CARB.	
LATE DEVONIAN	0	<i>sulcata</i>	<i>Siphonodella sulcata</i>	[SANDBERG, ZIEGLER, LEUTERITZ & BRILL (1978)]		
	-1	<i>praesulcata</i>	Late	<i>Protognathodus kockeli</i>	ZIEGLER & SANDBERG (1984)	
			Middle			
	-2	<i>expansa</i>	Early	<i>Si. praesulcata</i>		
			Late	<i>Bispathodus ultimus</i>		
			Middle	<i>Bispathodus aculeatus</i>		
	-3	<i>postera</i>	Early	<i>Pa. gracilis expansa</i>		
			Late	<i>Pa. gracilis manca</i>		
	-4	<i>trachytera</i>	Early	<i>Pa. perlobata postera</i>		
			Late	<i>Pseudo. granulosis</i>		
	-5	<i>marginifera</i>	Early	<i>Pa. rugosa trachytera</i>		
			Latest	<i>S. velifer velifer</i>		
			Late	<i>Pa. marginifera utahensis</i>		
	-6	<i>rhomboidea</i>	Early	<i>Pa. m. marginifera</i>		
			Late			
-7	<i>crepida</i>	Early	<i>Pa. rhomboidea</i>	SANDBERG & ZIEGLER (1973)		
		Latest	<i>Pa. glabra pectinata</i>			
-8	<i>crepida</i>	Late	<i>Pa. glabra prima</i>	ZIEGLER & SANDBERG (1990)		
		Middle	<i>Palmatolepis termini</i>			
		Early	<i>Palmatolepis crepida</i>			
-9	<i>triangularis</i>	Early	<i>Pa. minuta minuta</i>			
		Middle	<i>Pa. delicatula platys</i>			
		Late	<i>Pa. triangularis</i>			
FRASNIAN	-10	<i>linguiformis</i>	<i>Pa. linguiformis</i>	SANDBERG, ZIEGLER, DREESEN & BUTLER (1988)		
	-11	<i>rhenana</i>	Late	<i>Pa. rhenana rhenana</i>	ZIEGLER & SANDBERG (1990)	
			Early	<i>Pa. rhenana nasuta</i>		
	-12	<i>jamieae</i>	<i>Palmatolepis jamieae</i>			
	-13	<i>hassi</i>	Late	<i>Ag. triangularis</i>		
			Early	<i>Palmatolepis hassi</i>		
	-14	<i>punctata</i>	<i>Palmatolepis punctata</i>			
	-15	<i>falsiovalis</i>	Late	<i>Mesotaxis asymmetrica</i>		SANDBERG, ZIEGLER & BULTYNCK (1989)
			Early	<i>Mesotaxis falsiovalis</i>		
	MIDDLE DEV.	-15	<i>disparilis</i>	<i>Klapperina disparilis</i>		ZIEGLER & KLAPPER (1982)

Fig. 11. — Les subdivisions biostratigraphiques du Dévonien sur la base des biozones à conodontes (Ziegler & Sandberg, 1990).  
 Fig. 11. — The biostratigraphic subdivisions of the Devonian on the basis of the conodont biozones (Ziegler & Sandberg, 1990).

5) Recherches en cours : divisions de certains étages du Dévonien en sous-étages

La multiplication des moyens de datation a mis en évidence la durée très inégale des étages du Dévonien et montré la nécessité d'en subdiviser certains en sous-étages de valeur internationale. Le tableau I donne un aperçu des estimations de durées (en millions d'années) des étages

dévonien, entre 1982 et 2002, obtenus par plusieurs auteurs appliquant des méthodes différentes : datations radiométriques, périodicité des cycles sédimentaires, durée relative ou moyennes des biozones. Ce tableau met en évidence une plus ou moins grande variation des estimations de durée d'un même étage selon la méthode employée ou même par le biais d'une méthode identique. Ce tableau suscite aussi certaines remarques que nous focaliserons sur le

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
FAMENNIEN	7	4.5	5	13	9.4	11.5	11.4	10.2	7.5	7.3	9.5	9	10	13	10	10.5	15
FRASNIEN	7	10.4	10	9	5	7.8	9.3	7.1	6.7	8.3	8.1	8	5	6	5	5	
GIVETIEN	6	3.4	5	12	5.3	7.8	6.3	7.1	8.3	9.3	8.1	6		10	8	5	
EIFELIEN	7	5.2	5	7	3.2	7.8	6.3	5.1	8.3	6.3	6.8	6		11	7	10	
EMSIEN	7	4.4	5	6		3.7	6.3	10.2	4.2	10.4	6.8	8		9	15	10	
PRAGUIEN	7	5.9	20	4		7.8	4.2	5.1	8.3	2.1	5.4	5		12	5		
LOCHKOVIEN	7	12.2		9		3.7	6.3	5.1	6.7	6.3	5.4	6		5	5.5	10	
Total DEVONIEN	48	46		53		50.1	50.1	49.9	50	60	50.1	48		63	56	55	

**Estimation de la durée absolue, en millions d'années, des différents étages du Dévonien, d'après différents auteurs.**

- Sur la base de datations radiométriques, dites absolues (1 : HARLAND et al., 1982 ; 2 : HARLAND et al., 1989 ; 3 : ODIN & ODIN, 1990).
- Sur la base de l'analyse de la périodicité des cycles sédimentaires (4 : BAYER et McGHEE, 1986-89 ; 5 : BAI SHUN LIANG, 1995).
- A partir du nombre et de la durée relative des biozones de différents groupes d'organismes (6 : HOUSE ; 7 : KLAPPER ; 8 : DUTRO ; 9 : OLIVER ; 10 : ORMISTON ; et valeur moyenne : 11 : BOUCOT, 1975 ; 12 : MENNING, 1989 ; 13 : ZIEGLER & SANDBERG, 1990).
- Autres données (14 : FORDHAM, 1992 ; 15 : GRADSTEIN & OGG, 1995 ; 16+ YOUNG, 1995).

**D'APRES OLIVER & PEDDER, 1994; BAI SHUN LIANG 1995; McGHEE, 1996; SDS Newsletter, 1996).**

- 17 : d'après document Société géologique de France (mai 2002)

Tabl. I. — Estimations, en millions d'années des durées des différents étages du Dévonien, proposées par différents auteurs sur la base d'approches différentes.

Tab. I. — *Estimat durations in millions of years, of the Devonian stages, proposed by different authors on the basis of different approaches.*

Famennien, étage du Dévonien supérieur, qui fera l'objet du point suivant afin d'essayer de répondre à la question : le Strunien, peut-il être un sous étage du Famennien ?

**Première remarque :** les estimations de durée obtenues pour un même étage varient parfois largement. Ainsi, pour le Famennien, les durées estimées au cours des vingt dernières années, s'échelonnent de 4,5 à 15 MA par datations radiométriques; de 9,4 à 13 MA par l'analyse de la périodicité des cycles sédimentaires, de 7,3 MA à 11,5 MA (valeur moyenne 9 à 10 MA) d'après le nombre et la durée relative des biozones ; et de 14 à 16 MA par d'autres méthodes.

**Seconde remarque :** la durée du Famennien figure parmi les plus longues, la dernière estimation publiée par Odin, 2002 lui attribue quinze millions d'années (MA). On y distingue 8 zones et 22 sous-zones à conodontes (Tabl. I).

La première remarque montre l'intérêt d'une approche multidisciplinaire, la marge d'erreurs n'étant pas la même suivant la méthode d'estimation. Il faut souligner que la marge d'erreurs des datations radiométriques croît en remontant le temps tandis que les marges d'erreurs de datations basées sur la durée relative ou moyenne des biozones restent constantes (fig. 12).

Compte tenu de ces remarques préliminaires et de la nécessité de diviser l'étage Famennien en sous-étages, nous pouvons aborder la seconde partie de cette note.

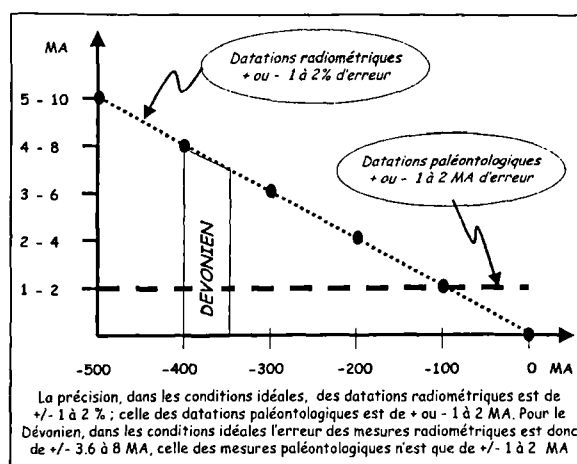


Fig. 12. — Marges d'erreur des datations obtenues par mesures radiométriques (dites datations absolues) et des datations paléontologiques (datations dites relatives)

Fig. 12. — *Margins of error of the datings obtained by radiometric measurements (i. e. "absolute datings") and the paleontological datings (as "relative" ones).*

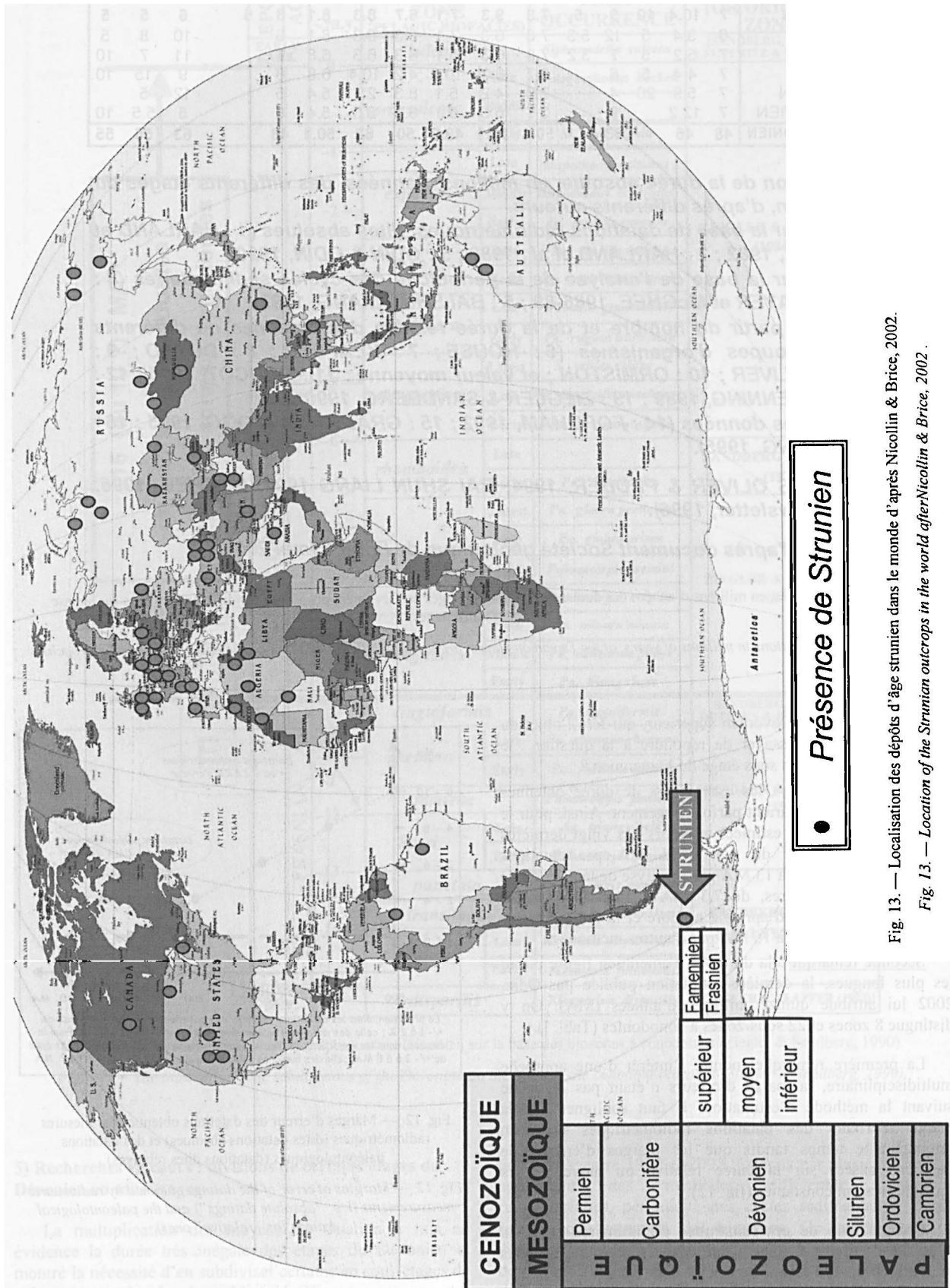


Fig. 13. — Localisation des dépôts d'âge strunien dans le monde d'après Nicollin & Brice, 2002.

Fig. 13. — Location of the Strunian outcrops in the world after Nicollin & Brice, 2002.

	Conodontes	Ammonoïdes	Foraminifères	Spores	Brachiopodes
CARBONIFERE					
FAMENNIEN TERMINAL « STRUNIEN »	<i>praesulcata</i>	<i>Wocklumeria</i> (VI)	<i>Quasiendothyra</i> <i>kobeitusana</i> <i>kobeitusana</i>	<i>Retispora</i> <i>lepidophyta</i> var. <i>minor</i>	<i>Araratella</i> <i>morestenensis</i> <i>Prospira</i> n. sp.
	Late <i>expansa</i>				
FAMENNIEN SUPERIEUR	Middle <i>expansa</i>				

Fig. 14. — Proposition pour une subdivision du Famennien en quatre sous-étages et pour la reconnaissance d'un Famennien terminal équivalent au Strunien d'après Streeel *et al.*, 1998 et Streeel, 2001.

Fig. 14. — Proposal for a subdivision of Famennian in four substages and for the recognition of Latest Famennian as equivalent to Strunian after Streeel *et al.*, 1998 and Streeel, 2001.

#### IV. — LE STRUNIEN : UN SOUS-ÉTAGE DU FAMENNIEN ?

##### 1) Origine du nom Strunien, rappel historique et importance du concept.

Le nom Strunien vient du nom de la localité Etroeungt (Avesnois, France) située à une dizaine de kilomètres au Sud d'Avesnes.

Le 19 janvier 1857, lors d'une séance de la Société Géologique de France, Jules Gosselet, alors âgé de 25 ans, décrivait en détail des coupes d'une série calcaire de 24,05m, exposée dans la carrière du Parcq à Etroeungt (encore visibles à ce jour) avec la liste des fossiles trouvés dans chaque niveau. Il soulignait, parmi les faunes de brachiopodes, la présence d'espèces à caractères typiquement dévoniens associées à d'autres espèces de type carbonifère, mettant ainsi en évidence l'existence de **faunes de transition** (faunes mixtes). Ses conclusions battaient en brèche l'enseignement de deux écoles régnant alors, celle d'Elie de Beaumont et de celle de d'Orbigny pour qui la limite Dévonien/Carbonifère (indiquée par les faunes) était brutale selon la théorie des cataclysmes encore en vogue à cette époque. En raison de cette prise de position audacieuse, Gosselet fut, à ses débuts, qualifié de "révolutionnaire en géologie" par le vénérable d'Omalius d'Halloy. En 1860, Gosselet nomma cette succession **Calcaire d'Etroeungt**.

Par la suite, le terme **Strunien** fut introduit par de Lapparent en 1900, pour désigner ces terrains.

En 1913, Barrois le considérait comme un étage. Quelque 70 années plus tard, le Strunien fut encore décrit comme un étage dans un ouvrage consacré aux étages français et leurs stratotypes (Conil & Lys *in* Cavalier & Roger, édit., 1980), paru à l'occasion du Congrès Géologique International de Paris (1980).

##### 2) Importance mondiale du Strunien

Depuis sa création le terme de Strunien ou les expressions « Calcaire d'Etroeungt », « Zone d'Etroeungt » furent largement utilisés en France et à l'étranger pour désigner des couches de passage du Dévonien au Carbonifère. Ils le sont encore actuellement. En 1997, lors de la réunion de la SDS à Rochester (USA), Sartenaer (1997) a souligné la présence du

Strunien dans le monde, dans 25 pays et 85 bassins sédimentaires. En 2001, au cours de la réunion de la SDS à Frankfurt, nous avons pu établir une liste de quelque deux cents communications publiées au cours des vingt dernières années qui mentionnent le Strunien. En 2002, lors de la réunion de la SDS à Toulouse, un inventaire des localités, où des brachiopodes Productidina, Rhynchonellida et Spiriferida caractéristiques de cette période ont été découverts, a été présenté par Nicollin & Brice (2002). La figure (13), reprise du livret publié à l'occasion du Colloque Gosselet à Lille (Brice & Mistiaen, 2002), illustre la répartition de ces localités sur une planisphère.

##### 3) Faut-il subdiviser le Famennien en trois ou quatre sous-étages?

Le débat est ouvert (Becker, 2001) car les propositions de sous-étages du Famennien sont nombreuses. Certains membres du groupe de travail "working group" sur les subdivisions de l'étage préfèrent une division du Famennien en trois sous-étages (Tragelehn & Hartenfels, 2002), tandis que d'autres, dont nous sommes, (Streeel *et al.*, 1998 et Streeel, 2001) défendent une subdivision du Famennien en quatre sous-étages, le quatrième correspondant au Famennien terminal (Uppermost Famennian) sensiblement équivalent au Strunien (Streeel *et al.*, 2002).

Les arguments en faveur d'une reconnaissance du Strunien sont nombreux et solides.

Outre le fait de la représentation mondiale du Strunien, il est utile et important de rappeler que le Strunien a d'abord été rangé dans le Carbonifère lors du premier Congrès de stratigraphie du Carbonifère (1928). Ainsi, sur la carte géologique de Belgique à 1/40000 publiée vers 1900, les couches de passage du Dévonien au Carbonifère sont datées Tournaisien (T1). Ce n'est qu'au second Congrès de stratigraphie du Carbonifère à Heerlen (1935 publié en 1937) que le Strunien a été placé dans le Dévonien. Entre 1928 et 1937, la base du Strunien correspondait donc à la limite Dévonien/Carbonifère. En dépit de la décision adoptée à Heerlen, l'idée de considérer le Strunien comme un étage du Carbonifère inférieur restait bien ancrée dans les esprits et certains auteurs ont continué de ranger le Strunien dans le Carbonifère. Ainsi, sur la carte géologique de France : feuilles à 1/50000 d'Avesnes (1969) et de Maubeuge (1967), ces couches de passage du Dévonien au Carbonifère sont

désignées par le symbole Tn1a = Tournaisien, ou encore par h1a = houiller basal dans la feuille à 1/50000 de Marquise (1971). En 1980, le Strunien était décrit par Conil & Lys (1980) comme un étage du Carbonifère inférieur (cf. supra). Par contre le Strunien ou une Formation d'Etroeungt, datés du Dévonien, Famennien supérieur, sont mentionnés sur la carte géologique de France, feuille à 1/50000 de Calais (1989) et sur la carte géologique de Belgique, feuilles à 1/25000 de Hastières-Dinant (1993); de Philippeville-Rosée (1994), de Froidchappelle-Senzeille (1999) ...

Par ailleurs, il existe, dans de nombreuses séries attribuées au Strunien ou à la zone d'Etroeungt, de bons marqueurs micropaléontologiques : conodonte, foraminifère, spore (Streel *et al.*, 1998 et Streel, 2001) et macropaléontologiques : ammonoidés (fig. 14) et brachiopodes (Nicollin & Brice, sous presse) qui permettent

de définir clairement une limite pouvant servir de base à un sous étage Strunien et d'établir de bonnes corrélations entre des dépôts pélagiques et néritiques.

Les propositions sont en cours de discussion dans le cadre de la SDS. Notre proposition (Streel *et al.*, 1998), soutenue par plus de quarante scientifiques, a d'abord été présentée à la réunion de la SDS à Bologne en Italie, puis discutée à Frankfurt (Streel, 2001). Des données complémentaires ont été présentées à la réunion de la SDS à Toulouse (Streel *et al.*, 2002 ; Nicollin & Brice, 2002).

L'avenir dira si nos arguments emporteront la décision.

*Remerciements.* — Les auteurs remercient vivement le Dr D. VACHARD pour ses remarques judicieuses et constructives.

## BIBLIOGRAPHIE

- BAI S. L. (1995). — High resolution correlation, Milankovitch cyclicity and nickel event. — evidence from the Devonian of South China. Peking University Press, 62 p.
- BARROIS C. (1913). — Note sur quelques sondages profonds exécutés entre Douai et Arras par la Compagnie de Châtillon-Commentry. Annales de la Société géologique du Nord, 42 : 2-20. Lille.
- BAYER U. and McGHEE G. R. (1986). — Cyclic patterns in the Paleozoic and Mesozoic : Implications for time scale calibrations. Paleozoology, 1 : 383-402.
- BAYER U. and McGHEE G. R. (1989). — Periodicity of Devonian sedimentary and biological perturbations : Implications for the Devonian timescale. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie Monatshefte, 1989 (1) : 1-16.
- BECKER R.T. (2001). — Alternatives for a substage subdivision of the Famennian. Document SDS –Frankfurt 2001.
- BOUCOT A. J. (1975). — Evolution and extinction rate controls. Developments in Palaeontology and Stratigraphy. Elsevier Scientific Publishing Company. Amsterdam, Oxford, New York : 411 p.
- BRICE D. et MISTIAEN B. (2002). — Le Strunien in "Géologie, patrimoine et environnement en Nord-Pas-de-Calais – Résumés d'interventions du Colloque du centenaire du Musée Gosselet – Lille 26-28 novembre 2002 » : 12-13.
- BULTYNCK P. (ed.). — Subcommission on Devonian Stratigraphy Recognition of Devonian series and stage boundaries in geological areas. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 225 : 37-47.
- Carte géologique de Belgique à 1/40000 ; à 1/25000, Feuille de Hastière-Dinant (DELCAMBRE B. et PINGOT J.L., 1993) ; feuille de Philippeville-Rosée (BOULVAIN F. et MARION J.-M., 1994) ; de Froidchappelle-Senzeille (DUMOULIN V. et MARION J.-M., 1999)
- Carte géologique de France. — feuilles à 1/50000 : Avesnes (WATERLOT G. et coll., 1969) ; Maubeuge (GOGUEL et coll., 1967) ; Marquise (HATRIVEL et coll., 1971) ; Calais (LEPLAT J. et SOMME J. et coll., 1989).
- CHLUPAC I. & HLADIL J. (2000). — The global stratotype section and point of the Silurian-Devonian boundary. In P. Bultynck (ed.) Subcommission on Devonian Stratigraphy Recognition of Devonian series and stage boundaries in geological areas. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 225 : 1-7.
- CHLUPAC I. (2000). — The global stratotype section and point of the lower Praguian boundary. In P. Bultynck (ed.) Subcommission on Devonian Stratigraphy Recognition of Devonian series and stage boundaries in geological areas. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 225 : 9-15.
- CONIL R. et LYS M. (1980). — Strunien in " Les étages français et leurs stratotypes ". in CAVELIER C. et ROGER J. (Edit.). Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 109 : 26-35. Orléans.
- FEIST R., FLAJS G. et GIRARD C. (2000). — The stratotype section of the Devonian-Carboniferous Boundary. In P. Bultynck (ed.) Subcommission on Devonian Stratigraphy Recognition of Devonian series and stage boundaries in geological areas. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 225 : 77-82.
- GOSSELET J. (1857). — Note sur le terrain dévonien de l'Ardenne et du Hainaut. Bulletin de la Société Géologique de France, 2ème sér., 14 : 364-374. Paris.
- GOSSELET J. (1860). — Sur les terrains primaires de la Belgique, des environs d'Avesnes et du Boulonnais. Imprimerie Martinet, Paris, 164 p.
- GRADSTEIN F. M., et OGG J. (1995). — A Phanerozoic time scale. Episodes 19 1-2 : 3-5.
- HARLAND W. B., ARMSTRONG R. L., COX A. V., CRAIG L. E., SMITH A. G. et SMITH. D. G. (1989). — A Geologic Time Scale 1989. Cambridge : Cambridge University Press
- HARLAND W. B., COX A. V., LIEWELLYN P. G., PICKTON C. A. G, SMITH A. G. et WALTERS R. (1982). — A Geologic Time Scale. Cambridge : Cambridge University Press.
- HOUSE M.R., BECKER T.R., FEIST R., FLAJS G., GIRARD C. et KLAPPER G. (2000). — The Frasnian/Famennian boundary GSSP at Coumiac, Southern France. In P. Bultynck (ed.) Subcommission on Devonian Stratigraphy Recognition of Devonian series and stage boundaries in geological areas. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 225 : 59-75.
- HOUSE M.R., FEIST R. & KORN D. (2000). — The Middle/Upper Devonian boundary GSSP at Puech de la Suque, Southern France. In P. Bultynck (ed.) Subcommission on Devonian Stratigraphy Recognition of Devonian series and stage boundaries in geological areas. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 225 : 49-58.
- HOUSE M.R., SCRUTTON C.T., BASSETT M.G. (Eds.). (1979). — The Devonian System. Special Papers in Palaeontology. The Palaeontological Association. 23, 353 p.



- LAPPARENT A. de. (1900). — *Traité de géologie*, 4ème édition, 3 volumes. Paris.
- LETHIERS F. et CASIER J.-G. (1994). — Les ostracodes survivants à l'événement F/F dans le limitotype de Coumiac (Montagne Noire, France). *Annales de la Société géologique de Belgique*, 117-1 : 137-153.
- McMILLAN N.J., EMBRY A.F., GLASS D.J. (Eds.). (1988). — *Devonian of the World. Proceeding of the Second International Symposium of the Devonian System* Calgary. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 14, 1: 795 p., 2 : 674 p, 3 : 714 p.
- McGHEE G. R. (1996). — The Late Devonian Mass Extinction. The Frasnian/Famennian crisis. In *Critical Moments in Paleobiology and Earth History Series*. Columbia University Press : 303 p.
- MENNING R. (1989). — A synopsis of Numerical Scales 1917 - 1966. *Episodes* : 3-5.
- NICOLLIN J.P. et BRICE D. (2002). — Stratigraphic value of some Strunian (Devonian, Uppermost Famennian) Productidina, Rhynchonellida, Spiriferida brachiopods. Eighth International Conodont Symposium held in Europe ECOS VIII. Toulouse-Albi. Actes du Laboratoire de Géologie Sédimentaire et Paléontologie de l'Université Paul Sabatier. Toulouse. Série 1 : communication : 48.
- ODIN G. S. (2002). — Société Géologique de France, <http://sgfr.free.fr/Images/echelle-stratigraphique.jpg>
- ODIN G.-S. et ODIN C. (1990). — Echelle numérique des temps géologiques, mise à jour 1990. *Géochronique* 35 : 12-19.
- OLIVER W. A. Jr, et PEDDER A. E. H. (1994). — Crises in the Devonian history of the rugose corals. *Paleobiology* 20 : 178-190.
- OSWALD D.H. (Ed.) (1968). — 'Devonian of the World.. International Symposium on the Devonian System. Calgary, Canada 1967. Alberta Society of Petroleum Geology, 14-1 : 1055 p., 14-2 : 1377 p.
- SARTENAER P. (1967). — Is the term Strunian worth being properly defined, and thus kept? Subcommission on Devonian Stratigraphy. *Newsletter*, 14 : 9-10.
- STREEL M., BRICE D., DEGARDIN J.-M., DERYCKE C., DREESEN R., GROESSENS E., HANCE L., LEGRAND-BLAIN M., LETHIERS F., LOBOZIAK S., MAZIANE N., MILHAU B., MISTIAEN B., POTY E., ROHART J.-C., SARTENAER P., THOREZ J., VACHARD D. et BLIECK A. (1998). — Proposal for a Strunian substage and a subdivision of the Famennian Stage into four substages. SDS - ECOS VII. *Bologne* : 1-8.
- STREEL M. (2001). — The Uppermost Famennian around the World (definition, biostratigraphical and sedimentological context). Document SDS -Frankfurt 2001.
- STREEL M., AVKHIMOVITCH V.I., BERKOWSKI B., DREESEN D., DURKINA A.V., HANCE L., HERBIG H.G., KORN D., MAMET B., MAZIANE-SERRAJ N., MISTIAEN B., THOREZ J., WEBER H.M., WEYER D. (2002). — Biostratigraphic correlation at the late or/and latest Famennian from Western, Central and Eastern European sections State of the art. SDS Meeting Toulouse June 24 2002.
- TRAGELEHN H. et HARTENFELS S. (2002). — Köstenhof quarry (Frankenwald, Bavaria) – a potential reference section for the Early/Middle and the Middle/Late Famennian boundary. Document SDS Toulouse 2002.
- WALLISER O.H. (2000). — The Eifelian-Givetian Stage Boundary. In P. Bultynck (ed.) *Subcommission on Devonian Stratigraphy. Recognition of Devonian series and stages boundaries in geological areas*. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 225 : 37-47.
- YOLKIN E.A., KIM A.E., WEDDIGE K., TALENT J.A. et HOUSE M.R. (2000). — The basal Emsian GSSP in Zinzil'ban Gorge, Uzbekistan. In P. Bultynck (Ed.) *Subcommission on Devonian Stratigraphy. Recognition of Devonian series and stages boundaries in geological areas*. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 225 : 17-25.
- YOUNG C.C. (1995). — Timescales 4. Devonian. AGSO Record 1995/33 : 47p. In *Changes to the Geologic Time Scale. Newsletter* 13 : 1-2.
- ZIEGLER W. (2000). — The Lower Eifelian Boundary. In P. Bultynck (Ed.) *Subcommission on Devonian Stratigraphy. Recognition of Devonian series and stage boundaries in geological areas*. Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 225 : 27-36.
- ZIEGLER W. & SANDBERG A. (1990). — The Late Devonian Standard Conodont Zonation. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, 121 : 1 – 115.



## APPORT DES ETUDES PALEOBOTANIKES DANS LE BASSIN HOULLER DU NORD-PAS-DE-CALAIS AUX RECONSTITUTIONS PALEO GEOGRAPHIQUES DU CARBONIFERE.

Contribution of the paleobotanical investigations in the Northern France coal field to the  
palaeogeographic reconstructions of the Carboniferous.

par Jean-Pierre LAVEINE (\*), Shanzhen ZHANG (\*\*), et Yves LEMOIGNE (\*\*\*)

(Planches XI à XIV)

*Résumé.* — Avec le renouveau des idées mobilistes, les reconstitutions paléogéographiques au cours des temps sont à l'honneur dans divers domaines de la géologie. La paléobotanique n'échappe pas à la règle, et notamment en ce qui concerne la période carbonifère, eu égard à l'accumulation impressionnante des documents paléobotaniques résultant de l'exploitation charbonnière à travers le monde. Les investigations intensives menées depuis deux siècles dans le bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais ont permis de rassembler des fossiles exceptionnels et de contribuer à l'élaboration d'une échelle biostratigraphique extrêmement précise pour le Carbonifère. Cependant, certaines exigences méthodologiques doivent être respectées pour l'utilisation des plantes fossiles à des fins paléogéographiques. L'analyse de la distribution globale du genre *Paripteris*, une ptéridospermée du Carbonifère, a permis de bien cerner la démarche à suivre en la matière.

*Abstract.* — *With the renewal of mobilistic concepts, palaeogeographical reconstructions through geological time are one of the aims in various domains of geological research. Palaeobotany does not escape this trend, especially for Carboniferous times, because of the impressive accumulation of palaeobotanical data resulting from world-wide coal mining. The extensive investigations conducted for more than two centuries in the North-Pas-de-Calais coal field have brought about exceptional fossil plant remains, and these have contributed to the establishment of a very precise biostratigraphic scale for the Carboniferous Period. However, some methodological requirements must be observed for using a fossil plant in a palaeogeographical perspective. The analysis of the global distribution of the genus Paripteris, a Carboniferous pteridosperm, has allowed us to circumscribe the requirements that must be respected in this kind of approach.*

### I. — INTRODUCTION

Avec le renouveau des idées mobilistes lié à l'avènement de la "Tectonique des Plaques", les reconstitutions paléogéographiques à diverses époques et l'analyse des déplacements des masses continentales qui en est le corollaire représentent un objectif, parmi d'autres, des recherches menées dans un certain nombre de domaines des Sciences de la Terre. Le paléomagnétisme est l'un de ces domaines. On pourrait croire que les réponses qu'il apporte, fondées sur des données physiques mesurables, sont incontestables et qu'elles

rendent dès lors toute autre approche inutile. La variété des reconstitutions paléogéographiques proposées pour les périodes anciennes montre de toute évidence que les résultats des études paléomagnétiques ne peuvent prétendre à l'infailibilité, pour des raisons diverses. Si l'on examine sur des reconstitutions paléogéographiques proposées pour le Paléozoïque supérieur les positions respectives des blocs continentaux qui constituent le territoire chinois (Bloc Tarim au Nord-Ouest, Bloc Chine du Nord ou Sino-Korea, Bloc Chine du Sud ou Yangtze, pour les principaux d'entre eux), ainsi que la position de l'ensemble indo-chinois, on s'aperçoit

(\*) Université des Sciences et Technologies de Lille, UFR Sciences de la Terre, Laboratoire de Paléobotanique, UMR CNRS 8014 "Paléontologie et Paléogéographie du Paléozoïque", SN 5, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex, France; Télécopie: 33 (0)3 20 43 69 00; e-mail: Jean-Pierre.Laveine@univ-lille.fr

(\*\*) Karst Dynamics Laboratory, Ministry of Land and Resources, 40 Seven Star road, 541004 Guilin, Guangxi Zhuang Autonomous Region, People's Republic of China, and Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica, Chi-Ming-Ssu, 210008 Nanjing, People's Republic of China; Fax: 86 25 3282219

(\*\*\*) Université Claude Bernard, Lyon 1, Laboratoire de Paléobotanique, bâtiment 401A, 69622 Villeurbanne Cedex, France

que les positions relatives de tous ces blocs peuvent être très différentes d'une reconstitution à l'autre (par exemple McElhinny *et al.*, 1981; Lin *et al.*, 1985). Le champ d'investigation reste donc largement ouvert pour d'autres disciplines, dont la paléobotanique. On peut en effet facilement concevoir que l'analyse de la distribution géographique des végétaux vasculaires, essentiellement inféodés au milieu terrestre et fixés, soit susceptible d'apporter aisément et rapidement de nombreux arguments décisifs en la matière. En fait la réalité est beaucoup plus complexe et une grande prudence est de mise. L'analyse de la distribution au Carbonifère du genre *Paripteris* Gothan va nous permettre d'illustrer la démarche à suivre dans l'utilisation des plantes fossiles à des fins paléogéographiques et de souligner les écueils à éviter.

## II. — DISTRIBUTION PALEOGEOGRAPHIQUE GLOBALE DU GENRE *PARIPTERIS*

### 1) Présentation rapide

Le genre *Paripteris*, bien représenté dans le bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais (par exemple Pl. XI, fig. 1),

appartient à l'ensemble des Neuroptéridées. Les Neuroptéridées sont des Ptéridospermées ("Fougères à graines") caractérisées par des pinnules en forme de coeur à la base et pourvues d'une nervation ouverte (Pl. XI, fig. 2) ou réticulée (Pl. XIII, fig. 3). Le terme "pinnules" correspond aux divisions ultimes du limbe des feuilles généralement très divisées de ces végétaux (en dépit de leurs dimensions les spécimens Pl. XIII, fig. 1 et 2 ne représentent que des fragments de ces feuilles, désignées aussi par le terme de frondes). Les pinnules de *Paripteris* sont à nervation ouverte (Pl. XI, fig. 2-3), les graines sont de forme oblongue, d'assez grande taille, allant de 1,5 à 3 cm de long (Pl. XI, fig. 4; Pl. XIV, fig. 3) et sont pourvues de six carènes longitudinales (Pl. XIII, fig. 6a, 6b), d'où leur attribution au genre *Hexagonocarpus* Renault.

Les pinnules du genre *Paripteris* se rencontrent très généralement détachées et en grande abondance à certains niveaux du Carbonifère. On les a récoltées en Chine du Sud (Pl. XI, fig. 6-8), en Chine du Nord (Pl. XI, fig. 9-13), dans le Tarim (Pl. XI, fig. 14-16), et on les connaît depuis longtemps en Europe (Est et Ouest) et en Amérique du Nord (la figure 1 montre sur une carte géographique actuelle la répartition globale des "localités" à *Paripteris*, arrêtée à la fin 1992).



Fig. 1. — Distribution globale des premières occurrences du genre *Paripteris* Gothan sur une configuration géographique actuelle. V, Viséen; N, Namurien; W, Westphalien; NB†, Namurien B supérieur. Un point d'interrogation proche du gisement ou de l'indication de l'âge implique une imprécision au plan taxonomique ou chronologique (d'après Laveine *et al.*, 1992, 1993a).

Fig. 1. — Global distribution of the first occurrences of the genus *Paripteris* Gothan on a present-day geographical map. V, Viséan; N, Namurian; W, Westphalian; NB†, upper Namurian B. A question-mark close to the dot or age indication implies imprecision at taxonomic or chronologic levels (from Laveine *et al.*, 1992, 1993a).

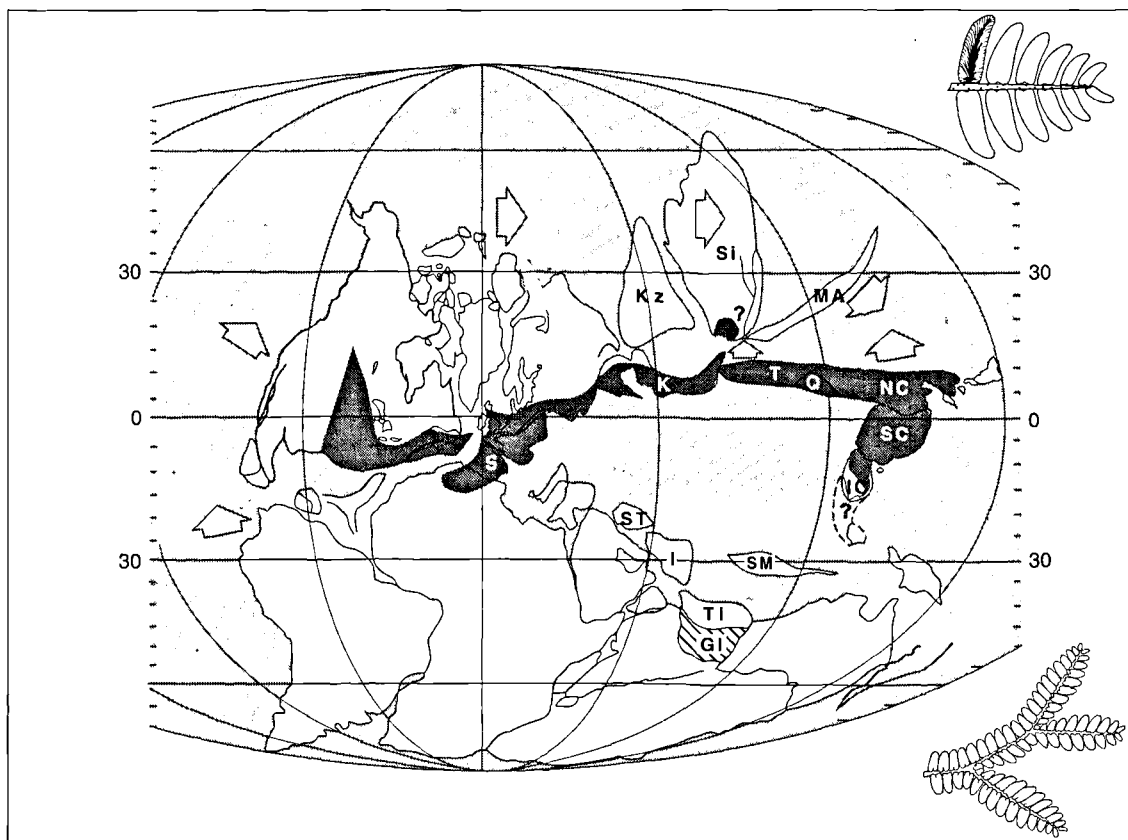


Fig. 2. — Extension paléogéographique (en gris foncé) de la "Flore à *Paripteris*", approximativement au Namurien supérieur/Westphalien inférieur; flèches: sens de déplacement des blocs continentaux; les mers plus (lignes horizontales) ou moins (lignes obliques) profondes ne sont tentativement suggérées que pour l'Amérique du Nord et l'Europe (au sein de leurs limites actuelles); le contour des blocs est tiré de Scotese et McKerrow (1990); GI: partie nord de la Grande Inde; I: Iran; IC: Indochine; K: Karakum; Kz: Kazakhstan; MA: Arc Mongol; NC: Chine du Nord; Q: Qaidam; S: Espagne; SC: Chine du Sud; Si: Sibérie; SM: Sibumasu; ST: Turquie du sud; T: Tarim; Ti: Tibet, non détaillé (d'après Laveine *et al.*, 2000).

Fig. 2. — Palaeogeographical extension (dark grey) of the "Paripteris Flora", at approximately late Namurian/early Westphalian time; arrows: direction of plate motions; more or less deep (horizontal lines) or shallow (oblique lines) marine areas within the (present-day) continental limits suggested only for North America and Europe; contours of land masses taken from Scotese and McKerrow (1990); GI: northern part of Greater India; I: Iran; IC: Indochina; K: Karakum; Kz: Kazakhstan; MA: Mongolian Arc; NC: North China; Q: Qaidam; S: Spain; SC: South China; Si: Siberia; SM: Sibumasu; ST: South Turkey; T: Tarim; Ti: Tibet, undifferentiated (from Laveine *et al.*, 2000).

*Paripteris* étant une plante inféodée au milieu terrestre, sa distribution globale entraîne la nécessité de connexions terrestres entre les régions concernées, et notamment entre les blocs chinois mentionnés ci-avant, contrairement à ce que l'on peut voir sur certaines reconstitutions paléogéographiques, comme par exemple celle de Scotese et McKerrow (1990; voir plus loin fig. 7). Il était donc nécessaire de proposer une autre reconstitution pour prendre en compte les contraintes imposées par la distribution du genre *Paripteris* (fig. 2).

Tout chercheur mettant sur le marché ce genre de document est, cela va de soi, convaincu du bien-fondé de sa proposition. Il peut toutefois paraître pour le moins présomptueux en l'occurrence ici de fonder des conclusions aussi péremptoires au plan paléogéographique simplement sur la découverte de quelques pinnules en forme de coeur à la base. La question n'est peut-être pas aussi simple (pour ne pas dire simpliste). Un certain nombre de points méritent d'être cernés, et tout d'abord la question taxonomique. Qu'est-ce qui autorise à proposer la détermination *Paripteris*, alors que parfois l'on ne dispose que de pinnules détachées, certes généralement très abondantes?

## 2) Bref rappel taxonomique et nomenclatural

Le genre *Paripteris* Gothan fut différencié en 1941. L'espèce type du genre, qui en est aussi l'espèce la plus courante, est *Paripteris gigantea* décrite par Sternberg pour la première fois en 1822. On en déduit donc que cette espèce bien connue a été, avant la différenciation du genre *Paripteris* par Gothan, nécessairement mentionnée sous une autre appellation générique. Elle fut initialement et très brièvement attribuée au genre actuel *Osmunda* Linné, puis très vite transférée dans le genre *Neuropteris* Brongniart, genre qui existe toujours et qui est à l'origine du terme plus général de "Neuroptéridées". Cela signifie, sans vouloir entrer trop dans les détails, que le genre *Paripteris* est donc loin d'être le seul genre parmi les ptéridospermées à présenter des pinnules en forme de coeur à la base et à nervation ouverte. Au moins quatre autres genres relativement bien représentés au Carbonifère présentent ce même type de pinnules (à savoir *Neuropteris* Brongniart 1822, *Neuraethopteris* Cremer 1893, *Laveineopteris* Cleal *et al.* 1990 et *Cardioperis* Goganova *et al.* 1993). Si les dates sont indiquées, c'est pour qu'il soit bien clair que les espèces les plus communes (et

donc découvertes très tôt) de tous les genres créés postérieurement à 1822 étaient initialement classées sous la seule appellation générique *Neuropteris*, et que c'est la découverte ultérieure de caractéristiques propres à chacun de ces sous-ensembles, caractères autres que la forme et la nervation des pinnules, qui a entraîné leur séparation d'avec le genre originel. Il en résulte que *Paripteris* doit donc présenter en principe des caractères distinctifs bien marqués pour permettre aisément sa reconnaissance d'avec les autres genres mentionnés.

Une première différence importante apparaît dès que l'on peut disposer d'une extrémité de penne de dernier ordre. Les pennules de tous les genres mentionnés autres que *Paripteris* montrent une configuration "imparipinnée", c'est-à-dire qu'elles se terminent par une seule pinnule terminale dans le prolongement du rachis de la penne (Pl. XII, fig. 1-2), pinnule terminale qui, quelle que soit sa taille, est toujours plus grande que les pinnules latérales voisines (fig. 3A). En revanche les pennules de dernier ordre de *Paripteris* se terminent par une **paire** de pinnules toujours plus petites que les pinnules voisines (Pl. XII, fig. 3-4). C'est la configuration "paripinnée" (fig. 3B). Cette caractéristique avait été mentionnée dès 1879 par Zeiller. Par la suite Zeiller (1888, 1900) distingua toujours clairement le "Groupe du *Neuropteris gigantea*" des autres *Neuropteris*. Toutefois ce n'est qu'en 1941 que cette caractéristique fût formellement circonscrite par Gothan au plan nomenclatural, par l'appellation générique on ne peut plus explicite de "*Paripteris*".

Par conséquent, dès que l'on a la chance de trouver dans un site des extrémités de pennules paripinnées avec des pinnules en coeur à la base et à nervation ouverte, on peut affirmer que l'on est bien en présence du genre *Paripteris*, puisqu'il est le seul à présenter cette caractéristique parmi les genres de Neuroptéridées du Carbonifère. Ce fut le cas en Chine du Sud (Pl. XII, fig. 5), en Chine du Nord (Pl. XII, fig. 6-7), et dans le Tarim (Pl. XII, fig. 8-9). Toutefois la découverte d'extrémités de pennules paripinnées est loin d'être aisée. De tels échantillons sont rares et représentent déjà en quelque sorte des "échantillons de musée". Comme cela était souligné depuis longtemps, quand on a affaire à *Paripteris* on ne trouve, très généralement, que de nombreuses pinnules dispersées. C'est la raison pour laquelle Zeiller écrivait en 1888 (p. 259): "Les pinnules du *Nevr. gigantea* étaient évidemment très caduques, car il est assez rare de les trouver encore attachées au rachis comme sur l'échantillon figuré; très souvent elles gisent dispersées, et la détermination spécifique est alors fort difficile". Notons bien que ceci a été écrit en 1888, et que par conséquent toutes ces formes étaient alors classées sous la seule appellation générique *Neuropteris* (initialement orthographiée *Nevropteris*). De ce fait, quand Zeiller parle de difficulté de détermination, c'est d'avec toutes les autres espèces à pinnules de forme neuroptéroïde.

Il est dommage que Zeiller, qui était un très fin observateur, n'ait pas eu à disposition quelques-uns des beaux spécimens qui ont été découverts par la suite et qui sont conservés soit au Musée de Géologie de Lille (Pl. XIII, fig. 1), soit au Centre Historique Minier de Lewarde (Pl. XIII, fig. 2), car il aurait pu dès lors élucider complètement cette question, et montrer que même en ne disposant que de pinnules dispersées il est possible, à condition que les pinnules soient suffisamment abondantes, de conclure assez facilement si l'on est en présence du genre *Paripteris*, ou pas. Ces beaux spécimens permettent en effet de montrer que la

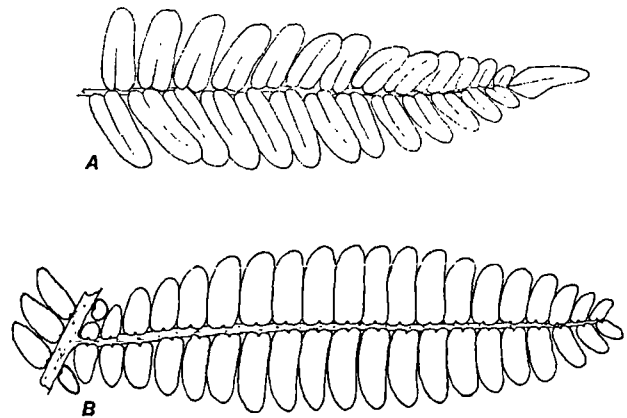


Fig. 3. — Configuration des extrémités de pennules de dernier ordre chez les Neuroptéridées. A: configuration imparipinnée; B: configuration paripinnée.

Fig. 3. — Configuration of the ultimate pinna endings within the Neuropterids. A: imparipinnate configuration; B: paripinnate configuration.

différence dans la configuration imparipinnée ou paripinnée des pennules n'est pas une caractéristique mineure, et qu'elle est corrélative d'autres caractéristiques importantes concernant l'architecture générale de la fronde.

Si l'on examine par exemple une fronde de la Fougère Aigle [*Pteridium aquilinum* (Linné) Kuhn], qui montre elle aussi une configuration imparipinnée des pennules (mais pas des pinnules de forme neuroptéroïde), que constate-t-on? Eh bien qu'il existe toutes les transitions entre éléments moins divisés et éléments plus divisés, autrement dit: il y a une différenciation progressive du limbe par **segmentation limbaire**. En simplifiant à l'extrême on peut considérer que la pinnule terminale, à l'apex de la fronde, différencie latéralement des lobes qui plus bas deviennent des pinnules de plus en plus grandes, qui se lobent à leur tour progressivement pour devenir des pennules unipinnées (ou de dernier ordre), et ainsi de suite. Il importe de bien souligner que tous ces phénomènes de segmentation limbaire ont lieu très tôt dans l'ontogénie de la fronde et que, lors de l'étalement de cette dernière, il ne se produit plus essentiellement qu'une croissance superficielle du limbe, sans augmentation notable de la segmentation. Ainsi, une pinnule complètement étalée ne se transforme pas en penne de dernier ordre et c'est seulement en examinant une fronde de l'extrémité vers la base que l'on peut suivre cette "transformation". Remarquons en outre qu'en réalité le développement se déroule dans l'autre sens et que, n'était le but didactique recherché, il serait préférable de parler par exemple de pennules de dernier ordre qui se résolvent progressivement vers les extrémités en pinnules lobées, puis en pinnules simples. Toutefois cette remarque générale ne change pas fondamentalement la question puisque ces parties, plus ou moins segmentées en fonction de leur position dans la fronde, sont toutes initialement différenciées par l'apex.

Une telle segmentation limbaire (fig. 4) existe aussi, à des degrés divers, chez les genres de Neuroptéridées à **configuration imparipinnée** (*Neuropteris*, *Neuraethopteris*, *Laveinopteris* et *Cardioneuropteris*). Les pinnules terminales différencient là aussi latéralement des lobes et

petites pinnules encore fortement attachés au rachis, qui plus bas deviennent des pinnules de forme typiquement neuroptéroïde de plus en plus grandes, qui ensuite se lobent à leur tour progressivement pour devenir des pennes de dernier ordre (fig. 4, et par exemple Pl. XII, fig. 10). De ce fait, même quand il arrive que les frondes de ces genres ont été fortement dissociées suite éventuellement au transport qu'elles ont pu subir avant enfouissement, et qu'elles ne subsistent plus que sous forme de restes de dimensions réduites, on trouve toujours aisément (Pl. XII, fig. 11) des extrémités de pennes imparipinnées puisque, étant donné l'attache encore importante des pinnules latérales vers les extrémités des pennes suite à l'existence de cette segmentation limbaire, ce sont ces extrémités qui résistent le mieux à la désagrégation lors de la fossilisation.

La fronde de *Paripteris* est quant à elle construite sur un mode tout à fait différent. Il n'y a à notre connaissance que deux spécimens au monde qui permettent de mettre clairement en évidence la différence, et encore ne s'agit-il pas strictement de spécimens du genre *Paripteris*, mais de son descendant à nervation réticulée (Pl. XIII, fig. 3) le genre *Linopteris* Presl, ce qui est sans importance ici puisque leurs frondes sont strictement bâties sur le même modèle. Ces deux spécimens proviennent du bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais. Le plus anciennement découvert (Pl. XIII, fig. 1) est exposé au Musée de Lille. Que montre-t-il? Eh bien que dans ce groupe il n'y a pas de transitions par exemple entre penne unipinnée (partie supérieure droite de la figure 1, Pl. XIII par exemple) et penne bipinnée (partie inférieure droite de la fig. 1, Pl. XIII), ou entre pinnule et penne unipinnée (fig. 5, et parties moyenne et inférieure droites de la fig. 1, Pl. XIII). Autrement dit et bien que les frondes puissent être de grande taille (probablement 6 à 7 m de long pour les plantes adultes) il n'y a pas de segmentation limbaire. Il en résulte que l'on ne trouve jamais de pinnules lobées dans ce groupe, quelle que soit la taille des échantillons. En revanche, et quels que soient les rachis concernés, ils sont tous garnis de pinnules simples, entières (fig. 5).

On peut faire les mêmes constatations sur le second spécimen, conservé au Centre Historique Minier de Lewarde (Pl. XIII, fig. 2). La fronde est donc construite sur un mode tout à fait différent de ce que nous avons vu par exemple chez la Fougère Aigle. Zeiller, encore lui, avait commencé à entrevoir cette question. Il écrivait en 1900 (p. 105): "... le *Nevr. gigantea* Sternberg, du Westphalien, à pinnules décroissant peu à peu vers l'extrémité des pennes, à rachis garni, entre les pennes qui s'en détachent, de pinnules semblables à celles de ces dernières, **comme si la fronde était formée des ramifications successives et répétées d'un axe garni toujours des mêmes pinnules...**". Et c'est effectivement la manière dont est construite la fronde de *Paripteris* (fig. 6).

Ce type de fronde est qualifié de pseudo-penné (Laveine, 1997) car, en dépit de la grande taille que la fronde peut atteindre, et en dépit de ses nombreuses subdivisions apparemment subordonnées les unes aux autres, ces subdivisions résultent uniquement de ramifications dichotomes (anisotomes pour la plupart, sauf vers les extrémités où le mode de division dichotome reste bien apparent) du rachis porteur de pinnules semblables. Toutes ces ramifications sont homologues et de ce fait toutes les pinnules elles-mêmes sont homologues. Elles ne résultent pas d'un phénomène de segmentation limbaire, c'est la raison pour laquelle, insistons-y, elles ne sont jamais lobées. Elles ne sont

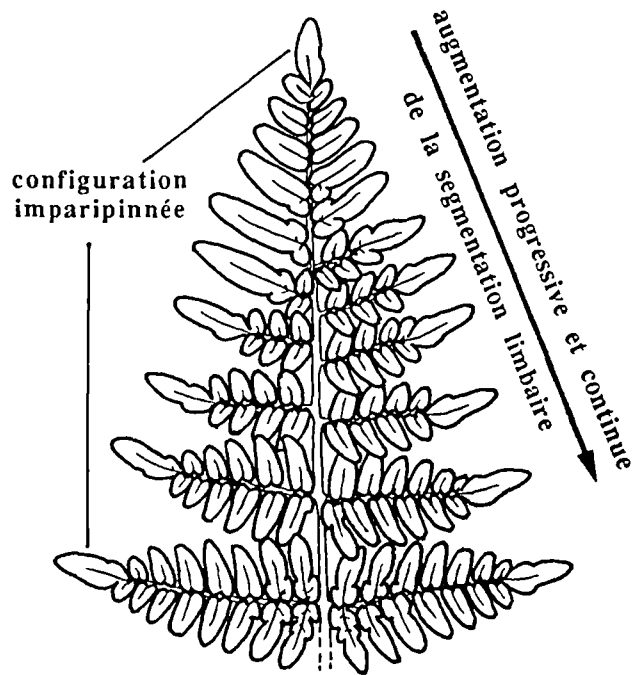


Fig. 4. — Mode de différenciation du limbe par segmentation limbaire chez Neuroptéridées imparipinnées.

Fig. 4. — Mode of differentiation of the lamina by laminate segmentation within the imparipinnate Neuropterids.

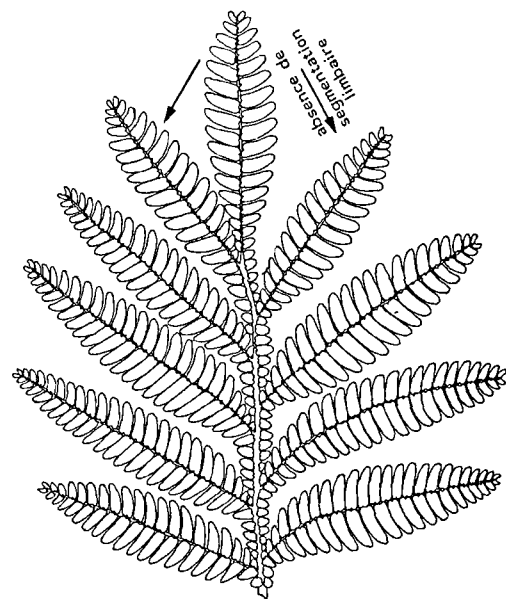


Fig. 5. — Fragment de fronde de *Paripteris* montrant les principales caractéristiques morphologiques (d'après Laveine et al., 1993a).

Fig. 5. — Frond fragment of *Paripteris* showing the main morphological characteristics (from Laveine et al., 1993a).

toutes, y compris les pinnules des extrémités de pennes, attachées que par un point au rachis (la marque de ce point d'attache est toujours bien apparente à la base des pinnules, voir par exemple Pl. XI, fig. 1-3). Elles étaient de ce fait facilement caduques, d'où il s'ensuit qu'on ne les trouve très généralement que détachées (Pl. XI, fig. 5, 6, 8, 16).

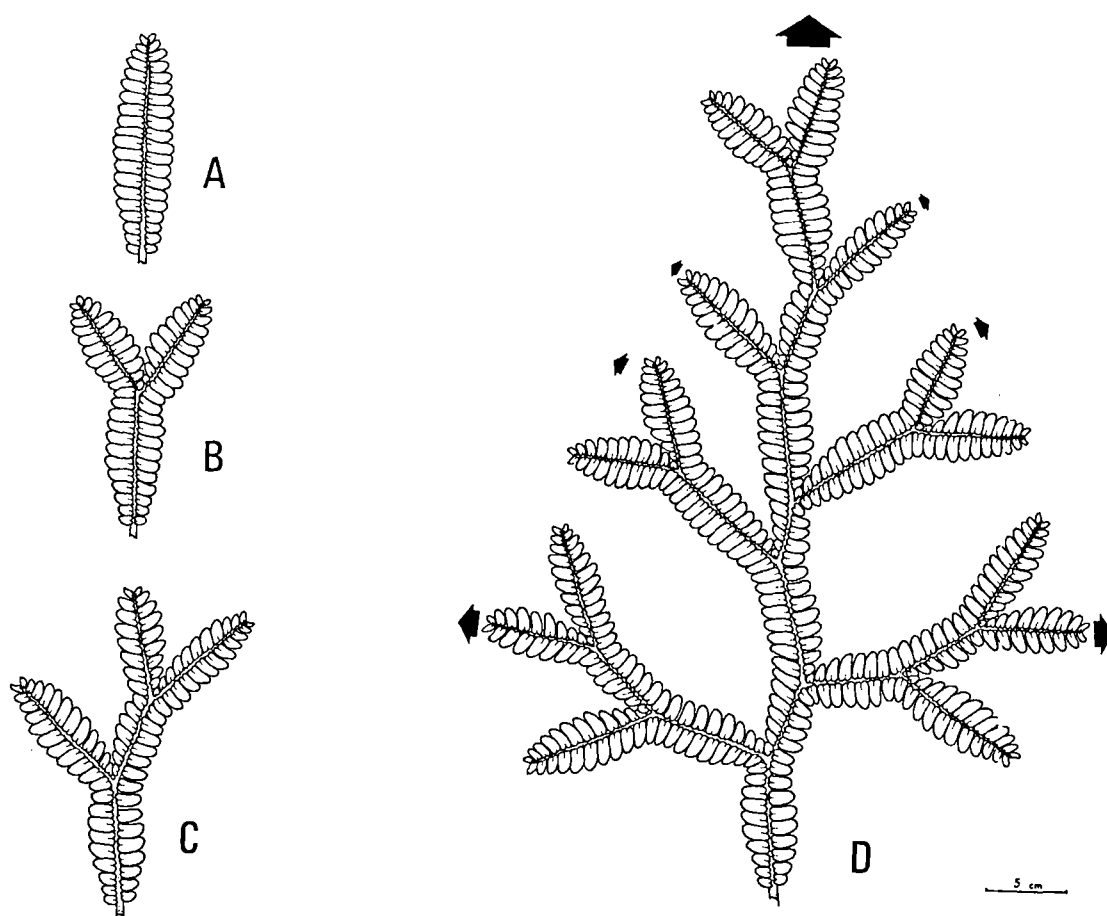


Fig. 6. — Mode de différenciation d'une fronde de type pseudo-penné (genres *Paripteris* Gothan et *Linopteris* Presl) résultant uniquement de bifurcations du "module" de base, c'est-à-dire d'un "axe" garni de pinnules simples et pourvu d'une terminaison paripinnée (la dimension des flèches est proportionnelle à l'importance de la différenciation selon les diverses directions). En dépit de la taille de ces frondes et de leur apparent grand degré de subdivision, les pinnules, présentes sur tous les rachis, sont toutes homologues (d'après Laveine *et al.*, 1993a).

Fig. 6. — Mode of differentiation of a pseudo-pinnate frond (genera *Paripteris* Gothan and *Linopteris* Presl) proceeding only by rachial bifurcations from the basic "module", i.e. an "axis" with entire pinnules and with a paripinnate termination (the size of the arrows is proportional to the importance of the differentiation along the diverse directions). In spite of the size of these fronds, and of their apparent great degree of subdivision the pinnules, present on all the rachises, are all homologous (from Laveine *et al.*, 1993a).

Il résulte de toutes ces informations que même en présence seulement de pinnules dispersées, si ces pinnules sont assez nombreuses l'attribution ou non à *Paripteris* est relativement aisée. En effet, s'il s'agit de *Paripteris*, il n'y a jamais de pinnules lobées, jamais de terminaisons imparipinnées, alors que s'il s'agit d'un genre imparipinné, quel que soit le degré de désorganisation de la fronde, on trouve toujours néanmoins (Pl. XII, fig. 11) des restes imparipinnés et des pinnules lobées qui permettent de faire la différence d'avec *Paripteris*. C'est la raison pour laquelle, même pour certaines localités de Chine du Sud et de Chine du Nord où l'on n'a trouvé que des pinnules détachées, il a été possible de préciser si l'on était en présence de *Paripteris* ou pas. L'on peut ajouter que dans de nombreux cas ont été trouvés en association les mêmes organes polliniques désignés sous le nom de *Potoniaea* Zeiller (Pl. XI, fig. 6, flèche; Pl. XIII, fig. 7; Pl. XIV, fig. 4), et les mêmes graines, de type *Hexagonocarpus* Renault (Pl. XI, fig. 4; Pl. XIV, fig. 3, flèche). Toutes ces données concordantes confirment que dans toutes les localités mentionnées on se trouve bien en

présence du genre *Paripteris*. Le problème taxonomique initialement posé est donc résolu.

Il en reste d'autres, et notamment un problème méthodologique. Dans une perspective paléogéographique, dans quelle mesure peut-on prendre en compte les données fournies par la paléobotanique?

### III. — PALEOBOTANIQUE ET PALEOGEOGRAPHIE

Il existe en la matière deux principaux types d'approche, comme l'a bien fait remarquer Wnuk en 1996 dans une publication synthétisant les informations sur la phytogéographie du Paléozoïque: soit comparer les assemblages de plantes fossiles récoltées dans diverses localités, soit analyser la distribution globale de taxons bien précis.



### 1) Comparaison d'assemblages de communautés spécifiques

C'est la procédure la plus couramment suivie, peut-être en vertu de l'adage (bien connu des candidats au baccalauréat) selon lequel "il n'y a de science que du général". On verra ci-après ce qu'il en est réellement sur ce point. Mais d'abord de quoi s'agit-il?

Il est évident que dès que des investigations paléobotaniques un peu suivies sont menées sur un site fossilifère on finit par récolter des spécimens appartenant à des groupes systématiques variés. Quand on s'adresse au Carbonifère, il est courant de récolter dans un même gisement diverses espèces de Lépidophytes, d'Arthropytes, de Filicophytes, de Ptéridospermophytes et de Cordaïtophytes. Il est indéniable que ces trouvailles sont intéressantes, et importantes à divers points de vue (systématique, biostratigraphique, paléoécologique). La tentation est donc grande de prendre aussi en compte la composition de ces assemblages dans une perspective paléogéographique. Cette tentation est d'autant plus grande qu'elle permet de faire état que l'on se situe à la pointe de la recherche, par le biais d'études quantitatives, très à la mode en ce moment. On peut donc faire des statistiques, calculer des coefficients divers, des indices de similitude, des indices d'endémisme, et en déduire des hypothèses variées sur les relations géographiques des localités concernées.

### 2) Analyse de la distribution globale de taxons bien précis

Comme le mentionne Wnuk (1996, p. 25), c'est l'approche choisie par "Laveine and his coworkers". Il y aura donc lieu d'analyser ci-après les raisons de ce choix, qui relève apparemment du "particulier", par rapport au "général" que semble représenter la comparaison d'assemblages prenant en compte toutes les espèces rencontrées dans les localités étudiées. Une dernière remarque de Wnuk (1996, p. 28) qui a utilisé pour son travail la reconstitution paléogéographique proposée par Scotese et McKerrow (1990) montrant les blocs chinois assez proches mais néanmoins séparés va permettre de faire la transition avec le point suivant: "the development of numerous regions within the greater Cathaysian Realm is an expected consequence of the latitudinal spread of the Chinese microcontinents and their geographic discontinuity. The degree of discontinuity was such to allow floral exchange between the various microcontinental areas thereby maintaining generally similar floras while still maintaining sufficient separation to permit the development of local endemics. The abundance of mixed Cathaysian-Gondwanan and Cathaysian-Angaran floras (...) is cited as evidence for the active interchange between these land masses not unlike the more recent interchange of floras between the islands of Southeast Asia...". Les différents points de cette remarque mériteraient de longs commentaires. On n'en retiendra ici que la dernière phrase relative aux possibilités d'échanges évoquées pour le Paléozoïque supérieur par comparaison avec l'Actuel, ce qui amène tout naturellement à faire une analyse critique de la méthode actualiste, autrement dit à préciser dans quelle mesure les observations faites sur l'Actuel sont transposables au Passé dans une perspective paléogéographique. Cela permettra ensuite de tester le bien-fondé des deux approches mentionnées.

### 3) Analyse critique de la méthode actualiste

C'est bien entendu une vaste question qui ne pourra être qu'effleurée ici. Le genre *Paripteris*, nous l'avons vu, a une grande extension géographique. Ce n'est pas un cas unique. Les grands voyages de découverte de la fin du 18<sup>e</sup> siècle et du début du 19<sup>e</sup> avaient montré que des espèces végétales identiques pouvaient se rencontrer sur des continents séparés entre eux par de vastes mers. Deux interprétations furent proposées pour expliquer ce fait.

Martins (1858) avait bien posé le problème et avait entrepris une série d'expériences pour tester dans quelle mesure des graines pouvaient être transportées par des courants marins et conserver leurs capacités germinatives. En dépit du fait que les graines de 18 espèces, sur 98 testées, avaient résisté à une immersion de six semaines, et que 7 d'entre elles avaient résisté plus de trois mois, il avait conclu à la multiplicité des centres de création: "Si l'on songe maintenant au concours prodigieux de circonstances favorables qui est nécessaire pour qu'une graine, échouée sur la plage, y lève, se développe, fleurisse, fructifie et devienne le centre d'une colonie végétale, on conclura avec M. Alph. De Candolle que ce mode de transport, si souvent invoqué a dû avoir une part bien minime, à notre époque et aux époques géologiques, sur la diffusion des végétaux à la surface du globe" (Martins, 1858, p. 85); "le transport des graines par les courants doit avoir joué et jouer encore un rôle insignifiant dans la diffusion des espèces entre des pays séparés par la mer. Or, si l'on considère le nombre d'espèces disjointes qui n'auraient pu se répandre que par cette voie, l'idée de la multiplicité des centres de création spécifique acquiert tous les jours plus de probabilité" (Martins, 1858, p. 88). En d'autres termes, une espèce peut apparaître de manière tout à fait indépendante en des endroits très éloignés. Si l'on choisit cette option de créationnisme intégral, il faut bien comprendre que c'est la négation de toute possibilité de recherche valable en paléontologie, et il deviendrait donc inutile de poursuivre plus avant la discussion. En effet, plus question par exemple de dater les terrains à partir de leur contenu fossilifère puisque quelle que soit l'espèce considérée il n'y a aucune raison que celle-ci ait été créée partout au même moment; plus question par ailleurs d'établir des arbres phylétiques, graphes et dendrogrammes divers, quelle que soit la méthode employée. Et, de toute première évidence, plus question non plus d'utiliser la répartition des végétaux fossiles à des fins paléogéographiques!

On comprend aisément que Darwin, dont l'ouvrage fondamental (1859, 6<sup>e</sup> édition en 1872) traite de "L'origine des espèces" ne pouvait éluder ce point (1872, p. 320). Pour Darwin, une espèce donnée ne peut apparaître qu'en un seul endroit. Par voie de conséquence, face à la vaste distribution géographique de certaines espèces, on ne peut échapper à l'analyse des modes de dispersion. "Whenever it is fully admitted, as it will some day be, that each species has proceeded from a single birthplace, and when in the course of time we know something definite about the means of distribution, we shall be enabled to speculate with security on the former extension of the land." (1872, p. 324).

C'est la raison pour laquelle Darwin (1857) avait, peu de temps avant Martins, lui aussi étudié l'action de l'eau de mer sur la germination des graines. Il en avait conclu que 14% des

graines peuvent résister à l'eau de mer pendant au moins 28 jours, et donc peuvent être potentiellement transportées par des courants marins sur une distance approximative de 1500 km: "...the seeds of 14% plants belonging to one country might be floated across 924 miles of sea to another country, and when stranded, if blown by an inland gale to a favourable spot, would germinate." Ces distances sont calculées à partir de la vitesse moyenne des courants dans l'Atlantique et pour une durée de résistance des graines de 28 jours. Mais certaines graines peuvent résister beaucoup plus longtemps (jusqu'à 137 jours dans les essais de Darwin). Darwin nota aussi que les graines de certains ordres sont plus facilement altérées que d'autres. Sur neuf Légumineuses traitées, une seule résista à l'eau de mer.

#### 4) Conséquences fondamentales pour les applications paléogéographiques

Les résultats obtenus par Darwin sont très importants sur un plan méthodologique général, et à différents points de vue. Ils vont aussi permettre de tester le bien-fondé des deux approches mentionnées au début de ce chapitre.

##### a) Paléogéographie et/ou paléoécologie?

Dans un certain nombre de publications traitant de paléobiogéographie à partir de la comparaison d'assemblages de plantes fossiles, il apparaît qu'il y a parfois une certaine confusion entre paléogéographie et paléoécologie.

Dans ces assemblages il y a des plantes qui se reproduisent par des spores pouvant être facilement transportées par le vent, et des plantes à graines parmi lesquelles il ne peut donc être exclu que certaines produisaient des graines pouvant être transportées sur de longues distances par les courants marins. Dès lors quelle peut bien être la portée paléogéographique de conclusions fondées sur des comparaisons d'assemblages de plantes dont les moyens de dispersion peuvent être très variés, et que l'on n'analyse pas? Dans ces conditions où manifestement le hasard a la part belle, quelle peut bien être la signification des belles données statistiques, des beaux indices de similitude, des beaux coefficients d'endémisme mentionnés auparavant? Tout au plus une certaine similitude dans la composition de ces assemblages peut-elle laisser supposer la nécessité d'une certaine similitude des conditions écologiques. On peut donc au mieux faire un peu de paléogéographie latitudinale, en admettant qu'une espèce donnée, même localisée à des endroits différents, doit néanmoins avoir les mêmes exigences écologiques. On en infère donc que les régions correspondantes doivent se situer dans une même bande latitudinale, qui sera toutefois plus ou moins large selon l'amplitude écologique du taxon considéré, et à condition que l'espèce ne soit pas capable de modifier progressivement ses exigences écologiques. Mais de toute façon cela ne permet pas de conclure formellement sur la connexion terrestre des régions concernées. Toute conclusion paléogéographique avancée dans ces conditions est purement subjective, fût-elle parée d'une belle robe quantitative.

Qui plus est, si une certaine similitude dans la composition des assemblages laisse supposer une certaine similitude des conditions écologiques, l'inverse n'est pas vrai. Une différence marquée dans la composition des assemblages ne signifie pas pour autant que les régions correspondantes étaient soumises à un environnement différent. Si l'on reprend

les résultats de Darwin pour les plantes à graines, si 14% de graines peuvent être transportées sur de grandes distances par les courants marins, a contrario ce n'est pas le cas pour les 86% restants. Par conséquent deux régions situées dans une même bande latitudinale mais suffisamment éloignées l'une de l'autre pourront livrer des assemblages à 86% différents pour ce qui concerne les plantes à graines, sans que pour autant cette différence soit liée à l'environnement. Bien évidemment ces pourcentages seront différents du fait que les éléments de dissémination d'autres taxons peuvent être transportés par le vent (et par les oiseaux pour les périodes plus récentes), mais là encore quelle peut bien être la validité de comparaisons fondées sur des estimations quantitatives, alors qu'en fait la composition de chaque assemblage représente, au moins en grande partie, un cas particulier tributaire de causes multiples et difficilement analysables? On est bien loin du "général" mentionné en début de chapitre.

##### b) Comparaison d'assemblages spécifiques, ou analyse de la distribution globale de taxons précis?

Finalement, qu'est-ce qui est préférable à des fins paléogéographiques: la comparaison d'assemblages spécifiques, ou l'analyse de la distribution globale de taxons précis? Il paraît clair, d'après les commentaires du paragraphe précédent, que la comparaison d'assemblages spécifiques peut avoir peut-être une certaine signification au plan paléoécologique mais pratiquement pas au point de vue paléogéographique, en l'absence de toute donnée précise sur les moyens de dispersion. Il reste donc l'approche à travers de l'étude de la distribution globale de taxons bien circonscrits, mais dont on aura besoin ici encore de connaître les modes de dispersion.

En définitive, comme l'avait bien compris Darwin, le point crucial repose sur une analyse précise des moyens de dispersion. Ces moyens de dispersion sont très variables au sein d'une communauté végétale. Du fait de cette variabilité, certains taxons peuvent être intéressants à certains points de vue, mais pas à d'autres. Même en se limitant à des taxons précis, il est donc nécessaire d'opérer un choix, en fonction du but recherché.

Il est patent que la dispersion des plantes à éléments de dispersion légers tels que des isospores, de petite taille et aisément transportables par le vent, n'est pas bloquée par la présence d'espaces marins. La dispersion est rapide, instantanée à l'échelle des temps géologiques. Les taxons correspondants sont donc d'excellents marqueurs à des fins biostratigraphiques. En revanche, et pour les mêmes raisons, ils ne peuvent prétendre à être de bons tests paléogéographiques. Ces conclusions sont probablement à nuancer un peu plus en ce qui concerne les végétaux hétérospores, mais elles sont aussi plus difficiles à cerner très précisément.

Restent donc pour les études paléogéographiques principalement les plantes à graines, et en particulier pour la période carbonifère les Ptéridospermées, dont les graines sont d'assez grande taille, ce qui exclut la possibilité de transport par le vent sur de longues distances. Mais pour qu'un taxon soit intéressant au point de vue paléogéographique, il faut aussi qu'il soit bien représenté dans la documentation paléontologique, autrement dit qu'il ait été abondant, et qu'il ait une distribution assez étendue. Les formes endémiques sont sans intérêt pour les analyses paléogéographiques à grande échelle. Ces contraintes restreignent donc de manière

drastique le nombre de taxons susceptibles d'apporter une réponse significative au plan paléogéographique.

Il en résulte que face à une plante fossile satisfaisant à ces exigences (possession de graines d'assez grande taille, abondance et large distribution) on se trouve, suite aux conclusions de Darwin, nécessairement confronté en dernière analyse à l'alternative suivante: la dispersion de cette plante s'opérait-elle strictement par voie terrestre, ou bien ses graines pouvaient-elles être dispersées par d'autres moyens, et notamment par les courants marins? Darwin avait aussi traité d'autres vecteurs possibles de dispersion, par exemple la dispersion par les oiseaux. C'est exclu pour le Paléozoïque. Quand le transport par les oiseaux doit être potentiellement envisagé, tout bien considéré il apparaît que les implications ne sont pas fondamentalement différentes de celles résultant du strict transport par le vent. De la même manière il semble inutile de spéculer ici sur d'éventuelles possibilités de dispersion par des animaux aquatiques, étant donné que les conclusions que l'on pourrait en tirer ne seraient pas fondamentalement différentes de celles qui résultent du transport par des courants marins. Par conséquent, pour le Paléozoïque supérieur, la question peut se limiter essentiellement à l'alternative suivante: dispersion strictement par voie terrestre, ou dispersion possible par des courants marins.

Manifestement, il est clair que cette question ne peut être traitée qu'au cas par cas. En effet, les expériences de Darwin nous livrent la seule donnée quantitative importante fournie par l'Actuel. C'est **deux**! Il existe **deux** catégories principales de plantes à graines: celle dont les graines résistent à l'eau de mer, et celle dont les graines ne résistent pas à l'eau de mer. Sur 9 légumineuses étudiées par Darwin, une seule a résisté à l'eau de mer. Très bien. Mais comment savoir quel va être le comportement de la 10<sup>e</sup> Légumineuse non encore testée? Va-t-elle être résistante, ou pas? Certes la probabilité qu'elle ne le soit pas est pour l'instant de 8 sur 9, mais une probabilité n'est pas une certitude. Pour en décider, il n'y a pas d'autre solution que de procéder à l'expérimentation. Chic, cela va permettre en outre d'améliorer la précision de la probabilité! Ce sera maintenant 8 sur 10, ou 9 sur 10. Mais est-ce que cela nous assurera pour autant de la réponse pour la suivante, le n° 11? Pas du tout. Pour le n° 11, il faudra encore procéder à l'expérimentation. Et pour le n° 12 ensuite? Il faudra expérimenter, encore et toujours. Et ainsi de suite, et la précision sans cesse croissante de la probabilité ne changera rien à l'affaire. On ne peut donc échapper à l'analyse au cas par cas.

Mais alors comment faire avec des graines fossiles de plus de 300 millions d'années? Pas question ici d'expérimentation directe. Comment savoir si les graines d'une plante fossile étaient ou non résistantes à l'eau de mer, et par voie de conséquence comment savoir si l'existence d'espaces marins n'entravait pas la dispersion de ladite plante, ou si au contraire la dispersion ne pouvait se faire strictement que par voie terrestre? Il n'y a qu'un moyen, indirect, qui est de faire une analyse critique de la distribution globale de ladite plante sur les reconstitutions paléogéographiques proposées, et d'en analyser les implications. Si l'on reporte les localités à *Paripteris* par exemple sur la reconstitution de Scotese et McKerrow pour le Namurien (1990, fig. 18), que constate-t-on (fig. 7)?

Pour l'Ouest de la Pangée une concentration dans la bande équatoriale, et à l'Est au contraire un grand étalement

en latitude Nord. Qui plus est, les localités à l'Est sont réparties sur des blocs séparés par des espaces marins. Si la reconstitution pour l'Est correspond vraiment à la réalité, cela implique les remarques suivantes:

a) le genre *Paripteris* était doté d'une assez grande amplitude adaptative au point de vue écologique puisqu'on le trouve de l'équateur jusqu'à pratiquement 30° Nord,

b) ses graines étaient capables de franchir des espaces marins.

On est en conséquence en droit au moins de s'étonner à la fois de son absence dans un certain nombre de régions au Sud, qui se trouvent pourtant à des latitudes très basses, et de sa concentration équatoriale à l'Ouest.

Manifestement il y a une inadéquation certaine entre la distribution de *Paripteris* et la reconstitution proposée. Ce serait déjà un peu mieux par exemple si la Chine du Sud était suturée à la Chine du Nord, comme l'ont proposé Mattauer *et al.* (1985). On se prend donc à penser que la distribution de *Paripteris* serait peut-être bien dépendante de connexions terrestres. Y a-t-il d'autres arguments qui pourraient venir conforter cette hypothèse? Oui, il y en a un autre, souvent mésestimé, d'ordre chronologique, et dont on n'a pas encore parlé jusqu'à présent.

#### 5) L'importance de l'information chronologique

Sur la figure 1 indiquant les différentes localités à *Paripteris* reconnues dans le monde est porté l'âge de la première occurrence significative du genre *Paripteris* dans la localité correspondante. Il convient en premier lieu de bien préciser ce que l'on entend par première occurrence "significative". Une première occurrence peut être considérée comme significative quand elle provient d'une séquence stratigraphique continue, et qu'elle est fondée sur des récoltes répétées. En revanche les premières occurrences datées du Westphalien supérieur dans la partie centrale du bloc sino-coréen sont sans signification dans le cas présent. Elles correspondent simplement à l'âge (Westphalien supérieur) des premiers dépôts carbonifères (Formation Penchi) reposant dans cette région directement sur un calcaire massif daté de l'Ordovicien moyen. Il y a là une énorme lacune stratigraphique, et l'on n'a donc aucune information précise sur l'occurrence réelle de *Paripteris* dans cette région.

Si l'on ne prend donc en compte que les premières occurrences significatives, que constate-t-on? Que les premières occurrences significatives les plus anciennes de *Paripteris* se situent à l'Est et sont datées du Viséen supérieur, à environ -330 MA (Odin, 1994; Foster, 1996), et que les plus récentes sont situées à l'Ouest (Westphalien A supérieur-Westphalien B inférieur), vers -315 MA. Ces données chronostratigraphiques ont été établies depuis longtemps, et indépendamment de toute considération d'ordre paléogéographique (par exemple l'âge Namurien B supérieur pour la plupart des localités d'Europe occidentale a été mentionné dès le début du 20<sup>e</sup> siècle: Jongmans, 1928). Cette différence de 15 millions d'années entre les deux extrémités de la distribution est incompatible avec une dispersion des graines par courants marins. Un transport de proche en proche à la vitesse moyenne ridicule de 100 m par an (certains courants marins atteignent jusqu'à 130 km par jour) donnerait déjà 100 000 km, deux fois et demie le tour de la terre, en un million d'années. Manifestement un transport des graines par courants marins entraînerait une distribution glo-

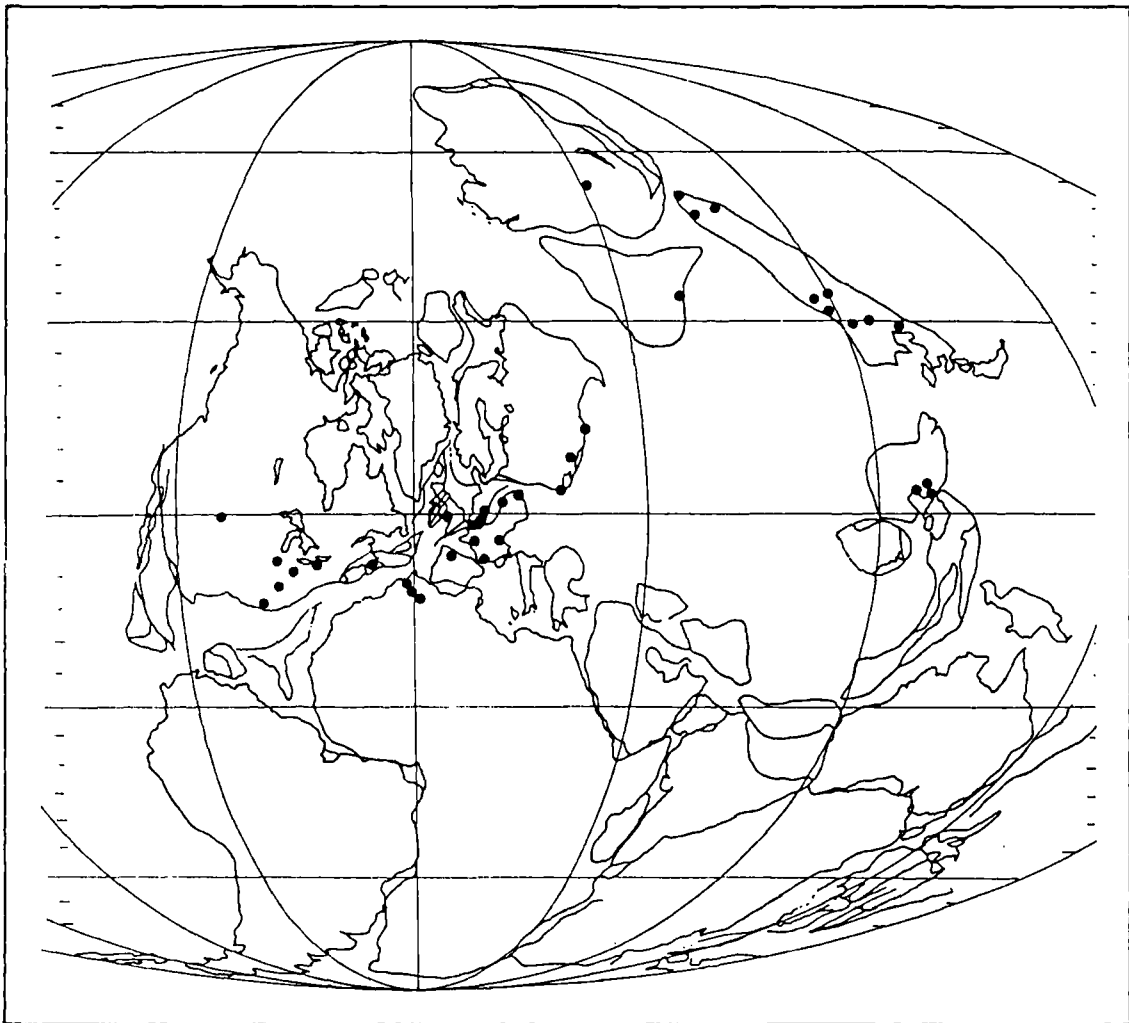


Fig. 7. — Distribution des premières occurrences du genre *Paripteris* sur la reconstitution proposée par Scotese et McKerrow en 1990 pour le Namurien (d'après Laveine *et al.*, 1992).

Fig. 7. — Distribution of the first occurrences of the genus *Paripteris* on the Scotese and McKerrow (1990) reconstitution for the Namurian (from Laveine *et al.*, 1992).

bale quasi instantanée à l'échelle des temps géologiques. On peut donc conclure que l'expansion géographique du genre *Paripteris* n'a pu se faire que par voie terrestre. Cette conclusion est en quelque sorte confirmée aussi par la cohérence chronologique de la distribution est-ouest (fig. 8).

En effet, avec une dispersion par courants marins, et même si l'on pouvait dater très finement les premières occurrences dans cette hypothèse, une région distante pourrait très bien être colonisée avant une région plus proche du centre de dispersion. La distribution géographique des premières occurrences serait aléatoire, il n'y aurait aucune raison pour qu'elle montre une telle cohérence à la fois géographique et chronologique. On peut donc conclure que la dispersion de *Paripteris* ne pouvait se faire que par voie terrestre. Il fallait donc en tirer les conséquences au plan des reconstitutions paléogéographiques, d'où la reconstitution présentée au début de ce travail (fig. 2).

Un exemple supplémentaire va permettre d'insister sur l'importance de l'information chronologique. Une première

reconstitution paléogéographique avait été proposée en 1992 (Laveine *et al.*, 1992, fig. 3) sur laquelle le bloc indochinois et la péninsule malaise avaient été dessinés au contact du bloc Chine du Sud, sur la base d'informations paléobotaniques très restreintes, et peu significatives pour ce qui concerne le Carbonifère. C'est donc sur de vagues considérations que ces blocs avaient été hypothétiquement accolés à la Chine du Sud. Par chance, une mission en Thaïlande au début 1993 a permis de découvrir pour la première fois des flores carbonifères significatives dans le nord-est de la Thaïlande, dont le genre *Paripteris* (Pl. XIV, fig. 7-8), ce qui a permis d'affirmer la connexion terrestre du bloc indochinois avec la Chine du Sud, au moins depuis la fin du Carbonifère inférieur (Laveine *et al.*, 1993b). Toutefois, et pour souligner l'importance de l'information chronologique, il n'a pas été possible jusqu'à présent de dater ce niveau à *Paripteris* de manière suffisamment précise. L'âge Namurien inférieur proposé n'est qu'une hypothèse, vraisemblable sans plus. Qui plus est, même si cette hypothèse se révélait exacte par la suite, il est impossible pour autant d'affirmer sur une seule trouvaille que par extraordinaire elle corresponde à la plus

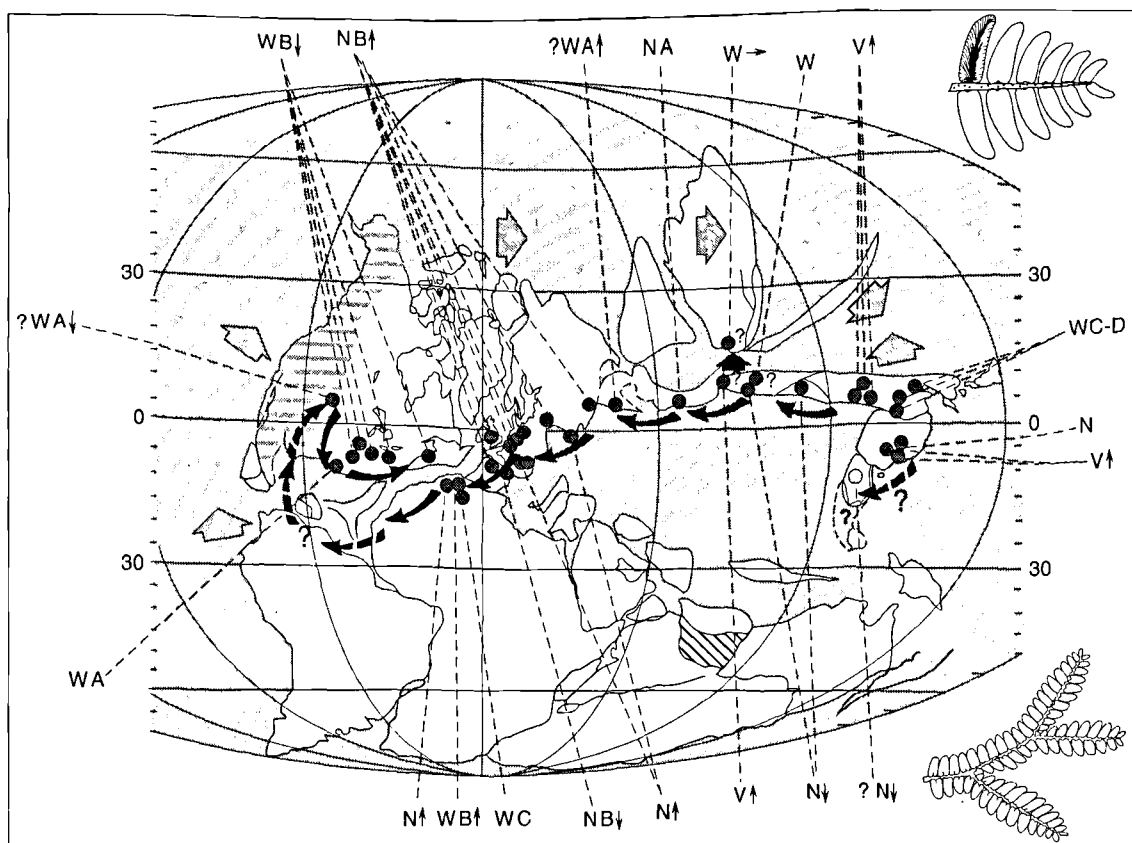


Fig. 8. — Distribution générale des premières occurrences du genre *Pariopteris* Gothan sur la configuration paléogéographique proposée par Laveine *et al.*, 2000 pour la période Namurien supérieur/Westphalien inférieur, approximativement. Grosses flèches: sens de déplacement des blocs continentaux; flèches noires: chronologie de l'expansion géographique du genre *Pariopteris*: V, Viséen; N, Namurien; W, Westphalien; NB↑, Namurien B supérieur. Le contour des blocs est tiré de Scotese et McKerrow (1990); (d'après Laveine *et al.*, 2000).

Fig. 8. — General distribution of the first occurrences of the genus *Pariopteris* Gothan on the palaeogeographical reconstruction proposed by Laveine *et al.* 2000 for approximately late Namurian/early Westphalian time. Large arrows: direction of plate motions; black arrows: chronology of the palaeogeographic expansion of the genus *Pariopteris* V, Viséan; N, Namurian; W, Westphalian; NB↑, late Namurian B; contours of land masses taken from Scotese and McKerrow (1990); (from Laveine *et al.*, 2000).

ancienne occurrence significative du taxon en Thaïlande. Si le contact terrestre entre bloc indochinois et bloc Chine du Sud est maintenant avéré, il reste donc toutefois impossible pour l'instant de préciser si le genre *Pariopteris* s'est progressivement étendu vers le sud à partir de la Chine du Sud, ou si au contraire il est apparu plus tôt en Thaïlande et s'est ensuite progressivement propagé vers le nord et l'ouest sur les blocs continentaux situés en bordure nord de la Palaeotethys. La réponse sur ce point ne pourra venir que de la multiplication de récoltes bien datées sur le bloc indochinois afin de cerner au plus près l'âge précis de première occurrence sur ce bloc, et pouvoir ensuite choisir entre les deux termes de l'alternative.

#### IV. — QUELQUES COMMENTAIRES ANNEXES

L'étude de la distribution globale du genre *Pariopteris* et des implications qui en découlent au plan paléogéographique sont non seulement intéressantes en elles-mêmes, mais aussi parce qu'elles permettent d'éclaircir quelques points, ou plus généraux, ou connexes.

#### 1) Le niveau taxonomique approprié à des fins d'analyse paléogéographique

Il est couramment mentionné dans divers ouvrages que le niveau spécifique est le seul qui corresponde à une entité naturelle, et que c'est donc seulement à ce niveau que des comparaisons peuvent être valablement entreprises pour des études biologiques précises. Une telle affirmation est manifestement tout à fait justifiée dans de nombreux domaines, par exemple pour les analyses écologiques. Toutefois la question est beaucoup plus complexe dès que l'on s'adresse au registre fossile (voir par exemple Chaloner et Greber, 1988). L'affirmation précédente reste toujours aussi valable par exemple pour des analyses paléocécologiques. Toutefois, et notamment pour des analyses paléogéographiques, il convient de ne pas oublier que le processus de spéciation géographique est couramment invoqué pour expliquer la différenciation de nouvelles espèces. En conséquence, et notamment quand l'expansion géographique d'un taxon s'est déroulée sur plusieurs millions d'années, et en l'occurrence pour *Pariopteris* sur 10 à 15 millions d'années (du Viséen supérieur au Westphalien inférieur), on ne peut exclure que l'écoulement du temps et les distances croissantes dans la distribution géographique n'aient

pas induit un certain degré de spéciation géographique qui aurait pu entraîner des différences légères dans les caractères du taxon. Pour des plantes fossiles, ces changements éventuels ne peuvent être appréciés que par d'éventuelles modifications morphologiques du type de fossiles communément récoltés. Pour *Paripteris* ces éventuelles modifications ne pourront donc s'apprécier principalement qu'au niveau de la forme et de la nervation des pinnules. Mais à un degré aussi restreint de possibilité d'analyse, de nombreux facteurs sont susceptibles d'être intervenus, soit de manière isolée, soit en interférant les uns avec les autres, sans que le paléobotaniste puisse déchiffrer clairement les processus impliqués. Ces changements sont-ils dus à des modifications génétiques, ou ne sont-ils dus qu'à des variations des conditions de l'environnement local et sont-ils potentiellement réversibles? De plus, selon que le paléobotaniste est un "splitter" (c'est-à-dire quelqu'un ayant une tendance excessive à multiplier les espèces au sein d'un genre sur des caractères parfois ténus ou quelque peu subjectifs) ou un "lumper" (c'est-à-dire quelqu'un répugnant peut-être de manière excessive à scinder un genre en de trop nombreuses espèces), le nombre des espèces reconnues au sein d'un genre peut grandement varier. Il est clair qu'il sera impossible d'arriver à un consensus en ce domaine (pas plus au plan fossile que pour l'actuel). Pour toutes ces raisons: possibilité d'une certaine spéciation géographique, et divergences taxonomiques au niveau spécifique, il apparaît que c'est au niveau générique que se situe la plus grande fiabilité pour les analyses paléogéographiques. Pour ce qui concerne *Paripteris* par exemple, du fait des caractères si particuliers résultant du mode d'architecture pseudo-penné de la fronde, et même si les déterminations spécifiques peuvent apparaître contestables d'un auteur à l'autre, il n'en reste pas moins qu'une espèce de *Paripteris* ne peut être issue que d'une autre espèce de *Paripteris*. En ce sens le genre *Paripteris* est un taxon "naturel" parfaitement circonscrit. Par conséquent, il est possible d'affirmer que la distribution globale du genre *Paripteris* apparaît comme tout à fait significative pour les interprétations paléogéographiques du Carbonifère. Toute reconstitution paléogéographique pour le Carbonifère ne peut dorénavant faire abstraction des contraintes imposées par l'extension géographique, **par voie terrestre**, du genre *Paripteris*.

## 2) Quelques précisions terminologiques

### a) Le terme "microcontinents"

Les termes microcontinents, ou aires microcontinentales sont assez couramment employés dans certaines publications traitant de paléogéographie et/ou de paléobiogéographie. Cette utilisation est parfois liée à la présence dans les assemblages de taxons endémiques. Il semble utile d'apporter quelques précisions à ce sujet.

Les termes microcontinents (ou blocs, ou masses continentales, et autres équivalents) ne peuvent être valablement utilisés que si ces masses étaient séparées des autres par des espaces "océaniques". Ces espaces océaniques représentaient des barrières qui ne pouvaient être modifiées de manière significative par les variations approximatives d'ordre eustatique ( $\pm 200$  m) du niveau de la mer. Ces barrières océaniques ne pouvaient donc être supprimées que par des jonctions continentales résultant des déplacements des plaques. Sinon, si la moindre terre quelque peu élevée isolée **temporairement** par une mer peu profonde suite à une

transgression peut être désignée par le terme de microcontinent, il est clair dans ce cas que la paléobotanique doit abandonner toute prétention à intervenir dans le débat paléogéographique. De telles mers peu profondes peuvent avoir certes momentanément représenté des barrières pour l'extension géographique de plantes se propageant par voie terrestre. Toutefois, ces aires temporairement submergées par des "mers épicontinentales" appartiennent néanmoins au domaine terrestre. L'extension des organismes terrestres était par conséquent possible pendant les périodes de bas niveau marin.

La corrélation fréquente entre les termes "microcontinents" et la présence de "formes endémiques" appelle aussi un court commentaire. Il a été maintes fois mentionné (par exemple Laveine *et al.*, 1989) que c'étaient les taxons bien circonscrits taxonomiquement et présents sur plusieurs masses continentales qui étaient susceptibles d'apporter des arguments à des fins paléogéographiques. En revanche, se focaliser strictement sur les taxons endémiques ne peut que laisser la porte ouverte à toutes les interprétations subjectives. Par exemple dans la grande majorité des cas (sauf parfois dans les cas de révision synthétique d'un groupe complet) toute "nouvelle" espèce décrite est par définition et au moins momentanément une forme endémique. Si le paléobotaniste est un "splitter", cela risque d'accroître sérieusement le nombre de microcontinents! De plus les exemples sont innombrables dans la végétation actuelle de taxons endémiques compte tenu de contraintes écologiques et se trouvant néanmoins dans des régions en connexion terrestre.

Qui plus est il faut relever que la notion d'endémisme est largement tributaire de l'intervalle de temps pris en considération. Si l'on prend la distribution du genre *Paripteris*, ce dernier était, au Viséen supérieur, endémique aux blocs chinois (et peut-être indochinois).

### b) Les expressions "connexions continentales", "saturation des blocs", "discontinuités géographiques"

Ces expressions méritent aussi quelques précisions. Pour un paléobotaniste la connexion entre deux blocs continentaux (et par conséquent la suppression de la discontinuité géographique correspondante) est établie dès que ces blocs sont au contact, et par conséquent dès qu'existe une possibilité d'extension par voie terrestre pour les plantes. Par conséquent, la datation d'une connexion terrestre correspond au moment où les plantes pouvaient passer. Cela ne signifie pas que la convergence du déplacement des blocs n'ait pas pu durer encore pendant quelques dizaines de millions d'années.

Inversement, certains tectoniciciens et géophysiciens semblent plus enclins à considérer que la saturation correspond à l'arrêt du déplacement des blocs dans la logique en cours. La datation de la saturation correspond alors à la datation des derniers plis engendrés, ou des déformations compressives associées. Cette différence d'interprétation peut évidemment conduire à des différences importantes dans l'estimation de l'âge de la jonction. Dans une telle interprétation, on peut considérer que le continent indien n'est pas encore de nos jours suturé à l'Asie. C'est la raison pour laquelle Laveine *et al.* (1992) ont préféré mentionner que les blocs Chine du Sud et Chine du Nord **étaient au contact** au moins dès le Carbonifère inférieur (et peut-être même un peu auparavant). Cela n'exclut pas que le déplacement et le raccourcissement entre les blocs Chine du Sud et Chine du

Nord aient pu durer jusqu'à la fin du Trias par exemple. Mais ceci est hors du domaine d'intervention de la paléobotanique.

### 3) Les limites de certains arguments paléomagnétiques

Mattauer *et al.* (1999) ont récemment proposé un modèle en 3D de la collision Inde-Asie, dans laquelle il apparaît que le contact initial entre (Grande) Inde et Asie est daté à - 55 millions d'années. La poursuite du déplacement et la collision ont entraîné la disparition par subduction continentale de la partie nord de la (Grande) Inde sur une distance N-S d'environ 1200 km et corrélativement aussi un raccourcissement crustal de l'Asie centrale d'à peu près 1000 km. Par conséquent deux localités actuelles relativement proches mais appartenant initialement chacune à l'un de ces blocs ont pu être séparées il y a 50 millions d'années par un espace continental large de 2000 km, et non pas par un espace océanique. Par voie de conséquence on peut en inférer qu'une différence significative, fondée sur des données paléomagnétiques, en ce qui concerne les positions en latitude de localités situées sur des blocs distincts ne signifie pas que la distance calculée corresponde nécessairement à un espace océanique. Cela a pu être un espace continental qui aurait disparu par subduction continentale et raccourcissement. Par conséquent les résultats en paléolatitudes fondés sur le paléomagnétisme sont loin d'être décisifs quant au type de "discontinuité géographique" impliqué.

## V. — CONCLUSIONS

L'analyse de la distribution du genre *Paripteris* a permis de confirmer l'importance des données paléobotaniques à des fins paléogéographiques. Toutefois elle a aussi montré qu'un certain nombre d'impératifs sont à respecter. Il convient tout d'abord de bien faire la distinction (ce n'est malheureusement pas toujours le cas au vu de certaines publications) entre paléoécologie et paléophytogéographie d'une part, et paléogéographie d'autre part. Dans tous les cas, toute conclusion significative dépend fondamentalement d'une approche taxonomique minutieuse. Il apparaît en outre que l'intérêt paléogéographique des plantes fossiles ne peut être estimé que par une analyse au cas par cas de leur distribution globale et de l'analyse de l'âge des premières occurrences dans toutes les régions concernées, permettant d'en inférer le mode de dispersion. Cela implique que des études

taxonomiques et biostratigraphiques précises aient été préalablement menées dans ces régions, ce qui n'est pas une mince affaire. On ne répétera donc jamais assez que des études taxonomiques et biostratigraphiques précises dans toutes les régions possibles sont le préalable absolu à toute approche synthétique en paléontologie, quel que soit le but recherché. L'accent a été mis ici particulièrement sur l'intérêt des données paléobotaniques, il ne faut néanmoins pas perdre de vue que la science ne peut réellement progresser qu'au travers d'une approche pluridisciplinaire. Si la paléobotanique permet de matérialiser et de dater le début du contact entre deux blocs par l'utilisation combinée de "fossiles-guides paléogéographiques" et de "fossiles-guides biostratigraphiques", elle ne peut par exemple estimer l'extension géographique originelle de ces blocs avant collision et éventuelle consommation partielle par subduction continentale. De telles données ne peuvent venir que des analyses tectoniques, sédimentologiques et paléomagnétiques. Il est donc clair que des progrès substantiels en paléogéographie ne peuvent venir que d'une approche multidisciplinaire, dans laquelle la paléobotanique est partie prenante. On peut d'ailleurs souligner que pour les temps carbonifères, compte tenu du faible développement des Vertébrés tétrapodes, les taxons de Ptéridospermées pour lesquels un mode de dispersion strictement par voie terrestre pourra être mis en évidence représentent probablement les seuls organismes permettant d'attester de la connexion terrestre entre blocs continentaux. Par conséquent ces taxons sont les seuls au Carbonifère qui peuvent prétendre à dépasser le cadre restreint de la paléophytogéographie (ou paléobiogéographie au sens large) et atteindre à une réelle pertinence paléogéographique.

Remerciements. — Nous remercions tout particulièrement Madame Régine Netter, technicienne-documentaliste du laboratoire (C.N.R.S.-Université de Lille UMR 8014 "Paléontologie et Paléogéographie du Paléozoïque") pour son aide dans la réalisation des figures du texte. Nous remercions également Monsieur Song Zhiyao, photographe au "Nanjing Institute of Geology and Palaeontology", et Monsieur Jean Carpentier, photographe à l'UFR des Sciences de la Terre de l'Université des Sciences et Technologies de Lille, pour le soin qu'ils ont apporté à la réalisation de photographies de qualité. Nous remercions aussi Monsieur Gérard Ponchel, Ingénieur de recherche C.N.R.S. au laboratoire (C.N.R.S.-Université de Lille UMR 8014 "Paléontologie et Paléogéographie du Paléozoïque") pour sa contribution pour les observations au MEB. Nous sommes aussi redevables au Dr. Paul C. Lyons (U.S. Geological Survey) qui a bien voulu vérifier la teneur du résumé anglais.

## BIBLIOGRAPHIE

- BRONGNIART A. (1822). — Sur la classification et la distribution des végétaux fossiles. *Mémoires Museum Histoire Naturelle*, Paris, 8: 1-91.
- CHALONER W.G. & CREBER G.T. (1988). — Fossil plants as indicators of late Palaeozoic plate positions. In Gondwana and Tethys, Audley-Charles M.G. & Hallam A. Ed. *Geological Society Special Publication* 37: 201-210.
- CLEAL C.J., SHUTE C.H. & ZODROW E.L. (1990). — A revised taxonomy for Palaeozoic Neuropterid foliage. *Taxon*, 39, 3: 486-492.
- CREMER L. (1893). — Über die Fossilen Farnen des Westfälischen Carbons und ihre bedeutung für eine Gliederung des letzteren. *Inaug. Dissert.*, Marburg: 49 p.
- DARWIN C. (1857). — On the Action of Sea-water on the Germination of Seeds. *Journal Linnean Society* 1 (Bot.): 130-140.
- DARWIN C. (1872). — On the origin of species by means of the natural selection. Murray J. Ed., London, 6th ed.: 1-21; 458 p. (1st edition: 1859).
- FOSTER C. (1996). — The last word on the Phanerozoic timescale. *Ausgeo News*, 32: 12.
- GOGANOVA L., LAVEINE J.P., LEMOIGNE Y. & DURANTE M. (1993). — Frond architecture, its importance for paleobiogeography and evolution: the example of *Cardioneuropteris* nov. gen. from the Visean of Kazakhstan. *C.R. 12e Congr. Intern. Strat. Géol. Carbonifère*, Buenos Aires 1991, 2: 73-88.

- GOTHAN W. (1941). — Paläobotanische Mitteilungen. 5. Die Unterteilung der karbonischen Neuropteriden. *Palaeont. Z.*, Berlin, 22, 3/4: 421-428.
- JONGMANS W.J. (1928). — Stratigraphie van het Karboon in het Algemeen en van Limburg in het Bijzonder. *Meded. Geol. Bureau*, Heerlen, 6: 1-25, 45-50.
- LAVEINE J.P. (1997). — Synthetic analysis of the Neuropterids. Their interest for the decipherment of Carboniferous palaeogeography. *Rev. Palaeobot. Palyn.*, 95, 1-4: 155-189.
- LAVEINE J.P., ZHANG S. & LEMOIGNE Y. (1989). — Global paleobotany, as exemplified by some Upper Carboniferous pteridosperms. *Bull. Soc. belge Géol.*, 98-2: 115-125.
- LAVEINE J.P., LEMOIGNE Y. & ZHANG S. (1992). — Pangaea, Palaeotethys and *Paripteris*. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 314, 2: 1103-1110
- LAVEINE J.P., LEMOIGNE Y. & ZHANG S. (1993a). — General characteristics and paleobiogeography of the Parispermaceae (genera *Paripteris* Gothan and *Linopteris* Presl), Pteridosperms from the Carboniferous. *Palaeontographica*, Stuttgart, B, 230: 81-139.
- LAVEINE J.P., RATANASTHIEN B. & SITHIRACH S. (1993b). — The Carboniferous flora of northeastern Thailand: its paleogeographic importance. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 317(2): 279-285.
- LAVEINE J.P., ZHANG S. & LEMOIGNE Y. (2000). — Palaeophytogeography and Palaeogeography, on the basis of examples from the Carboniferous. *Revue de Paléobiologie*, Genève, 19(2): 409-425.
- LIN J., FULLER M. & ZHANG W. (1985). — Preliminary Phanerozoic polar wander paths for the North and South China blocks. *Nature*, 313: 444-449.
- MARTINS C. (1858). — Expériences sur la persistance de la vitalité des graines flottant à la surface de la mer. *Mémoires de l'Académie des sciences et lettres de Montpellier*, section Sciences, 4: 75-89.
- MATTAUER M., MATTE P., MALAVIEILLE J., TAPPONNIER P., MALUSKI H., XU Z., LU Y. & TANG Y. (1985). — Tectonics of the Qinling Belt: build-up and evolution of eastern Asia. *Nature*, 317: 496-500.
- MATTAUER M., MATTE P. & OLIVET J.-L. (1999). — A 3D model of the India-Asia collision at plate scale and evolution of eastern Asia. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 328: 499-508.
- McELHINNY M.W., EMBLETON B.J.J., MA X.H. & ZHANG Z.K. (1981). — Fragmentation of Asia in the Permian. *Nature*, 293: 212-216.
- ODIN, G.S. (1994). — Geological Time Scale. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 318 (2): 59-71.
- SCOTESE C.R. & MCKERROW W.S. (1990). — Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography. Revised World maps and introduction. *Geol. Soc. Mem.*, London, 12: 1-21.
- STERNBERG K. Von (1820-1838). — Versuch einer Geognostisch-botanischen Darstellung der Flora der Vorwelt. Brenck C.E. Ed., Regensburg, 1(1): 1-24, 1(2): 1-33, 1(3): 1-40, 1(4): 1-48; Spurny J. Ed., Prag, 2(5-6): 1-80, 2(7-8): 81-220.
- WNUK C. (1996). — The development of floristic provinciality during the Middle and Late Paleozoic. *Rev. Palaeobot. Palyn.*, 90(1-2): 5-40.
- ZEILLER R. (1879). — Végétaux fossiles du Terrain Houiller. *Explication Carte géologique de la France*, 4(2): 1-185.
- ZEILLER R. (1886-1888). — Bassin houiller de Valenciennes, description de la flore fossile. *Etudes Gîtes min. France*, Paris: 731 p.
- ZEILLER R. (1900). — Eléments de paléobotanique. Carré G. & Naud C. Ed., Paris: 421 p.



EXPLICATIONS DES PLANCHES XI à XIV.

Sauf indication contraire les spécimens sont figurés en grandeur naturelle. Les spécimens chinois sont conservés dans les collections de l'Institut de Géologie et Paléontologie de Nanjing, Academia Sinica (NIGPAS). Tous les autres sauf deux (Pl. XIII, fig. 1, Musée de Géologie de Lille, et Pl. XIII, fig. 2, Centre Historique Minier de Lewarde) sont conservés dans les collections du Laboratoire de Paléobotanique de l'Université de Lille (Abréviations: HBNPC: Houillères du Bassin Houiller du Nord-Pas-de-Calais; HBL: Houillères du Bassin de Lorraine; LLP: Laboratoire de Paléobotanique de Lille).

Except as otherwise stated, the specimens are figured natural size. The Chinese specimens are stored in the collections of the Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Academia Sinica (NIGPAS). All the others but two (Pl. XIII, fig. 1, Museum of Geology of Lille, and Pl. XIII, fig. 2, Historical Mining Centre of Lewarde) are stored in the collections of the Laboratory of Palaeobotany of the University of Lille (Abbreviations: HBNPC: North-Pas-de-Calais coal field; HBL: Saar-Lorraine coal field; LLP: Lille's Laboratory of Palaeobotany).

PLANCHE XI.

Fig. 1. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Pinnules encore attachées au rachis.

HBNPC, Aniche, Fosse Dechy, veine n° 7. Assise d'Anzin, partie supérieure du Faisceau de Meunière (Westphalien B). N° d'enregistrement: HBNPC 648703.

Fig. 1. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Pinnules still attached to the rachis.

Fig. 2. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *linguaefolia* (P. Bertrand). Pinnule dispersée.

HBNPC, Valenciennes, Fosse Cuvinot, 4e série Levant à 250 m, 22e veine. Assise de Bruay, partie inférieure du Faisceau d'Ernestine (Westphalien C). N° d'enregistrement: HBNPC 649104.

Fig. 2. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *linguaefolia* (P. Bertrand). Single pinnule.

Fig. 3. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *pseudogigantea* (H. Potonié). Pinnules dispersées.

HBNPC, Bruay, Fosse n° 6, 8e veine. Assise de Bruay, partie supérieure du Faisceau d'Ernestine (Westphalien C). N° d'enregistrement: HBNPC 649503.

Fig. 3. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *pseudogigantea* (H. Potonié). Dispersed pinnules.

Fig. 4. — *Hexagonocarpus* sp., graine de *Linopteris* Presl (et aussi de *Paripteris* Gothan). Spécimen comprimé latéralement montrant quatre des six carènes principales, avec deux rides plus faibles entre les carènes principales.

HBNPC, Lens-Liévin, Fosse n° 11, près de veine Alfred. Assise de Bruay, partie moyenne du Faisceau de Du Souich (Westphalien D). N° d'enregistrement: HBNPC 648317.

Fig. 4. — *Hexagonocarpus* sp., seed of *Linopteris* Presl (and also of *Paripteris* Gothan). Laterally compressed specimen showing four of the six main ribs, with two fainter ribs in between the main ones.

Fig. 5. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *linguaenova* (P. Bertrand). Pinnules dispersées.

HBL, Puits de Sainte Fontaine, veine W. Assise de Sulzbach, partie inférieure du Faisceau de Neunkirchen (Westphalien C). N° d'enregistrement: HBL 646404.

Fig. 5. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *linguaenova* (P. Bertrand). Dispersed pinnules.

Fig. 6. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Pinnules dispersées et, associé (flèche), un organe mâle de type *Potonia* Zeiller.

Chine du Sud, Province du Guangdong, localité: Xiling school (40 km au nord de Guangzhou=Canton). Formation Tseishui, partie moyenne (Viséen supérieur). D'après une diapositive couleurs, LLP CHI 88 774.

Fig. 6. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Dispersed pinnules, and an associated male organ (arrow) of *Potonia* Zeiller type.

Fig. 7. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Pinnule dispersée.

Chine du Sud, Province du Guangdong, localité: Jiu Hu (42 km au nord de Guangzhou=Canton). Formation Tseishui, partie moyenne (Viséen supérieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB1-6800.

Fig. 7. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Single pinnule.

Fig. 8. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Pinnules dispersées.

Chine du Sud-Est, Province du Fujian, localité: Pijiao. Formation Lindi, partie moyenne (Viséen supérieur). D'après une diapositive couleurs, LLP CHI 93 189.

Fig. 8. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Dispersed pinnules.

- Fig. 9. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Pinnules encore attachées au rachis.  
Chine du Nord, Région Autonome Hui du Ningxia, districts de Zhongning et de Zhongwei, localité C 39. Formation Jingyuan, partie supérieure (Namurien supérieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB1-6783.
- Fig. 9.- *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Still attached pinnules.
- Fig. 10. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *lunata* (D. White). Pinnules encore attachées au rachis.  
Chine du Nord, Région Autonome de Mongolie Intérieure, bannière de Alxa Zuoqi, localité: Hulstai, horizon 10. Formation Yangfoukou, partie inférieure (Westphalien A moyen). N° d'enregistrement: NIGPAS PB 19711.
- Fig. 10. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *lunata* (D. White). Still attached pinnules.
- Fig. 11. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *gigantea*. Pinnule dispersée.  
Chine du Nord, Région Autonome de Mongolie Intérieure, bannière de Alxa Zuoqi, localité: Hulstai, horizon 12. Formation Yangfoukou, partie moyenne (Westphalien B). N° d'enregistrement: NIGPAS PB 19718.
- Fig. 11.- *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *gigantea*. Single pinnule.
- Fig. 12. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *gigantea*. Pinnule dispersée.  
Chine du Nord-Ouest, Province du Qinghai, localité Hoit Taria 4. Formation Keluke, partie inférieure (Namurien A supérieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB 19555.
- Fig. 12. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *gigantea*. Single pinnule.
- Fig. 13. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *pseudogigantea* (H. Potonié). Pinnule dispersée.  
Chine du Nord, Région Autonome Hui du Ningxia, districts de Zhongning et de Zhongwei, localité E 7. Formation Jingyuan, partie supérieure (Namurien supérieur). N° d'enregistrement: NB 1196.
- Fig. 13. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *pseudogigantea* (H. Potonié). Single pinnule.
- Fig. 14. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *otozamioides* (Sze & Lee). Pinnule dispersée.  
Chine du Nord-Ouest, Région Autonome Ouïgoure du Xinjiang, district de Hotan, localité Lop 2. Formation Kalawuyi, partie inférieure (Namurien B inférieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB 19404.
- Fig. 14. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *otozamioides* (Sze & Lee). Single pinnule.
- Fig. 15. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *otozamioides* (Sze & Lee). Pinnule dispersée.  
Chine du Nord-Ouest, Région Autonome Ouïgoure du Xinjiang, district de Hotan, localité Lop 2. Formation Kalawuyi, partie inférieure (Namurien B inférieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB 19405.
- Fig. 15. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *otozamioides* (Sze & Lee). Single pinnule.
- Fig. 16. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Pinnules dispersées.  
Chine du Nord-Ouest, Région Autonome Ouïgoure du Xinjiang, district de Hotan, localité Langru 2. Formation Kalawuyi, partie inférieure (Namurien B inférieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB 19391.
- Fig. 16. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Dispersed pinnules.

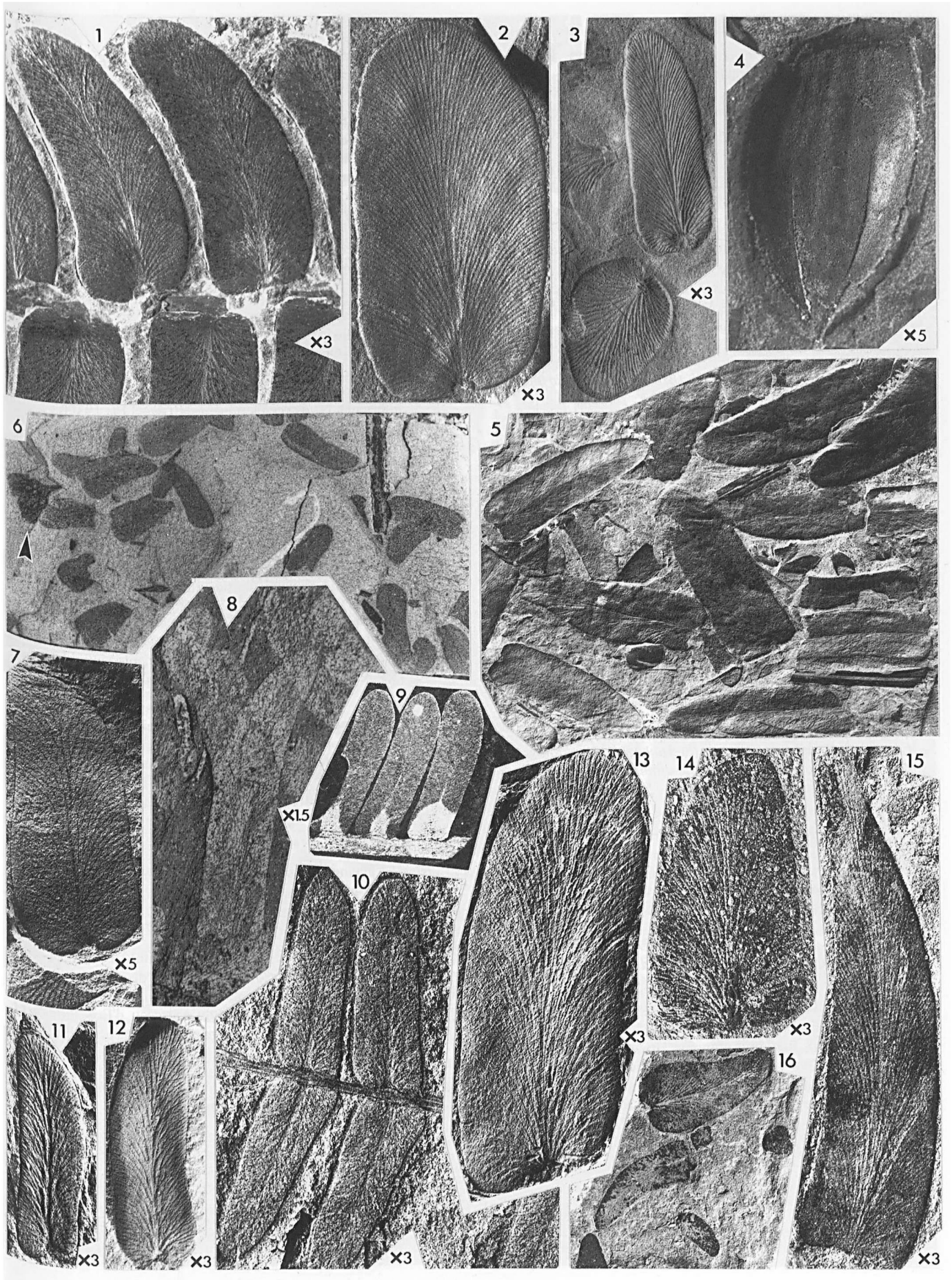


PLANCHE XII.

Fig. 1. — *Laveineopteris rarinervis* (Bunbury). Penne de dernier ordre imparipinnée.  
HBNPC, Bruay, Fosse n° 6, étage 706, recoupage 583 à 87 m. Assise de Bruay, partie inférieure du Faisceau de Du Souich (Westphalien D). N° d'enregistrement: HBNPC 645658.

Fig. 1. — *Laveineopteris rarinervis* (Bunbury). *Imparipinnate ultimate pinna*.

Fig. 2. — *Laveineopteris loshii* (Brongniart). Penne de dernier ordre imparipinnée.  
HBNPC, Valenciennes, Fosse Haveluy, étage 220, 2e veine du Nord. Assise de Vicoigne, partie supérieure du Faisceau de Chandeleur (Westphalien A). N° d'enregistrement: HBNPC 643719.

Fig. 2. — *Laveineopteris loshii* (Brongniart). *Imparipinnate ultimate pinna*.

Fig. 3. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *abbreviata* (Stockmans). Penne de dernier ordre paripinnée.  
HBNPC, Aniche, Fosse Delloye, recoupage Sud S.3, passée à 722 m. Assise d'Anzin, partie supérieure du Faisceau de Meunière (Westphalien B). N° d'enregistrement: HBNPC 648718.

Fig. 3. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *abbreviata* (Stockmans). *Paripinnate ultimate pinna*.

Fig. 4. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *pseudogigantea* (H. Potonié). Pennes de dernier ordre paripinnées.  
Belgique, Fosse Grand Hornu, veine Payez. Assise du Flénu, partie inférieure de la Zone de Maurage (Westphalien C). N° d'enregistrement: BEL 640001.

Fig. 4. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *pseudogigantea* (H. Potonié). *Paripinnate ultimate pinnae*.

Fig. 5. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Terminaison de penne paripinnée.  
Chine du Sud, Province du Guangdong, localité: Jiu Hu (42 km au nord de Guangzhou=Canton). Formation Tseishui, partie moyenne (Viséen supérieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB1-6798.

Fig. 5. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. *Paripinnate ultimate pinna ending*.

Fig. 6. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Terminaison de penne paripinnée.  
Chine du Nord, Région Autonome Hui du Ningxia, districts de Zhongning et de Zhongwei, localité C 39. Formation Jingyuan, partie supérieure (Namurien supérieur). N° d'enregistrement: NIGPAS NB 1178.

Fig. 6. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. *Paripinnate ultimate pinna ending*.

Fig. 7. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *kaipingiana* (Sze). Terminaison de penne paripinnée.  
Chine du Nord, Région Autonome Hui du Ningxia, districts de Zhongning et de Zhongwei, localité F 27. Formation Jingyuan, partie inférieure (Namurien inférieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB1 6780.

Fig. 7. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *kaipingiana* (Sze). *Paripinnate ultimate pinna ending*.

Fig. 8. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Terminaison de penne paripinnée.  
Chine du Nord-Ouest, Région Autonome Ouïgoure du Xinjiang, district de Hotan, localité Langru 2. Formation Kalawuyi, partie inférieure (Namurien B inférieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB 19390.

Fig. 8. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. *Paripinnate ultimate pinna ending*.

Fig. 9. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *otozamioides* (Sze & Lee). Terminaisons de pennes paripinnées.  
Chine du Nord-Ouest, Région Autonome Ouïgoure du Xinjiang, district de Hotan, localité Lop 2. Formation Kalawuyi, partie inférieure (Namurien B inférieur). D'après une diapositive couleurs, LLP CHI 94 31.

Fig. 9. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *otozamioides* (Sze & Lee). *Paripinnate ultimate pinna endings*.

Fig. 10. — *Laveineopteris tenuifolia* (Schlotheim). Extrémité de penne bipinnée montrant toutes les transitions entre pinnules latérales et pennes de dernier ordre.  
HBNPC, Bruay, Fosse n° 5, toit de 16e veine Levant. Assise de Bruay, partie inférieure du Faisceau d'Ernestine (Westphalien C). N° d'enregistrement: HBNPC 646628.

Fig. 10. — *Laveineopteris tenuifolia* (Schlotheim). *Bipinnate pinna ending showing all the transitions between lateral pinnules and ultimate pinnae*.

Fig. 11. — *Laveineopteris tenuifolia* (Schlotheim). Extrémités de pennes de dernier ordre et pinnules dispersées.  
HBNPC, Bruay, Fosse n° 1, toit de 16e veine Levant. Assise de Bruay, partie inférieure du Faisceau d'Ernestine (Westphalien C). N° d'enregistrement: HBNPC 646629.

Fig. 11. — *Laveineopteris tenuifolia* (Schlotheim). *Dispersed ultimate pinna endings and pinnules*.



PLANCHE XIII.

- Fig. 1. — *Linopteris brongniartii* (Gutbier) f. *subbrongniartii* (Grand'Eury). Fragment de fronde de type pseudo-penné attestant de l'absence de segmentation limbair dans ce groupe de plantes fossiles.  
HBNPC, Lens, Fosse n° 2, veine Théodore. Assise de Bruay, partie supérieure du Faisceau de Du Souich (Westphalien D). N° d'enregistrement: MHL N834.
- Fig. 1. — *Linopteris brongniartii* (Gutbier) f. *subbrongniartii* (Grand'Eury). Frond fragment of pseudo-pinnate type attesting to the lack of laminate segmentation for this group of fossil plants.
- Fig. 2. — *Linopteris brongniartii* (Gutbier) f. *subbrongniartii* (Grand'Eury). Fragment de fronde de type pseudo-penné attestant de l'absence de segmentation limbair dans ce groupe de plantes fossiles.  
HBNPC, Méricourt, Fosse n° 3 W, veine Saint Albert. Assise de Bruay, partie moyenne du Faisceau d'Ernestine (Westphalien C). N° d'enregistrement: CHM 1.
- Fig. 2. — *Linopteris brongniartii* (Gutbier) f. *subbrongniartii* (Grand'Eury). Frond fragment of pseudo-pinnate type attesting to the lack of laminate segmentation for this group of fossil plants.
- Fig. 3. — *Linopteris brongniartii* (Gutbier) f. *subbrongniartii* (Grand'Eury). Pinnules montrant leur nervation réticulée.  
HBNPC, Béthune, Fosse n° 2, veine Saint-Jean-Baptiste. Assise de Bruay, partie inférieure du Faisceau de Du Souich (Westphalien D). N° d'enregistrement: HBNPC 648302.
- Fig. 3. — *Linopteris brongniartii* (Gutbier) f. *subbrongniartii* (Grand'Eury). Pinnules exhibiting their reticulate venation.
- Fig. 4. — *Linopteris brongniartii* (Gutbier) cf. f. *obliqua* (Bunbury). Extrémité de penne paripinnée.  
HBNPC, Bruay, Fosse n° 6, 8e veine. Assise de Bruay, partie supérieure du Faisceau d'Ernestine (Westphalien C). N° d'enregistrement: HBNPC 648105.
- Fig. 4. — *Linopteris brongniartii* (Gutbier) cf. f. *obliqua* (Bunbury). Paripinnate pinna ending.
- Fig. 5. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *pseudogigantea* (H. Potonié). Fragment de penne d'avant dernier ordre montrant des pinnules insérées sur tous les rachis.  
HBNPC, Bruay, origine indéterminée. N° d'enregistrement: HBNPC 649521.
- Fig. 5. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *pseudogigantea* (H. Potonié). Fragment of penultimate pinna exhibiting pinnules inserted on all of the rachises.
- Fig. 6. — *Hexagonocarpus* sp., graine de *Paripteris* Gothan (et aussi de *Linopteris* Presl). Moulage interne gréseux; 6a: vue de dessus montrant les six carènes; 6b: vue latérale montrant la forme générale oblongue.  
HBNPC, Ostricourt, Fosse n° 6, sans autre origine. Probablement Assise d'Anzin. N° d'enregistrement: HBNPC 649953.
- Fig. 6. — *Hexagonocarpus* sp., seed of *Paripteris* Gothan (and also of *Linopteris* Presl). Internal sandstone cast; 6a: apical view showing the six ribs; 6b: lateral view showing the general oblong outline.
- Fig. 7. — *Linopteris brongniartii* (Gutbier) cf. f. *obliqua* (Bunbury). Organe mâle de type *Potoniaea* Zeiller, comprimé latéralement.  
HBL, sans origine précise. Probablement Assise de La Houve (Westphalien D). N° d'enregistrement: HBL 647002.
- Fig. 7. — *Linopteris brongniartii* (Gutbier) cf. f. *obliqua* (Bunbury). Laterally compressed male organ of *Potoniaea* Zeiller type.

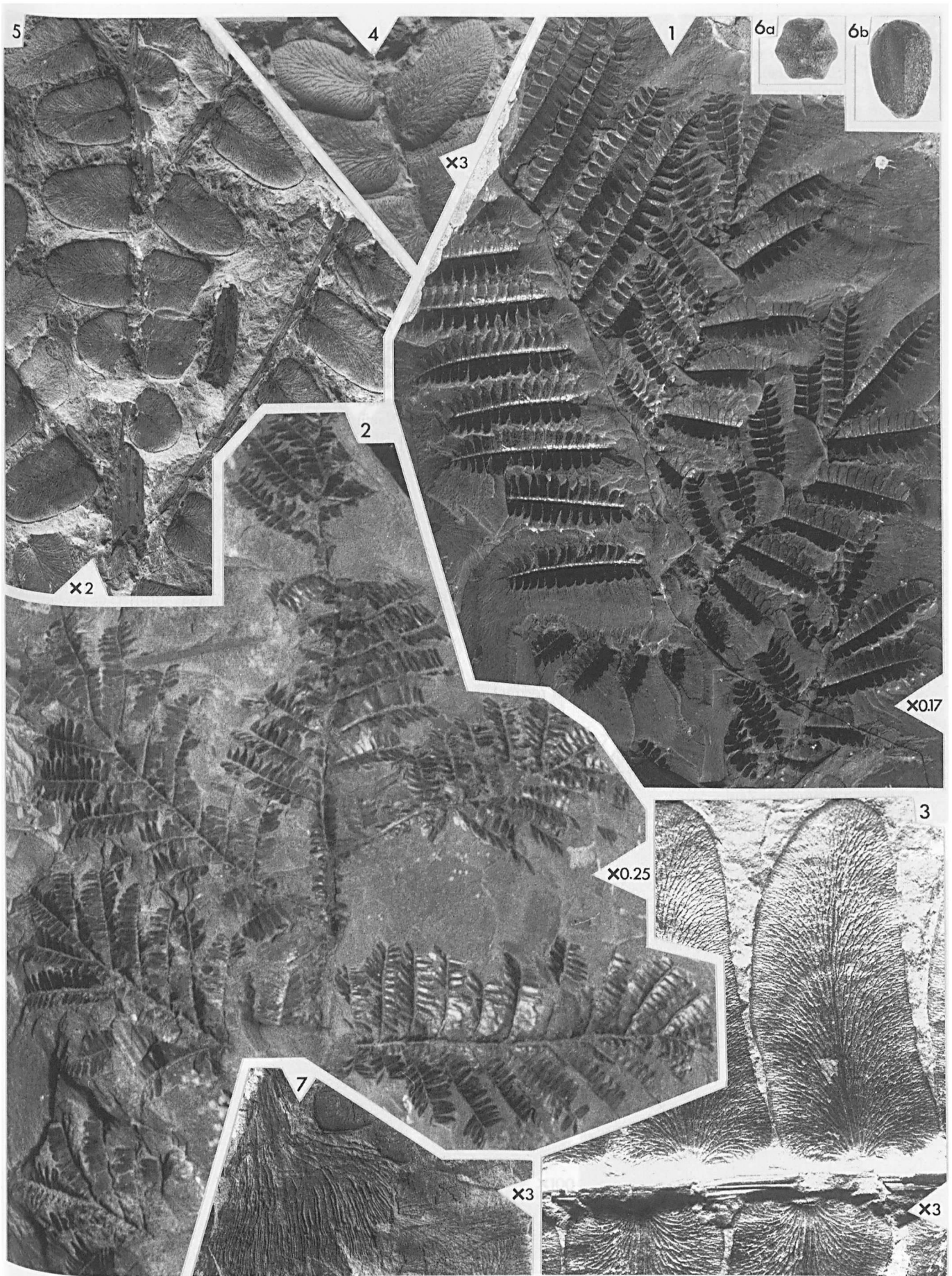
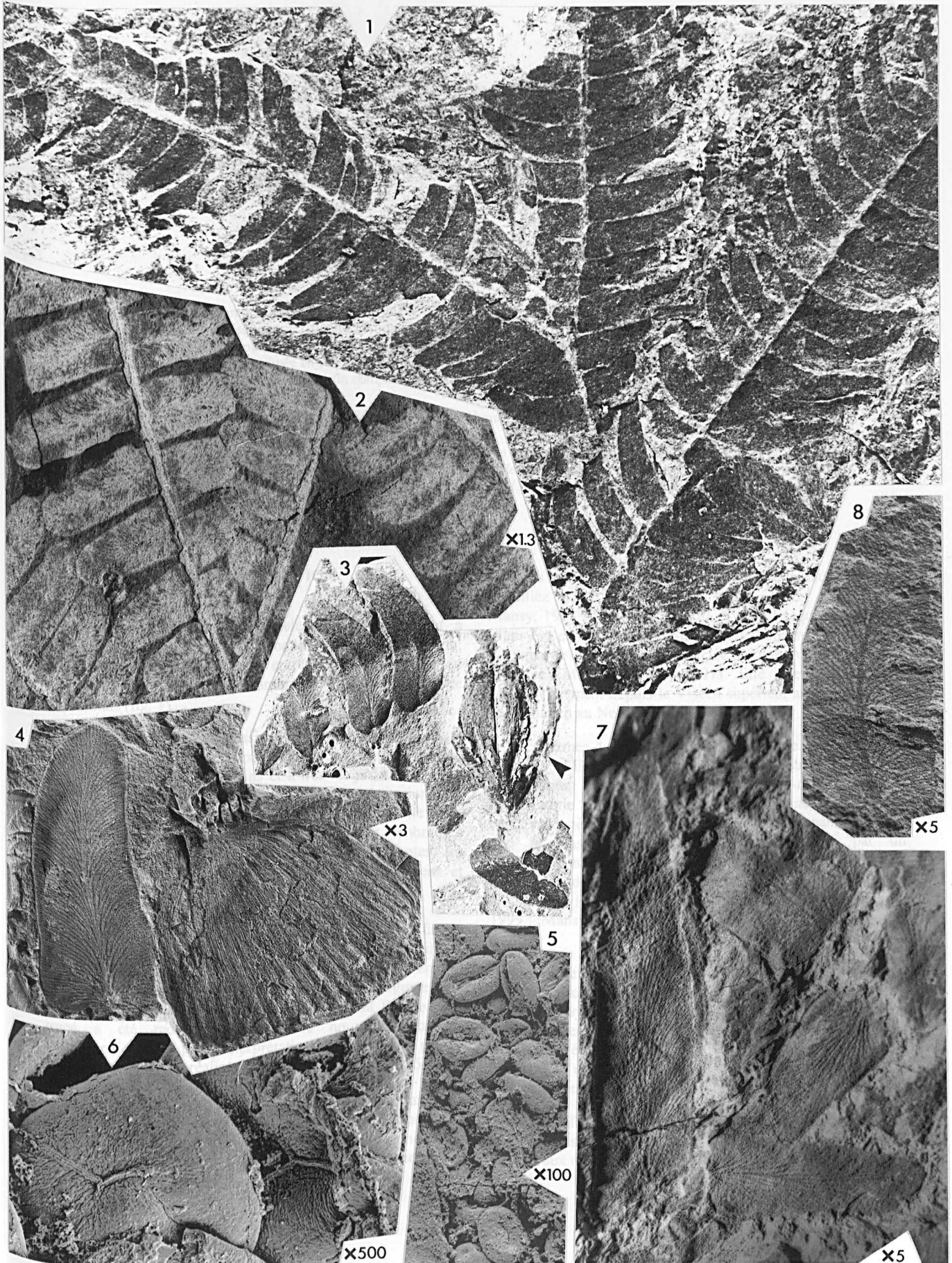


PLANCHE XIV.

- Fig. 1. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *otozamioides* (Sze & Lee). Fragment de fronde montrant le mode pseudo-penné de l'architecture de la fronde.  
Chine du Nord-Ouest, Région Autonome Ouïgoure du Xinjiang, district de Hotan, localité Lop 2. Formation Kalawuyi, partie inférieure (Namurien B inférieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB 19399.
- Fig. 1. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *otozamioides* (Sze & Lee). Frond fragment showing the pseudo-pinnate mode of frond architecture.
- Fig. 2. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *kaipingiana* (Sze). Fragment de fronde montrant le mode pseudo-penné de l'architecture de la fronde.  
Chine du Nord, Région Autonome Hui du Ningxia, districts de Zhongning et de Zhongwei, localité C 39. Formation Jingyuan, partie supérieure (Namurien supérieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB1 6782.
- Fig. 2. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *kaipingiana* (Sze). Frond fragment showing the pseudo-pinnate mode of frond architecture.
- Fig. 3. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Pinnules dispersées et, associée (flèche), une graine de type *Hexagonocarpus* Renault.  
Chine du Nord-Ouest, Région Autonome Ouïgoure du Xinjiang, district de Hotan, localité Langru 2. Formation Kalawuyi, partie inférieure (Namurien B inférieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB 19392.
- Fig. 3. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Dispersed pinnules and an associated seed (arrow) of *Hexagonocarpus* Renault type.
- Fig. 4. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *gigantea*. Pinnule dispersée et organe mâle de type *Potonia adiantiformis* Zeiller.  
Chine du Nord-Ouest, Province du Qinghai, localité Hoit Taria 4. Formation Keluke, partie inférieure (Namurien A supérieur). N° d'enregistrement: NIGPAS PB 19554.
- Fig. 4. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *gigantea*. Single pinnule and an associated male organ of *Potonia adiantiformis* Zeiller type.
- Fig. 5. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *gigantea*. Grains de pollen dégagés à la surface d'un organe mâle de type *Potonia adiantiformis* Zeiller, semblable à celui figuré en 4, même planche.  
Chine du Nord-Ouest, Province du Qinghai, localité Hoit Taria 4. Formation Keluke, partie inférieure (Namurien A supérieur). N° d'enregistrement: LLP CHI 13
- Fig. 5. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) cf. f. *gigantea*. Pollen grains visible at the outer surface of a male organ of *Potonia adiantiformis* Zeiller type, similar to the one illustrated in fig. 4, same plate.
- Fig. 6. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Grains de pollen fortement agrandis montrant la marque de déhiscence à trois branches (marque trilète).  
Chine du Nord-Ouest, Province du Qinghai, localité Hoit Taria 4. Formation Keluke, partie inférieure (Namurien A supérieur). N° d'enregistrement: LLP CHI 13
- Fig. 6. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Enlarged pollen grains showing their dehiscence mark with three branches (trilete mark).
- Fig. 7. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Pinnules dispersées.  
Asie du Sud-Est, N-E de la Thaïlande, district de Loei, localité: Chiang Khan. Formation Wang Saphung, partie inférieure (probablement Namurien). N° d'enregistrement: LLP THA 38-44.
- Fig. 7. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Dispersed pinnules.
- Fig. 8. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Pinnule dispersée.  
Asie du Sud-Est, N-E de la Thaïlande, district de Loei, localité: Chiang Khan. Formation Wang Saphung, partie inférieure (probablement Namurien). N° d'enregistrement: LLP THA 38-50.
- Fig. 8. — *Paripteris gigantea* (Sternberg) f. *gigantea*. Single pinnule.



Ann. Soc. Géol. du Nord  
T. 10 (2<sup>me</sup> série), p. 125-136, Juillet 2003





## LA RÉACTIVATION DU SOCLE PALÉOZOÏQUE AU NORD OUEST DE LA FRANCE

### Palaeozoic reactivation in North-West France

par Jean-Louis MANSY (\*)

**Résumé.** — La dynamique du domaine Boulonnais- Artois (Nord ouest de la France) est contrôlée durant le Mésozoïque par les structures varisques préexistantes. Le front orogénique qui émerge au nord du Boulonnais a d'abord une orientation E-W près du Gris-Nez puis il s'oriente progressivement NW-SE. L'étude de profils sismiques montre une double inversion tectonique clairement exprimée en Artois. Compression finie westphalienne, puis extension permienne synchrone du dépôt des conglomérats de l'Artois enfin compression et inversion au Tertiaire.

**Abstract.** — *The geometry and dynamics of the Mesozoic basins of the Boulonnais area have been controlled by the distribution of pre-existing Variscan structures. The emergent Variscan frontal thrust faults are predominantly E-W oriented in southern England until mid-channel while in northern France they have a NW-SE orientation. In the Boulonnais extensional and contractional faults that controlled sedimentation in and inversion of the Mesozoic basin are examined in the light of new field and reprocessed gravity and seismic data to establish possible controls exerted by pre-existing Variscan structures.*

#### I. — INTRODUCTION

L'Ardenne, au sens de Gosselet (1888), appartient à l'ensemble Paléozoïque qui s'étend de la Manche au Rhin. Celui-ci affleure peu en France : entre la Meuse et l'Oise, en Avesnois (rive droite de la Sambre), en Artois et dans le Boulonnais (fig. 1).

Le Paléozoïque est aussi connu sous la couverture mésozoïque en raison de l'exploitation du Bassin Houiller. Celle-ci a duré près de 200 ans et a très tôt justifié un suivi scientifique approfondi conférant un caractère exceptionnel à cet objet. La limite méridionale de ce Bassin est une zone structuralement complexe, différenciée par de très nombreuses failles anastomosées, les unes purement chevauchantes, les autres associant en proportion variable chevauchement et décrochement.

Comprenant l'importance structurale de cette zone faillée connue de l'Irlande à la Ruhr, Gosselet (1888) a proposé de lui donner le nom de Faille du Midi, en généralisant l'emploi d'un nom qui désignait initialement un objet géologique bien localisé dans le Hainaut et dans le Nord de la France. Son tracé a été redéfini à partir de nouvelles données stratigraphiques et par l'interprétation de nombreux profils sismiques industriels réalisés dans les années 1980-1985.

Les observations de surface effectuées par une cartographie récente en Ardenne (cartes de Givet et Fumay) et dans le Boulonnais (carte de Marquise), ainsi qu'une étude précise des carrières en exploitation ont abouti à de nouveaux

modèles concernant l'évolution de la marge nord varisque (Meilliez *et al.*, 1991 ; Mansy *et al.*, 1995 ; Averbuch et Mansy, 1998 ; Lacquement *et al.*, 1999 ; Lacquement, 2000 ; Mansy *et al.*, sous presse). Ces observations suggèrent que la paléomarge dévonienne est affectée par une extension crustale modérée (Meilliez *et al.*, 1991). Elle a ensuite subi un raccourcissement depuis le Viséen supérieur au Sud jusqu'au Westphalien au Nord.

Les termes de « bassins » de Namur et de Dinant (Kaisin, 1936 ; Michot, 1980) doivent être aujourd'hui être abandonnés, puisque les terrains dévono-carbonifères de l'allochtone et du parautochtone appartiennent à la même entité paléogéographique. De plus, il est maintenant démontré que le Bassin Houiller n'est pas constitué par un « mégasynclinal » (Namur) mais par au moins deux unités structurales différentes, l'unité sommitale transitionnelle étant allochtone, l'autre basale autochtone (Lacquement *et al.*, 1999 ; Mansy et Lacquement, 2002).

La zone faillée qui longe le Bassin Houiller partage la région en deux parties appelées Parautochtone Brabançon au Nord et allochtone Ardennaise au Sud (Meilliez et Mansy, 1990 ; Mansy et Meilliez, 1993). Chacune d'elles renferme un substratum et une couverture, datés paléontologiquement. La présence d'écaillés au Nord de la Faille du Midi amène à proposer une distinction supplémentaire dans le Parautochtone. (Mansy *et al.*, 1999).

La Faille du Midi sensu stricto, n'est qu'une des composantes de la zone faillée qui sépare les deux domaines structuraux majeurs. (Mansy et Lacquement, 2002)

(\*) Université de Lille I, 59650 Villeneuve d'Ascq

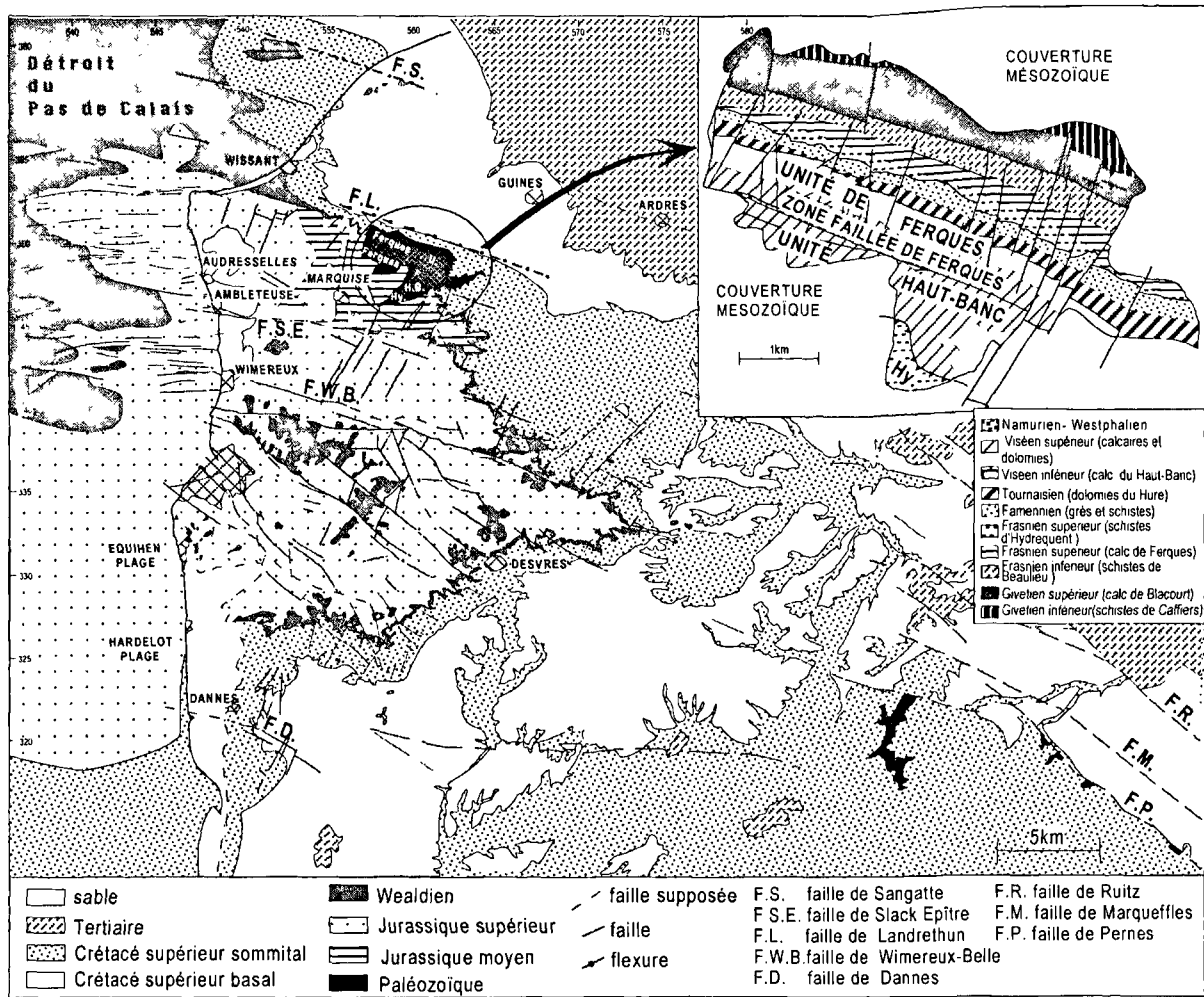


Fig. 1. — Carte simplifiée du Boulonnais et de l'Artois.

Fig. 1. — Simplified map of Boulonnais and Artois.

L'épaissement de la couverture sédimentaire dévonienne depuis le Nord vers le Sud est connu depuis longtemps. Mais des observations détaillées de terrain ont permis, en plusieurs endroits, de montrer la coïncidence géographique entre une zone faillée et une augmentation de la série, éventuellement accompagné d'une variation de faciès notable.

## II. — STRATIGRAPHIE DU BOULONNAIS (COUVERTURE DU PARAUTOCHTONE)

On trouvera un résumé des principales formations du paléozoïque du Parautochtone Brabançon qui, en France, affleure uniquement dans le Boulonnais (Mansy *et al.*, sous presse). Le Paléozoïque inférieur n'y affleure pas, il n'est connu qu'en sondages et à la faveur de travaux. Il est important de noter que le Dévonien moyen et supérieur est généralement peu compétent alors que le Carbonifère carbonaté est très compétent générant un décollement assez généralisé entre ces deux ensembles et peut être aussi localement avec le socle du paléozoïque inférieur.

Sur celui-ci on reconnaît :

- La Formation de Caffiers composée de shales, grès et poudingues (60 à 100 m).

En 1892, Rigaux donnait la succession suivante dans la tranchée de voie ferrée Calais-Boulogne. De bas en haut : 9 m de poudingue à gros galets dans une argile rouge, 14 m de schistes rouges, 24 m environ d'une alternance de grès schisteux; 1,50 m de calcaire noduleux; 10 m de schistes alternativement verdâtres et jaunâtres rouges; l'âge givétien, voire même eifélien, de cette formation reste hypothétique d'autant plus que le contact avec la formation sus-jacente n'a jamais été observé en surface et n'est pas clair sur les profils sismiques.

### 1) Le Givétien

- La Formation de Blacourt : calcaires très diversifiés (crinoïdiques, bioclastiques, construits.) avec des passées argileuses plus ou moins importantes. (200 m).

Trois membres y ont été définis (Mistiaen *et al.*, 2001):

- Le Membre du Griset (170 m visibles environ).

Calcaires très diversifiés, souvent en bancs massifs, plus argilo-gréseux vers la base (35 à 65% de Ca CO<sub>3</sub>), séparés par des passées argileuses. Il affleure largement dans les carrières de Stinkal; seule sa partie sommitale (35,30 m) est visible dans la tranchée de voie ferrée Caffiers-Ferques.

- Le Membre de Couderousse (8,50 m environ).

Visible dans la tranchée de voie ferrée Caffiers-Ferques et dans la partie occidentale de la carrière du Banc Noir. Il renferme des argiles grises, calcareuses (25 à 30 % de Ca CO<sub>3</sub>) et micacées, comportant quelques niveaux décimétriques indurés, noduleux, carbonatés et crinoïdique.

- Le Membre Bastien (23,50 m environ).

Calcaire massif, gris, bioclastique, très tectonisé dans le tiers inférieur; calcaires, calcaires argileux et argiles en bancs pluri-décimétriques dans la partie supérieure

La macrofaune (Brachiopodes, constructeurs) du Membre du Griset a permis depuis longtemps de lui attribuer un âge givétien puis de préciser que le Givétien basal et son sommet étaient probablement absents. Le milieu de dépôt de la Formation de Blacourt est celui d'une plate-forme carbonatée peu profonde. L'étude minéralogique des fractions argileuses de cette formation confirme l'existence d'un contexte tectonique instable avec des épisodes de calme, sous climat de type plutôt chaud et humide, l'influence diagénétique restant toujours faible.

## 2) Le Frasnien

Epais de plus de 380 mètres, l'étage comprend trois formations, visibles à l'affleurement dans la partie orientale de l'unité parautochtone de Ferques, les Formations de Beaulieu (extrême base exceptée), de Ferques et d'Hydrequent (pro parte).

- La Formation de Beaulieu : Elle est composée d'argilites violacées ou verdâtres, renfermant quelques niveaux carbonatés partiellement construits (200 m environ).

La limite inférieure de la formation est faillée, elle est subdivisée en 3 membres :

- Le Membre de Cambresèque (56 m au moins).

Le terme inférieur (= «Calcaire de la Cédule» Gosselet, 1880 ; non Austen, 1853), toujours encadré de failles, consiste en quelques mètres observés sporadiquement dans les carrières du Banc Noir et du Griset. Il s'agit de marnes bleu-foncé, de calcaire cristallin gris-foncé, jaunâtre par altération, localement très riche en Brachiopodes

Le terme supérieur (50 m environ) consiste en une série d'argilites comportant de minces lits carbonatés, plus ou moins dolomitiques et gréseux, parfois lenticulaires, silteux vers la base.

- Le Membre des Noces (20 m environ).

Il est composé de dolomies d'argilites et de calcaires.

- Le Membre des Pâtures. (100 m environ).

Les affleurements sont rares et limités on y trouve des argilites vertes et rouges et de rares bancs de calcaires.

Cette formation est d'âge frasnien sauf l'extrême base qui pourrait appartenir au Givétien terminal. D'après Lefrançois *et al.*, 1993, la sédimentation du membre inférieur de la formation, à caractère transgressif, présente des structures caractéristiques de dépôts de tempête en milieu marin franc.

- La Formation de Ferques : Elle renferme des calcaires dolomitiques, bioclastiques, parfois construits et argileux (80 m environ). On y différencie quatre membres qui sont de bas en haut:

- Le Membre de Fiennes (14 à 20 m de dolomies et calcaires dolomitiques).

- Le Membre du Bois (16 m environ de calcaires argileux).

- Le Membre de la Parisienne (32 m environ de calcaires souvent à grain fin et noduleux)

- Le Membre Gris (15 m environ de calcaire argileux très noduleux et de marnes gris-vert.

L'ensemble de la macrofaune de la Formation de Ferques confère un âge frasnien moyen.

Elle est caractérisée par un milieu peu profond mais très agité d'abord, permettant l'installation d'une faune de constructeurs (Rugueux, Tabulés, Stromatopores) lamellaires puis massifs.

- La Formation d'Hydrequent : Ce sont des argilites rouge violacé et siltstones sur 110 m environ.

L'alternance d'argilites rouge violacé et de bancs pluricentimétriques de siltstones, à ciment calcaréo-dolomitique présente de nombreuses figures sédimentaires, interrompues vers le tiers supérieur par un banc repère (1,80 m) de brèche dolomitique ferrugineuse riche en Brachiopodes.

Les récentes découvertes permettent actuellement de situer la limite Frasnien-Famennien entre 0,50 m et 2,50 m sous le sommet visible de la Formation d'Hydrequent.

L'environnement sédimentaire évoque celui d'une vasière côtière, subtidale ou intertidale soumise aux fluctuations de courants de marée (Bonte *et al.*, 1974).

## 3) Le Carbonifère

La série carbonifère, d'âge Tournaisien à Viséen est la mieux représentée dans l'unité parautochtone de Ferques. Son exploitation en carrières permet d'avoir des coupes continues. Sa puissance est comprise entre 600 et 700 m

## 4) Le Tournaisien

- La Formation des Calcschistes de la Vallée Heureuse

Ils ont été décrits par Pruvost et Délepine (1921) et sont encore visibles sur une faible épaisseur dans la carrière de la Vallée Heureuse, ils contiennent des schistes rouges à la base, noirs au sommet renfermant des plaquettes calcaires alignées parallèlement à la schistosité. Ils sont aussi connus dans le sondage des Moines.

- La Formation de la Dolomie du Hure

C'est un ensemble massif de dolomie d'origine diagénétique. Epaisse de 130 à 200 m, elle affleure dans la

carrière Randon Nord et dans la carrière Magnésie et Dolomie de France.

La partie inférieure est d'âge Tn3, les parties moyenne et supérieure atteignent le Viséen inférieur V1a.

### 5) Le Viséen

Épais d'environ 400 mètres, il comprend cinq formations.

#### - La Formation du Haut-Banc

On trouve une épaisse série d'une puissance voisine de 200 m. Elle peut être subdivisée en 3 sous-ensembles dont seule la partie supérieure est connue à la fois dans l'Unité de Ferques et dans l'Unité du Haut-Banc.

#### a) Les Calcaires du Haut-Banc inférieur

Les couches les plus anciennes connues à l'affleurement affleurent dans les carrières Randon et du Boulonnais, leur épaisseur probablement supérieure à 20 m n'est pas connue avec certitude. Ces terrains sont constitués de calcaires micritiques sombres, parfois à laminations algaires bien marquées. On y note la présence de 1 ou 2 paléosols.

Viennent ensuite des calcaires, épais d'une soixantaine de mètres, présentant une dolomitisation assez poussée, parallèle à la stratification, pouvant donner naissance à des bancs caverneux, par dissolution préférentielle. Le passage avec la partie médiane se fait pas une dizaine de mètres de petits bancs pluricentimétriques à décimétriques, noirs et localement assez dolomitisés (site de Leulinghen).

#### b) Les Calcaires du Haut-Banc moyen

Au-dessus de ces petits bancs, la sédimentation devient vraiment séquentielle et plus calcaire. On y reconnaît sur une soixantaine de mètres 13 séquences correspondant à la séquence standard définie par Hoyez (1970).

Lorsqu'elle est complète, elle est constituée de la succession suivante : base richement bioclastique, oosparite, pelsparite, calcaire algaire et se termine par une biomicrorite à fenestrées et traduit donc une diminution de l'énergie des milieux de dépôt depuis un milieu ouvert subtidal à un milieu plus calme de type intertidal à supratidal.

L'âge de ces terrains, obtenu par les associations typiques, précédemment citées est V1b. Le passage V1b - V2a se fait au sein de ce dernier ensemble par adjonction de l'algue *Koninckopora* spp. et celle de très rares *Uralodiscus* à l'association précédente. Seuls, quelques mètres appartenant à la partie inférieure du Haut-Banc sont visibles dans l'Unité du Haut-Banc, à la carrière de Basse-Normandie.

#### c) Les Calcaires du Haut-Banc supérieur

La limite entre le Haut-Banc moyen et le Haut-Banc supérieur est très reconnaissable sur le terrain (carrière de Basse-Normandie, du Boulonnais (sites de Ferques et de Leulinghen), Randon, Vallée Heureuse). C'est un niveau particulier semblable au Banc d'Or de Bachant qui a été défini par Gosselet (1888) dans l'Avesnois. Il est interprété

(Prud'homme, Vachard, Mansy, 1992) comme un paléosol à structures pédogénétiques typiques dont les argiles sont d'origine cinéritique. Comme l'ensemble de la sédimentation viséenne, il se retrouve dans l'Avesnois et en Belgique. Classiquement, il était utilisé comme repère de la limite V2a-V2b. Le Banc d'Or est surmonté d'une soixantaine de mètres de calcaires sombre, séquentiels constituant la série du Haut-Banc supérieur. La séquence est la même que précédemment, on en connaît une vingtaine. Le sommet de séquence se reconnaît assez souvent à la couleur rouge due à la présence d'oxydes de fer déposés en milieu aérien ou subaérien, suite à l'émergence de la zone de dépôt. La microfaune permet d'y reconnaître le passage au V2b.

#### - La Formation de la Dolomie à *Siphonodendron martini*

Visible dans les carrières du Boulonnais (sites de Ferques et de Leulinghen) ainsi que dans la carrière de la Vallée Heureuse et épaisse d'une soixantaine de mètres, elle est constituée de 7 séquences définies par Hoyez (1970), et d'une partie supérieure plus massive sans séquence visible dans l'unité du Haut-Banc car masquée par une dolomitisation poussée. Cet ensemble est daté du V2bδ- V3aa.

#### - La Formation du calcaire Lunel

C'est un calcaire clair, comportant des niveaux oolitiques parfois bien développés. Chouteau (1986) a mis en évidence une différence du nombre de séquences entre l'Unité du Haut-Banc : 17 séquences pour 55 m d'épaisseur et l'Unité de Ferques : 22 séquences pour 75 m.

## III. — LA STRUCTURATION FINI- PALEOZOÏQUE

### 1) Boulonnais-Artois

L'orogénèse Hercynienne est caractérisée par des chevauchements à vergence Nord sur la couverture dévonocarbone de l'avant pays. Ces chevauchements affectent des roches d'âge silurien, dévonien et carbonifère. Le "Front Hercynien" est généralement assimilé au chevauchement majeur frontal, la Faille du Midi, qui se prolonge du Nord de la France jusqu'en Allemagne sur plusieurs centaines de kilomètres. La faille du Midi a un tracé discuté au niveau du Boulonnais son tracé varie en fonction du critère retenu :

- soit la présence de paléozoïque inférieur plutôt situé au Sud de la faille du midi,

- soit la continuité sismique de la faille la plus importante

On connaît aussi une activité s'exprimant par un ensemble de failles normales et par des failles décrochantes. Ce jeu de failles plus tardif que les chevauchements, est daté pour sa limite supérieure du Trias moyen selon Lewandowski *et al.*, (1999) et il est scellé localement par des dépôts d'âge jurassique moyen (Pruvost et Pringle, 1924 ; Mansy *et al.*, sous presse). Depuis les travaux de Gosselet et Bertaut (1873), puis ceux d'Olry (1904) et de Pruvost et Delepine (1921), on distingue des unités allochtones (les unités du Haut-Banc et d'Hydrequent) et une unité parautochtone dite de Ferques (fig. 1).

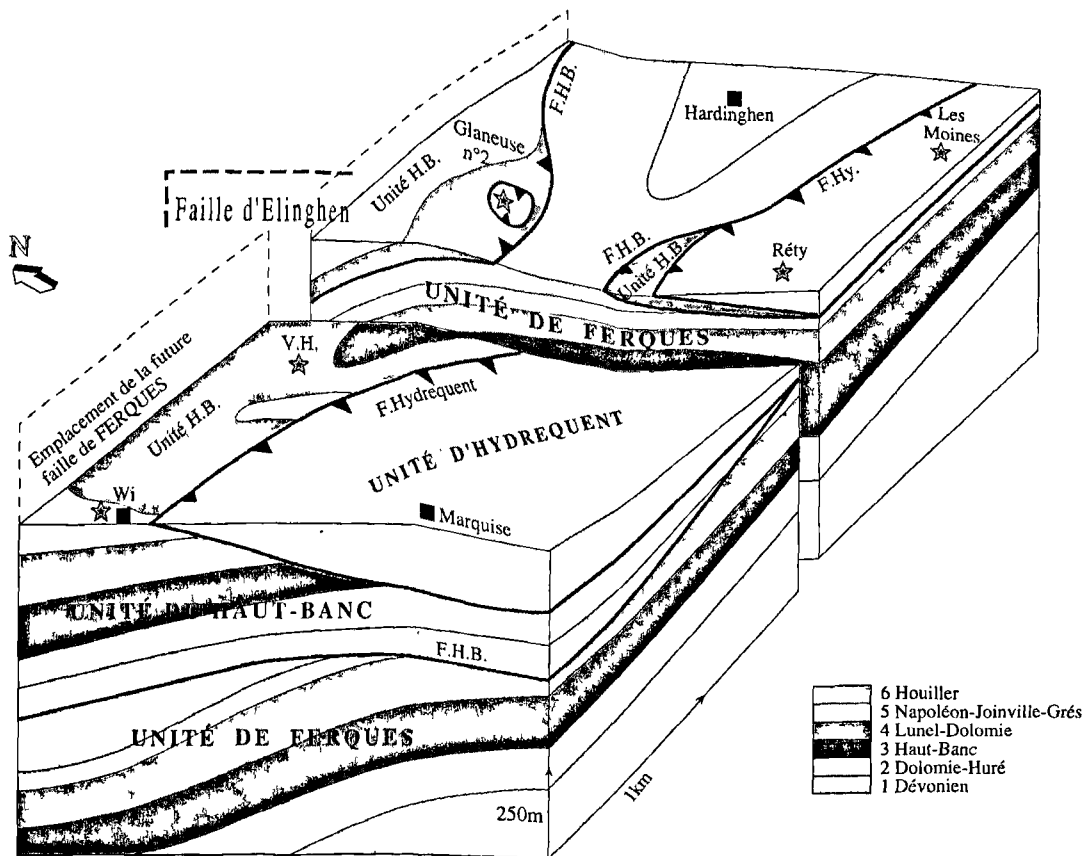


Fig. 2. — Bloc diagramme montrant les relations entre les diverses unités structurales :  
 Wi : Witerthun ; V.H. : Vallée heureuse ; F.H.B. : Faille du Haut Banc ; F. Hy. : Faille d'Hydrequent.

Fig. 2. — Diagram showing relationships between different structural units.

L'exploitation houillère a été intense au début de ce siècle dans cette région ; elle a permis d'affiner les connaissances. Elles ont été complétées par des travaux géophysiques effectués lors des campagnes pétrolières entre 1961 et 1964 et synthétisés par des cartes dont les plus novatrices sont probablement la carte gravimétrique (anomalies de Bouguer) et la carte de l'écorché inframésozoïque du Nord de la France documents C.F.P., publiés par la SGN en 1965. A partir de 1975, de nouveaux travaux de géophysique ont été effectués par les compagnies Elf et Total dans un secteur plus large compris entre Montreuil et Maubeuge. Plus tard, lors de la campagne ECORS, des profils complémentaires et des sondages sismiques profonds ont complété ces approches ; les résultats ont été publiés dans un ouvrage de synthèse (ECORS : le profil Nord de la France, édité par Cazes et Toreilles en 1988). L'Artois a fait l'objet d'une campagne de géophysique complétant les travaux antérieurs sur le Boulonnais, (1963, 1965). Actuellement ces profils sismiques font l'objet de nouveaux retraitements.

Le Boulonnais a aussi été le lieu de nombreuses études géologiques depuis plus d'un siècle et demi, en raison de son contexte particulier. En effet, on y distingue sur une petite surface localisée autour de la carte de Marquise une succession de terrains qui s'échelonnent du Paléozoïque au Quaternaire. On peut donc y voir les relations entre le socle varisque septentrional et sa couverture mésozoïque (fig. 1). De plus, les terrains namuro-westphaliens qui constituent le

toit de la série paléozoïque renferment de la houille, qui a fait l'objet d'une intense exploitation entre les années 1850 et 1950 (Olry 1904). Ces données de sub-surface (forages et galeries minières) permettent ainsi de compléter les observations de surface qui restent limitées en raison des affleurements discontinus. Enfin, l'agrandissement de deux grandes carrières : Vallée Heureuse (VH) et Carrières du Boulonnais (CB) est l'occasion de préciser les relations géométriques entre les diverses unités reconnues depuis près d'un siècle (Gosselet et Bertaut 1873, Olry 1904) et toujours discutées (Averbuch et Mansy 1998). Une bibliographie complète est proposée dans Mansy *et al.*, sous presse.

## 2) Les principales structures

Trois unités structurales superposées sont classiquement reconnues dans cette partie frontale de l'orogène varisque (Pruvost et Delepine, 1921). Ce sont du Nord au Sud, et donc de bas en haut, les unités de Ferques (UF), du Haut Banc (UHB) et d'Hydrequent (UH) (fig. 4 in Averbuch *et al.*, 2001). Elles sont recouvertes en discordance au Sud par le Jurassique et au Nord par le Crétacé.

La mise en place de ces unités s'est effectuée de manière progressive, les unités inférieures étant déjà partiellement structurées avant d'être recoupées par des chevauchements hors séquences visibles sur le bloc diagramme de la figure 2 (Mercier et Mansy 1995, Averbuch et Mansy 1998).

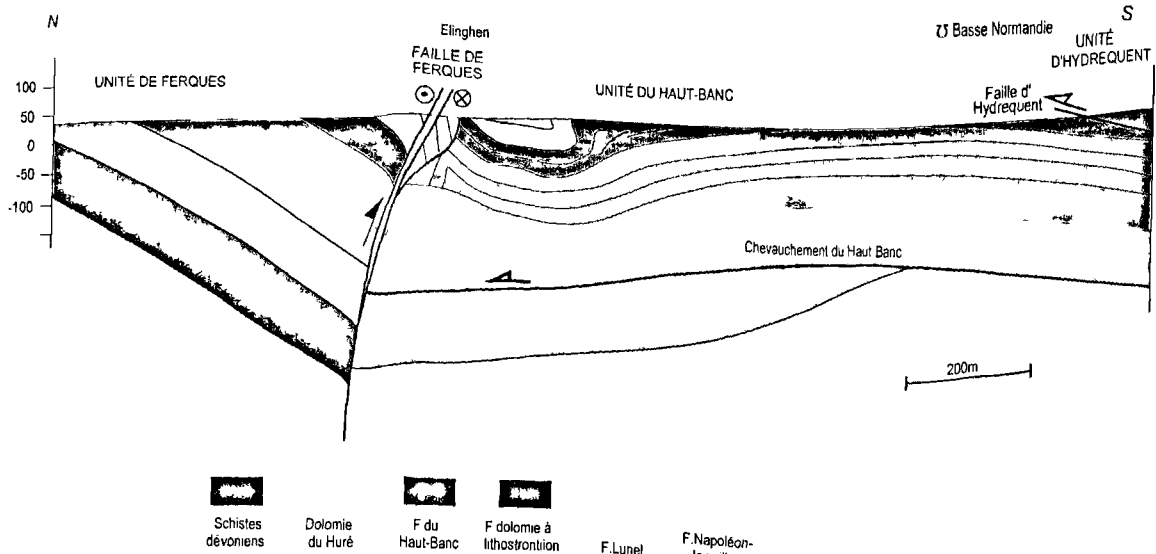


Fig. 3. — Coupe sur le bord oriental de la carrière de la Vallée Heureuse.

Fig. 3. — Cross section on eastern side of Vallée Heureuse quarry.

Jusqu'ici la mise en place des structures chevauchantes n'avait pu être datée qu'indirectement syn- à post-Westphalien supérieur, ces roches étant les plus récentes impliquées dans la déformation varisque. Des travaux utilisant les méthodes paléomagnétiques complètent cette analyse (Lewandowski *et al.*, 1999 ; Marton *et al.*, 2000) Ils montrent en particulier qu'au sein des unités paléozoïques l'activité tectonique la plus récente est limitée à la Zone Faillée de Ferques (Z.F.F.) décrochante (qui recoupe la totalité des unités chevauchantes durant le Permo-Trias. n'est clairement visible que dans les grandes carrières du Boulonnais (C.B.) et de la Vallée Heureuse (V.H.) (fig. 2).

De nombreuses interprétations ont été proposées au sujet de cette faille, à la fois sur son objet, sa nature et sa position géographique (Colbeaux et Leplat, 1982 ; Bourzo, 1985). A l'origine, la faille a été localisée et décrite au coeur actuel des carrières du Boulonnais là où des écailles de houiller affleuraient en surface limitant l'UF au Nord et l'UHB au Sud.

Les principales coupes ont été décrites dans Averbuch *et al.*, 2001.

La première, rend compte du flanc Est de la Vallée Heureuse. La seconde a été levée sur la paroi occidentale de la carrière des Moines appartenant à l'ensemble des carrières du Boulonnais. des carrières du Boulonnais. La troisième est située à l'extrémité Ouest du bassin carrier de Marquise (voir figure 2 sur le bord ouest du bloc diagramme). Elle passe par le sondage de Witerthun et le village de Bernes au Nord de la faille de Ferques.

a) Coupe de la Vallée Heureuse :

On y distingue du Sud au Nord, l'unité d'Hydrequent, constituée essentiellement de schistes et grès rouges d'âge famennien qui chevauchent l'U.H.B. carbonatée et viséenne en surface ; cette unité constitue le dôme du Haut Banc peu déformé sauf, sous le chevauchement d'Hydrequent où des duplex et de nombreux plis à axe variable ont été décrits par

Pruvost et Delepine (1921) Cooper *et al.*, (1983), et Averbuch et Mansy, (1998). En s'approchant de la ZFF on distingue un petit synclinal hectométrique, un anticlinal faillé et la faille majeure à pendage de 80°N. Les lèvres de cette dernière sont écartées d'une dizaine de mètres et remplies de sédiments gréseux (F. Grès des Plaines) et charbonneux rapportés aux formations namuro-westphaliennes. Les épontes de cette zone faillée sont lissées et souvent gravées par des stries au pitch relativement faible (voir la discussion sur la cinématique). Au Nord de la faille principale, on reconnaît l'U.F. à pendage Sud ; celui-ci augmente en se rapprochant de la faille pour donner de beaux crochons qui matérialisent le soulèvement du compartiment Nord. Sur le bord occidental de cette même carrière, le synclinal proche de la faille principale n'apparaît plus car la petite rampe qui l'a engendré disparaît très vite vers l'Ouest avec le pli à vergence Sud généré à son toit.

b) Coupe levée près de la Faille de Ferques :

Elle est levée à l'Ouest de la carrière des Moines et représentée avec la même orientation que la précédente afin d'en faciliter la lecture (fig. 4).

On distingue du Sud au Nord (fig. 3) :

- L'unité d'Hydrequent

- l'UHB avec un pli pluridécamétrique à vergence Nord interprété comme un pli de propagation se bloquant sur une rampe à fort pendage (Mercier et Mansy, 1995). Durant ce processus, le pli subit un cisaillement important associé à un amincissement du dressant ; l'ensemble est tronqué par une faille inverse à pendage Nord .

- Au Nord de cette dernière, on observe deux cents mètres de roches viséennes et namuro-westphaliennes verticalisées et intensément déformées, constituées par de petits duplex métriques à décamétriques séparés par des contacts très fortement pentés vers le sud et présentant de nombreux indices de coulissage, cet ensemble a été appelé duplex des Moines



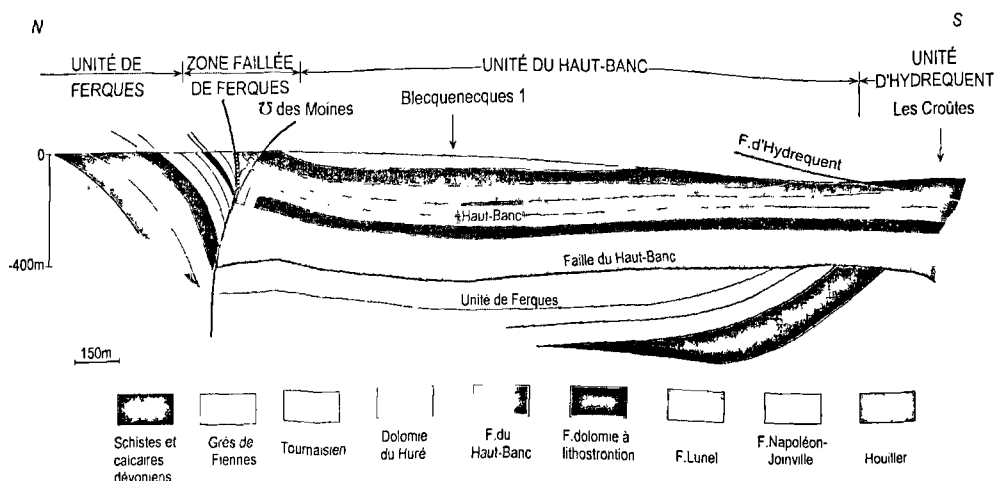


Fig. 4. — Coupe simplifiée près des carrières du Boulonnais.

Fig. 4. — Simplified cross section near Boulonnais quarries.

(Prud'homme *et al.*, 1992). La multiplicité des contacts au sein de la zone faillée ainsi que les variations latérales de sa géométrie soulignent le caractère complexe de la faille de Ferques. La divergence des contacts à l'intérieur de la zone faillée traduisent présentent l'allure caractéristique d'une structure en fleur (Harding 1985). Sa géométrie en profondeur est peu contrainte. Néanmoins, son orientation là où elle présente la géométrie la plus simple (carrière de la Vallée Heureuse), suggère un tracé en profondeur subvertical. Par ailleurs, la localisation de la zone faillée au niveau de la brisure des couches de l'unité de Ferques suggère un raccord à la base de la rampe chevauchante situé sous cette unité (Averbuch et Mansy, 1998) à la manière d'un rétrochevauchement tardif (Averbuch *et al.*, 2001).

#### c) Coupe occidentale :

Elle est levée à partir de quelques affleurements et surtout avec de nombreux sondages (fig. 5). Les plus importants étant ceux de Witherthun et de Le Bail qui atteignent des profondeurs respectives de plus de 600 et 100 mètres (Olry, 1904). Ces sondages ont été partiellement complétés par Bouroz qui attribue au fond du sondage de Witherthun un âge Frasnien à la Formation basale des Schistes de Beaulieu (Bouroz 1962).

Le pendage des couches est supposé vers le Nord étant ainsi dans la continuité des affleurements connus plus à l'est.

## IV. — SCENARIO TECTONIQUE

### 1) Varisque

(1) La structuration varisque a fonctionné de façon progressive ; en effet, l'UHB se met en place sur une U.F. déjà déformée. De nombreux sondages, l'exploitation des mines de charbon et les observations en surface permettent d'en proposer une structure générale. Les plis y sont ouverts, kilométriques, précoces et suivis par des chevauchements hors séquence. La faille d'Hydrequent hors séquence, elle aussi, recoupe les chevauchements antérieurs (CHB). L'ensemble de ces déformations plicatives et chevauchantes commence au

Viséen supérieur et perdure jusqu'au Stéphanien, avec un paroxysme au Westphalien supérieur. Ceci est mis en évidence par les données sédimentologiques, structurales et paléomagnétiques (Mansy *et al.*, sous presse ; Marton *et al.*, 2000) et par l'interprétation des profils sismiques réalisés entre 1963 et 1965. Le contact avec le « socle » silurien reste problématique il n'a jamais été observé mais seulement déduit par la proximité du Poudingue de Caffiers non daté et de la Formation de Blacourt d'âge givétien moyen à sa base.

(2) La Z.F.F. d'orientation générale N110 découpe l'ensemble des plis et des chevauchements décrits ci-dessus (fig. 1Eb). L'étude paléomagnétique du remplissage de faille donne un âge limite supérieur du Trias moyen (Lewandowski *et al.*, 1999) et elle est scellée par des sédiments du Jurassique moyen (Lamarche *et al.*, 1997)

Les failles transverses de direction N-S qui découpent la Z.F.F. mais qui sont probablement quasi-contemporaines sont, quant à elles, souvent karstifiées avec un remplissage de sables dont l'âge varie selon les endroits du Rhétien jusqu'à la base du Jurassique moyen (Mansy *et al.*, sous presse). Le fonctionnement le plus récent de la Z.F.F. peut donc être attribué au Permo-Trias.

Le remplissage charbonneux observé dans la zone faillée est le résultat de la montée de l'UF sur le compartiment Nord dont la partie sommitale composée de Houiller s'est infiltré aisément entre les lèvres de la faille. Le soulèvement de ce compartiment s'accompagne d'un mouvement décrochant le long de contacts divergents créant ainsi une structure en fleur d'extension latérale kilométrique.

Si la ZFF n'a pas été réactivée après le Permo-Trias il n'en est pas de même pour un ensemble de même orientation qui l'entoure.

### 2) Activité post-varisque

La couverture du Boulonnais a subi plusieurs phases de déformations post-paléozoïques.

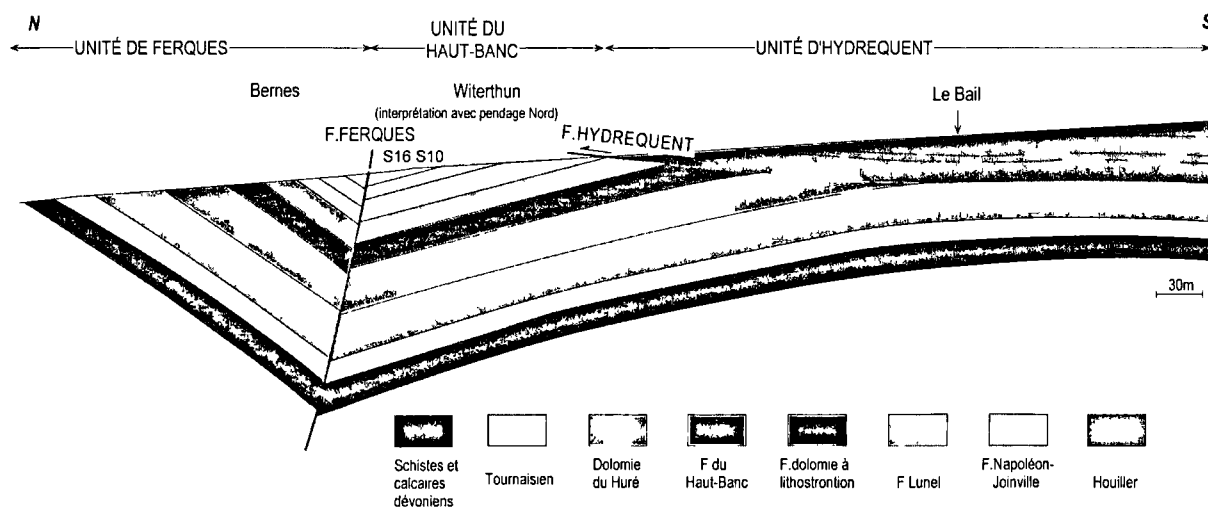


Fig. 5. — Coupe occidentale du bassin de Marquise.

Fig. 5. — Western cross section along Marquise area.

La première située à la limite jurassique-crétacé a une importance variable selon les auteurs. Pruvost (1925) la privilégie alors que Bonte (1969); Bonte *et al.*, (1971) la minore. Il est cependant évident qu'un basculement est nécessaire pour expliquer la discordance cartographique entre le Jurassique moyen et le Crétacé inférieur qui apparaît sur les cartes de Marquise, Desvres et Guines. Sur ces cartes, le Wealdien et l'albo-Aptien reposent indifféremment sur des formations comprises entre le Tithonien et le Paléozoïque inférieur. Cette événement appelé phase Boulonnaise ou néocimmérienne par Pruvost (1925), correspond à l'activité tectonique connue plus à l'Ouest dans le bassin du Weald, où la subsidence a été particulièrement importante. Cette phase est aussi reconnue par les différentes campagnes sismiques en mer (Lamarche *et al.*, 1996,1997 ; Mansy *et al.*, sous presse).

La seconde phase importante reste mal datée, elle est d'âge post-Crétacé supérieur - Tertiaire : c'est la phase artésienne ou épicrotécée (Gosselet, 1908, 1910 ; Bonte, 1969 ; Bonte *et al.*, 1971 ; Delattre, 1969). Bonte relie celle-ci à quelques grands accidents, nous verrons que ces failles correspondent à des rejeux et à des branchements sur des accidents profonds réactivés.

## V. — APPORTS DE LA GEOPHYSIQUE

Pour comprendre l'organisation spatiale de ces failles, sous la couverture des cartes d'anomalies géophysiques et en particulier des cartes gravimétriques ont été utilisées.

- le gradient horizontal du champ gravimétrique qui permet de localiser la limites des blocs de densité différente et donc la position de failles éventuelles.

- le gradient vertical qui permet, en l'absence d'hétérogénéité intrasédimentaire, de reconnaître les parties hautes et les parties basses de socle.

Les principaux résultats été développés dans un article récent (Everaerts et Mansy, 2000 ; Mansy *et al.*, sous presse), ils sont repris succinctement ci-après.

### 1) Gradient horizontal

Le résultat de ce traitement est représenté sur la figure 3 de Everaerts et Mansy (2001) se lit comme une carte structurale : les maxima représentent les contacts verticaux ou subverticaux entre des roches de différentes densités. Dans le cas de la région étudiée ces contacts traduisent la présence de failles. La plupart de celles-ci ont une longueur de 15 à 40 km. On reconnaît le motif souligné par des failles N 110 et N 30 (Bonte *et al.*, 1971 ; Colbeaux, 1977, Colbeaux *et al.*, 1993). On peut compléter ou limiter certaines failles en utilisant la géophysique (voir l'exemple de Landrethun), qui s'amenuise vers Wissant et vers St Omer.

L'extension post varisque comparable à celle décrite au sud de la Mer du Nord (est particulièrement marquée par les failles de Pernes et de Marqueffles et du Cap Griz Nez qui peuvent se suivre très aisément sur la carte des anomalies de Bouguer. En général le compartiment Sud de ces failles est affaissé avec un remplissage de sédiments dont les plus anciens sont attribués au Permo-Triasique (Olry, 1904 ; Gosselet, 1910 ; Mériaux, 1961). Elles ont été réactivées lors de la compression Eocène Oligocène (Mansy *et al.*, sous presse). Toutes ces failles sont soulignées par les maxima des gradients horizontaux telle la zone faillée de Sangatte se marque nettement en mer ; cette zone faillée se termine a terre par de petits décrochements en baïonnette assimilées a une zone de transfert synthétique (Morley *et al.*, 1990). La présence de ces zones de transfert est indispensable, elles rendent compte des différents types d'accommodation possible près des terminaisons latérales des chevauchements où le raccourcissement peut se matérialiser soit par des plis et des failles, ou encore par un nouveau chevauchement en relais. Les domaines où les terminaisons de ces failles,

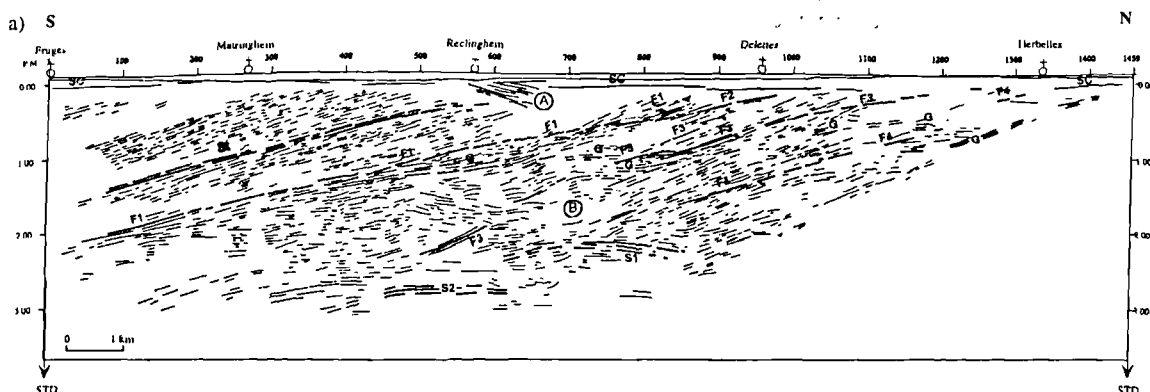


Fig. 6. — Pointé des réflecteurs les plus importants du profil BM84K.

Fig. 6. — Line drawing along BM84K.

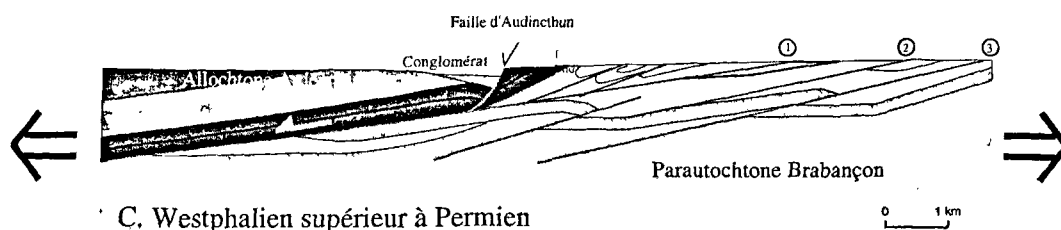


Fig. 7. — Interprétation des mouvements tardi-varisques en Artois.

Fig. 7. — Late variscan movements in Artois area.

aveugles, interfèrent, constituent les zones de transfert. Ainsi la faille qui traverse le détroit et se termine près de Sangatte est relayée au Sud par une faille aveugle qui affecte le socle, et se marque dans la couverture par la flexure de Landrethun.

## 2) Le gradient vertical

Les zones positives indiquent de la présence de roches ayant une densité supérieure à la moyenne et inversement. Elles offrent donc une vision des lithologies sub-affleurantes. On y distingue les zones en surrection caractérisées par des zones positives car le socle en général plus lourd est plus près de la surface, où il est recouvert par une couverture plus légère, peu épaisse. Inversement, les zones en dépression seront caractérisées par des zones négatives indiquant une couverture crayeuse, légère et épaisse.

Un exemple typique de zone en surrection se traduit sur la carte de la dérivée première verticale par une anomalie positive se trouvant au sud du décrochement en baïonnette délimitées par les zones faillées de Sangatte et de Landrethun et au nord de la faille de Slack Epitre. Ce secteur laisse apparaître un affleurement du jurassique moyen pour la partie sud reposant sur du dévono-carbonifère pour la partie située immédiatement au Sud de Landrethun. Dans l'ensemble, on constate que le Boulonnais couvert par du crétacé inférieur est en surrection marquée par exemple par, le thalweg de la Liane

à Boulogne qui se situe à +36 m NGF (Bonte, 1969). Il existe une exception marquée par la zone effondrée de 5 km de large coincée entre les failles de Slack-Epitre au Nord et Wimereux-Belle au Sud. Cette zone se trouve sur le bord Sud de l'extrados d'un pli à grande longueur d'onde.

## VI. — RESULTATS PRELIMINAIRES DE LA SISMIQUE EN ARTOIS

Le profil BM84 K (fig. 6) a été retraité et interprété, quelques apports ont été abordés dans Mansy *et al.*, (sous presse), ils seront publiés dans un plus contexte plus général reprenant l'ensemble des profils de Lens à Boulogne (Mansy *et al.*, en cours)

Quelques points importants soulevés par l'étude de ce profil complètent la compréhension de ce secteur.

On y découvre plusieurs zones qui peuvent être séparées par les faciès sismiques (fig. 7) :

- au Sud le dévonien inférieur qui présente une belle homogénéité avec de réflecteurs parallèles à pente Sud
- au centre un ensemble à pente Nord qui correspond aux « conglomérats de l'Artois de Gosselet » attribués au Carbonifère supérieur ou au Permo- Trias (Gosselet, 1908 et 1910). On constate qu'il remplit un demi-graben qui contient

aujourd'hui près de 500 mètres de conglomérats, schistes et grès mal datés (Mériaux, 1961). Latéralement la présence de tels conglomérats a été décrite dans les mines en particulier le long de la faille de Marqueffles. Une étude précise des clastes suggère un âge Permien par la présence de *Microcodium* (travail en cours).

- au Nord une troisième zone beaucoup plus hétérogène sismiquement apparaît, elle correspondrait à la zone dite des massifs renversés et au bassin houiller.

Le Crétacé bien souligné par le réflecteur sub-horizontale est décalé par les failles principales à faible pendage qui affectent le socle. Elles apparaissent verticales dans la craie et se branchent souvent sur des chevauchements anciens. Il en est de même pour les failles de Pernes et Marqueffles qui doivent être réinterprétées.

## VII. — CONCLUSIONS

On peut constater par l'interprétation de ce profil sismique qu'une double inversion tectonique affecte cette région :

- Une compression tardi-varisque marquée par les chevauchements à faible pendage d'âge carbonifère (équivalents de la Faille du Midi et associées),

- Une extension post orogénique avec remplissage syn-sédimentaire au Permien dans un demi-graben rempli de conglomérats et sédiments rouges. Il peut être suivi depuis Pernes jusqu'au Cap Gris-Nez.

- Une compression qui suit la période de quiescence crétacée et qui en réactivant les failles de socle paléozoïques soulève le compartiment Sud de celles-ci créant les collines de l'Artois

## BIBLIOGRAPHIE

- AVERBUCH O. et MANSY J.L. (1998). — The "Basse-Normandie" duplex: evidence for an out-of-sequence thrusting overprint. *J. Struct. Geol.*, 20, 33-42.
- AVERBUCH, O. MANSY J.L., Lamarche J (2001). — Déformations tardi-paléozoïques au front septentrional de la chaîne varisque: l'exemple des massifs paléozoïques du Boulonnais (N France), *Annales Société géologique Nord* 9. 13-25.
- BONTE A. (1936). — Sur quelques sondages anciens du Pas de Calais. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. 61, p. 102-119.
- BONTE A (1969). — Le Boulonnais., *Ann. Soc. géol. Nord*, LXXXI, 1, p. 23-46.
- BONTE A. et coll. (1971). — Carte géologique au 1/50000. Feuille de Marquise - 1<sup>ère</sup> édition.
- BOUROZ, A. (1956). — Contribution à l'étude des Failles épicrotécées de l'Artois. *Annales Société Géologique du Nord*, 76, 51-62.
- BOUROZ A. (1962). — Contribution à l'étude de la structure du bassin houiller du Boulonnais., *Ann. Soc. géol. Nord*, LXXXII, 27-37.
- BOUROZ A. (1986). — Coulissement dans le Paléozoïque du Boulonnais : La faille de Ferques. *Ann. Soc. géol. Nord*, 37-41
- CAZES M. et TORREILLES G., coord. (1988). — Etude de la croûte terrestre par sismique profonde. Programme ECORS. Profil Nord de la France.- Technip Ed., Paris, 260 p.
- CFP, COPESEP, RAP, SNPA (1965). — Contribution des bassins paléozoïques du Nord de la France. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. 85, p. 273-281.
- CHADWICK R.A. (1986). — Extension tectonics in the Wessex Basin, Southern England. *J. Geol. Soc. London*, 143, p. 465-488.
- CHADWICK R.A. (1993). — Aspects of basin inversion in Southern Britain. *J. Geol. Soc.*, London, v. 150, p. 311-322.
- CHILDS C., WATTERSON J. et NALSH, J.J. (1995). — Fault overlap zones within developing normal fault systems. *J. Geol. Soc. London*, v. 152, p. 535-549.
- COLBEAUX J.P. (1977). — Géométrie et cinématique de la fracturation dans le Nord de la France. *Bull. B.R.G.M. (2<sup>e</sup> série)*, section IV, n°4, p. 339-355.
- COLBEAUX J.P. AMEDRO F., BERGERAT F., BRACQ P., CRAMPON N., DELAY F., DUPUIS C., LAMOUREUX C., ROBASZYNSKI F., SOMME J., VANDYCKE S. et VIDIER J.P., (1993). — Un enregistreur des épisodes tectoniques dans le bassin de Paris : le Boulonnais. *Bull. Soc. géol. France*, t. 164, n°1, p. 93-102.
- DELATTE C. (1969). — Les grands traits géologiques de l'Artois. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. 89, p. 79-90.
- EVERAERTS M., MANSY J.L. (2001) - Le filtrage des anomalies gravimétriques une clé pour une compréhension des structures tectoniques du Boulonnais et de l'Artois (France). *Bull. Soc. géol. Fr.*, 172, 3, 133-140
- GIBSON J.R., WALSH J.J, WATTERSON J. (1989). — Modelling of bed contours and cross sections adjacent to planar normal faults. *J. Struct. Geol.*, 11, p. 317-328.
- GOSSELET J. (1888). — L'Ardenne.- Mém. Carte géol. Fr., Baudry éd., Paris, 881 p.
- GOSSELET J. (1908). — Note sur quelques parties communes aux terrains crétacé et houiller de l'Artois. *Ann. Soc. Géol. Nord*, t. 37, p. 80-109.
- GOSSELET J. (1910). — Les assises crétacées et tertiaires dans les fosses et sondages du Nord de la France. *Etudes des gîtes minéraux de la France*. fasc. 3. Paris.
- GOSSELET J. et BERTAUT M. (1873). — Etude sur le terrain carbonifère du Boulonnais. *Ann. Soc. géol. Nord*, IX, p. 88-103.
- KAISIN F. (1936). — Le problème tectonique de l'Ardenne.- Mém. Inst. Géol. Univ. Louvain, n°11, p. 1-327.
- LACQUEMENT F., MANSY J.L., HANOT F. et MEILLIEZ F. (1999). — Retraitement et interprétation d'un profil sismique pétrolier au travers du Massif paléozoïque ardennais (Nord de la France). *C. R. Acad. Scie, Paris*, 329, 471-477.
- LACQUEMENT F. (2001). — L'Ardenne Varisque. Déformation progressive d'un prisme sédimentaire pré-structuré, de l'affleurement au modèle de chaîne. *Soc. Géol. du Nord, Publ. N°29*, 285
- LAMARCHE J., BERGERAT F. et MANSY J.L. (1997). — Déformations cassantes et plicatives dans le Jurassique du Boulonnais, influence lithostructurale et héritage paléozoïque. *C.R.Acad. Sci.*, Paris, 326, p. 57-63.

- LAMARCHE J., BERGERAT F. et MANSY J.L. (1996). — Tectonique plicatives et cassantes dans le Jurassique du Boulonnais : une histoire méso-cénozoïque polyphasée. *Ann. Soc. géol. Nord*, IV, 2<sup>ème</sup> série, p. 171-179.
- LEFRANCOIS A., DECONINCK J.F., MANSY J.L. & PROUST J.N. (1993). — Structure, sédimentologie et minéralogie des argiles des formations de Beaulieu et d'Hydrequent (Dévonien supérieur du Bas Boulonnais). *Ann. Soc. Géol. Nord*, 2 (2<sup>ème</sup> sér.), Fasc. 3, 123-134.
- LEWANDOWSKI M., LAMARCHE J., MANSY J.L., AVERBUCH O., SZANIAWSKI R. (1999). — Palaeomagnetic dating of brittle tectonics structures : case studies on Ferques Fault (Boulonnais, France) and two faults from the Holy Cross Mountains (Poland). *C.R. Acad. Sci., Paris*, 329, 495-502.
- MANSY J.L. et EVERAERTS M. (1997). — Réinterprétation de la tectonique du Boulonnais et de l'Artois par l'apport de la géophysique. *Colloque S.G.F. Artois-Brabant, Mons*.
- MANSY J.L. et MEILLIEZ F. (1993). — Eléments d'analyse structurale à partir d'exemples pris en Ardenne-Avesnois. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. (2), p. 43-58
- MANSY J.L., EVERAERTS M., DE VOS W. (1999). — Structural analysis of the adjacent Acadian and Variscan fold belts in Belgium and northern France from geophysical and geological evidence. *Tectonophysics*, 309, 1-4, 99-116.
- MANSY J.L., LACQUEMENT F. (2002) - Le Paléozoïque du Nord de la France et de la Belgique. *In* : *Géologues*, 133-134, 7-24.
- MANSY J.L., AMEDRO F., AUFFRET J.P., GUENOC P., LAMARCHE J., LEFEBVRE D., ROBASZINSKI F., SOMME J. et VIDIER J.P. (sous presse). — Carte géologique de Marquise. 2<sup>ème</sup> édition. B.R.G.M., Orléans.
- MÁRTON, E., MANSY, J-L., AVERBUCH, O. & CSONTOS, L. (2000). — The Variscan belt of N France - S Belgium: geodynamic implications of new paleomagnetic data. *Tectonophysics*, 324: 57-80.
- MEILLIEZ F., ANDRE L. BLIECK A., FIELITZ W., GOFFETTE O., HANCE L., KHATIR A., MANSY J.L., OVERLAU P. et VERNIERS (1991). — Ardenne-Brabant. - *Sci. Geol. Bull.*, 44, p. 3-9.
- MEILLIEZ F. et MANSY J.L. (1990). — Déformation pelliculaire différenciée dans une série lithologique hétérogène : le Dévonien-Carbonifère de l'Ardenne.- *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), t. 6, p. 177-188.
- MERCIER E. et MANSY J.L. (1995). — Le blocage du transport sur le plat des plis de propagation : une cause possible des chevauchements hors séquence. *Geodinamica Acta*, 8, 199-210.
- MERIAUX E. (1961). — Observations sur les conglomérats et marbres rouges de l'Artois. *Ann. Soc. géol. Nord*, t. XXXI, p. 65-71.
- MORLEY C.K., NELSON R.A., PATTON T.L., MUNN S.G. (1990). — Transfer zones in the African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts. *Ann. Ass. Petrol. Geol. Bull.*, v. 74, n° 8, p. 1234-1253.
- OLRY A. (1904). — Topographie souterraine du Bassin houiller du Boulonnais ou Bassin d'Hardinghen. *Et. Gîtes Min. France*, VI, 240 p.
- PRUD'HOMME A., VACHARD D. & MANSY J.L. (1992). — Séries carbonatées viséennes du Boulonnais (France). Mise en évidence d'un diachronisme et ses conséquences structurales. *C. R. Acad. Sci.*, t. 315, série II, n°3, 363-369.
- PEACOCK D.C.P. et SANDERSON D.J. (1994). — Geometry and development of relay ramps in normal fault systems. *Amer. Ass. Geol. Bull.*, v. 78, p. 147-165.
- PRUVOST P. (1925). — Observations sur la structure du Cap Gris-Nez et sur les mouvements qui ont affecté le pays Boulonnais après le dépôt du Jurassique. *Bull. Serv. Carte Géol. France*, n° 156, t. XXVIII, 72 p.
- PRUVOST P. et DELEPINE G. (1921). — Observations sur la faille d'Hydrequent et sur les couches de base du Carbonifère dans le Bas-Boulonnais. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (4), XXI, p. 189-206.
- PRUVOST P. et PRINGLE J. (1924). — A synopsis of geology of the Boulonnais, including a correlation of the Mesozoic rocks with those of England - *Proceedings of the Geological Association* vol. 35, p. 29-35.
- SHEPARD THORN E.R., LAKE R.D., ATTITULAH E.A. (1972). — Basement control of structures in the mesozoic rocks of the strait of Dover region, and its reflexion in certain features of the present land and submarine topography. *Philosophical Trans. of Roy. Soc. London*, vol. 272A, p.99-113.
- VAN VLIET-LANOE B., MANSY J.L., MARGEREL J.P., VIDIER J.P., LAMARCHE J., EVERAERTS M. (1998). — Le Pas de Calais, un détroit cénozoïque à ouvertures multiples. *C.R. Acad. Sci.*, p. 729-736
- WALSH J.J. et WATTERSON J. (1989). — Displacement gradient on fault surfaces. *J. Struct. Geol.*, 11, p. 307-316.
- ZIEGLER P.A. (1990). — Geological Atlas of Western and Central Europe. 2ème vol. - Shell intern. Petroleum - Maatschappij. p. 238.



## ENREGISTREMENT SÉDIMENTAIRE D'ÉVÉNEMENTS VOLCANIQUES DANS LE TURONNIEN DU NORD-OUEST DU BASSIN DE PARIS

### Sedimentary record of volcanic events in the Turonian of the Paris basin.

par Alexis GODET <sup>(\*)</sup><sup>(\*\*\*\*)</sup>, Jean-François DECONINCK <sup>(\*)</sup>, Francis AMEDRO <sup>(\*\*)</sup>, Pierre DRON <sup>(\*\*\*)</sup>,  
Pierre PELLENARD <sup>(\*)</sup> et Irène ZIMMERLIN <sup>(\*)</sup>

(Planches XV et XVI)

*Résumé.* — Des horizons de bentonite (niveaux argileux résultant de l'altération sous-marine de verres volcaniques) sont décrits dans le Turonien moyen et supérieur du quart nord-ouest du Bassin de Paris. De bas en haut, il s'agit du Southerham marl, du Caburn marl, des Bridgewick marls et du Lewes marl décrits originellement dans le Sud de l'Angleterre. D'un point de vue minéralogique, ces niveaux présentent un cortège argileux dominé par des smectites magnésiennes, et contiennent des cristaux automorphes de minéraux d'origine volcanique comprenant principalement des feldspaths, des zircons et du quartz. Sur le plan géochimique, les profils de terres rares révèlent d'une part une anomalie négative en cérium probablement liée à l'influence de l'eau mer sur l'altération des verres volcaniques et d'autre part une anomalie négative en europium caractéristique des bentonites de la craie. La corrélation de ces niveaux met en évidence une variation importante de la subsidence entre la Normandie et le Boulonnais qui témoigne d'une instabilité tectonique du bassin de Paris au Turonien supérieur. Enfin, cette étude sur les bentonites conduit à s'interroger sur la signification des alignements de rognons de silex. Un ensemble d'observations convergentes suggère que certains alignements de silex pourraient s'être développés le long de fines retombées de cendres volcaniques. Les bentonites pourraient correspondre à l'enregistrement d'événements volcaniques paroxysmaux séparés de plusieurs centaines de milliers d'années alors que les alignements de silex pourraient correspondre à l'enregistrement d'éruptions volcaniques de moindre importance se produisant à beaucoup plus grande fréquence.

*Abstract.* — Clay-rich beds corresponding to bentonites are described in the Late Turonian chalk from the North-West of the Paris Basin. Originally described in southern England, the bentonites includes the Southerham, the Caburn, the Bridgewick and the Lewes marls. The clay fraction is dominantly composed of dioctahedral Mg-rich smectites originating from the submarine weathering of volcanic particles. The silty fraction comprises euhedral crystals of zircon, feldspar and quartz. Rare Earth Elements patterns reveal a negative Ce anomaly which characterizes the influence of sea-water on weathering processes and a negative Eu anomaly which is considered discriminant to distinguish bentonites from detrital clay-rich beds. The correlation of bentonites reveals variations of subsidence between Normandy and Boulonnais associated with the Late Turonian tectonic instability of the North Western part of the Paris Basin. The occurrence of bentonites indicates that significant amount of volcanic particles entered the chalk sea, thus providing an additional source of silica. A set of observations suggests that silica from flint horizons may partly have a volcanic origin. Bentonite layers may correspond to exceptional paroxysmal, high magnitude volcanic eruptions, while flint layers may correspond to more frequent, low magnitude eruptions.

### I. — INTRODUCTION

De nombreux horizons marneux sont intercalés dans les craies du Nord-Ouest de l'Europe. Leur très grande extension géographique a permis de les utiliser comme outils de corrélation entre coupes souvent éloignées les unes des autres de plusieurs centaines de kilomètres (Mortimore, 1983 ;

1986 ; Mortimore & Pomerol, 1987 ; Wray & Gale, 1993). L'identification des niveaux marneux en tant que bentonites, niveaux argileux issus de l'altération sous-marine de cendres volcaniques (Grim & Güven, 1978) a d'abord été proposée en Allemagne (Siebertz & Vortisch 1979 ; Ernst *et al.*, 1983 ; Zimmerle 1989), puis en Angleterre (Pacey, 1984). En France, elles sont mentionnées pour la première fois dans le Turonien de Normandie et du Boulonnais par Deconinck *et al.*, (1991).

(\*) Département des Sciences de la Terre, Université de Rouen, UMR 6143 CNRS, 76821 Mont St Aignan Cedex France.

(\*\*) 26, rue de Nottingham, 62100 Calais, France.

(\*\*\*) 42 rue de la Chaussée, 80680 Sains en Amienois, France.

(\*\*\*\*) adresse actuelle : Institut de Géologie, Université de Neuchâtel, rue Emile Argand 11, CH-2007, Neuchâtel, Suisse.

Lors d'éruptions explosives pliniennes ou ultrapliniennes, les cendres volcaniques forment un nuage, puis retombent en recouvrant des surfaces considérables. Lorsque les cendres retombent en mer, les verres volcaniques s'altèrent en argiles, le plus souvent en smectites comme c'est le cas dans les bentonites turoniennes dont la fraction argileuse est majoritairement constituée de smectites dioctaédriques relativement riches en magnésium (type Cheto, Deconinck & Chamley, 1995). Les bentonites constituent des lignes-temps sur l'ensemble d'un ou de plusieurs bassins sédimentaires. Elles permettent donc d'établir des corrélations très précises entre des séries sédimentaires distantes de plusieurs milliers de kilomètres, parfois déposées dans des bassins océaniques différents.

Les études géochimiques menées par David Wray ont montré qu'au Turonien moyen et supérieur seuls cinq horizons marneux correspondent à des bentonites, les autres semblant avoir une origine détritique banale. Il s'agit du bas vers le haut, du Glynde marl 1, du Southerham marl, du Caburn marl, du Bridgewick marl 1 et du Lewes marl (Wray, 1995 ; Wray *et al.*, 1996 ; Wray, 1999). La distinction entre niveaux détritiques et volcaniques s'opère grâce aux profils de terres rares. Les bentonites contrairement aux horizons détritiques présentent une anomalie en europium, mais à lui seul, ce critère discriminant d'après David Wray ne paraît pas suffisant. En effet, certains horizons marneux qui ne présentent pas d'anomalie en europium contiennent des minéraux volcaniques tels que des zircons. C'est le cas en particulier du Bridgewick marl 2, considéré comme ayant une origine volcanique par Deconinck *et al.* (1991) mais comme détritique par Wray (1999). Cette apparente contradiction peut s'expliquer par le caractère mixte de cet horizon où se mélangent les influences détritiques et volcaniques. Wray (1999) propose une hypothèse où une partie des cendres à l'origine du Bridgewick Marl 1 se dépose en milieu continental, puis s'altère par des processus pédogénétiques. L'érosion puis le transport des produits d'altération dans la mer de la craie mèneraient à la formation de niveaux argileux contenant à la fois des minéraux argileux détritiques et d'origine volcanique. De manière alternative, le matériel volcanique du Bridgewick Marl 2 a pu être déposé en partie en milieu continental, puis remanié conjointement avec des particules détritiques.

Quoi qu'il en soit, les bentonites traduisent l'existence d'une activité volcanique explosive au Turonien moyen et supérieur. Il s'agit principalement d'un volcanisme acide, rhyolitique, dont les centres volcaniques actifs se situaient probablement en Mer du Nord (Wray 1999).

## II. — DESCRIPTION DES COUPES ÉTUDIÉES

Les coupes étudiées se situent dans trois secteurs géographiques : la Normandie, la Picardie et le Boulonnais (fig. 1).

### 1) Normandie

*Coupe de Senneville* (Pl. XV)- La coupe de Senneville, facilement accessible par la vauvaise (vallée sèche) d'Eletot, a été étudiée sur 13 m (fig. 2). La succession lithologique visible le long des falaises a été décrite en détail par

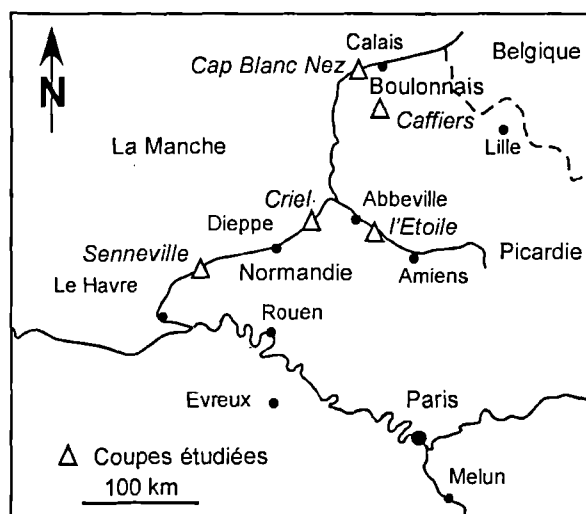


Fig. 1. — Localisation géographique des coupes étudiées.

Fig. 1. — Location of the studied sections

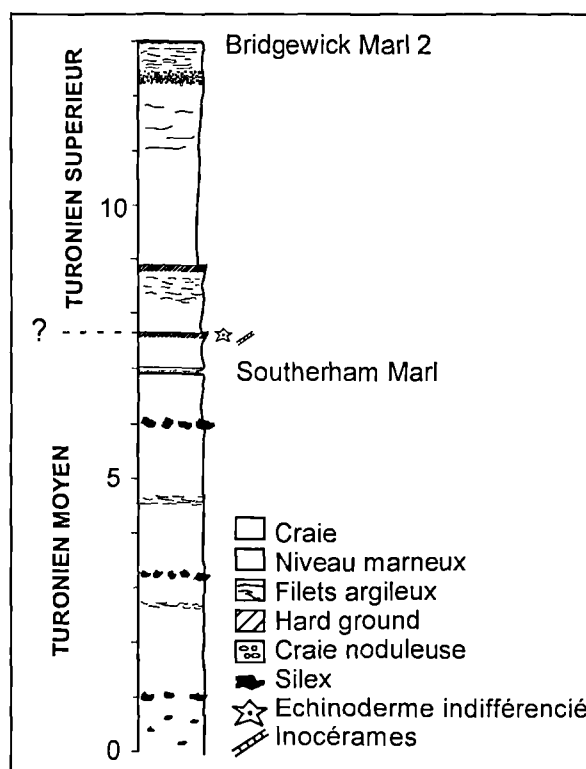


Fig. 2. — Coupe de Senneville, base de la falaise au niveau de la vauvaise d'Eletot montrant notamment le niveau Eletot, équivalent du Southerham marl.

Fig. 2. — Senneville section, base of the cliff at Eletot, showing the Southerham marl.

Mortimore & Pomerol, (1987), Juignet, (1991) et Juignet et Breton, (1994). Elle permet d'observer le niveau Eletot, équivalent du Southerham marl (Mortimore & Pomerol, 1987 ; Amédéo & Robaszynski, 2001a). La coupe présente



une craie blanche à grisâtre, compacte et relativement homogène correspondant à une partie de la Formation de Senneville (craie à lits marneux), formation qui se développe entre le hardground Tilleul 2 à la base et le hardground Senneville 2 à *Subprionocyclus neptuni* au sommet (Quine et Bosence, 1991).

Les silex sont présents à la base sous forme de rognons dispersés et sous forme de trois niveaux repères situés à 1 m, 3,20 m et 6 m. La partie supérieure de la coupe comporte deux hardgrounds et un niveau de craie noduleuse (entre 12,20 m et 12,50 m) pouvant correspondre à une ébauche de hardground qui suggèrent une condensation de la série. La succession comporte des horizons argileux, soit sous forme de craie à minces filets argileux anastomosés, soit sous forme de lits marneux épais de quelques centimètres. Le Southerham marl, lit gris beige décimétrique, s'individualise remarquablement de l'encaissant crayeux (Deconinck *et al.*, 1991 ; Juignet et Breton, 1992 ; 1994 ; Breton, 1998). Au sommet de la coupe, un niveau marneux dont l'épaisseur est réduite à quelques centimètres présente une base ondulée et un toit rectiligne. L'identification de ce deuxième niveau de bentonite comme étant équivalent du Bridgewick marl 2 est fondée sur la présence de macrofaunes caractéristiques entre ce niveau et le Southerham Marl (Mortimore & Pomerol, 1987) : au dessus du Southerham Marl apparaît *Micraster corbovis* (première apparition entre le Southerham marl et les Bridgewick marls dans les coupes du Sud de l'Angleterre), et sous le niveau se développant 5,5 m au dessus du Southerham marl est observé *Orbirhynchia dispansa*, particulièrement commune entre les Bridgewick marls 1 et 2. Sur la coupe de Senneville, le Bridgewick marl 1 ne semble donc pas présent, probablement en raison d'une condensation de la série, par ailleurs attestée par le niveau de craie noduleuse.

*La coupe de Criel* (Pl. XV) - D'une épaisseur de 29 m, cette coupe est majoritairement constituée de craie à silex (fig. 3). Son intérêt majeur est de présenter quatre des cinq horizons de bentonites identifiés dans le Turonien moyen et supérieur comprenant de bas en haut, le Southerham marl, le Caburn marl, le Bridgewick marl 1, et le Lewes marl (Mortimore et Pomerol, 1987).

A la base de la coupe, le Southerham marl, le Caburn marl et le Bridgewick marl 1, de teinte grisâtre à verdâtre, fortement bioturbés, sont situés respectivement aux cotes 2,10 m, 8,80 m et 9,90 m. Au dessus du Southerham marl se développe un hardground épais (1 m), contenant des lamellibranches (pectens, inocérames), des térébratules et quelques nodules de sulfure de fer. Après 5 m de craie à ébauches de hardgrounds, filets argileux et alignements de silex (3 alignements sont repérés), le Caburn marl présente une épaisseur de 5 à 10 cm. Un mètre de craie comportant un niveau de silex sépare cet horizon du Bridgewick marl 1. Ce dernier est assez similaire au Caburn marl, du point de vue de la couleur comme de l'épaisseur.

Quatorze mètres de craie séparent le Bridgewick marl 1 et la bentonite suivante. Dans cet intervalle, 11 niveaux de silex ainsi que 11 hardgrounds (plus ou moins bien développés) sont relevés. La quantité de silex est ici plus élevée que dans le reste de la coupe, alors que le contenu macrofaunistique reste peu diversifié, composé essentiellement de térébratules et d'inocérames. Au dessus du dernier hardground, à la cote 24,3 m, le Lewes marl affleure sous forme d'un lit marneux grisâtre de 10 cm d'épaisseur.

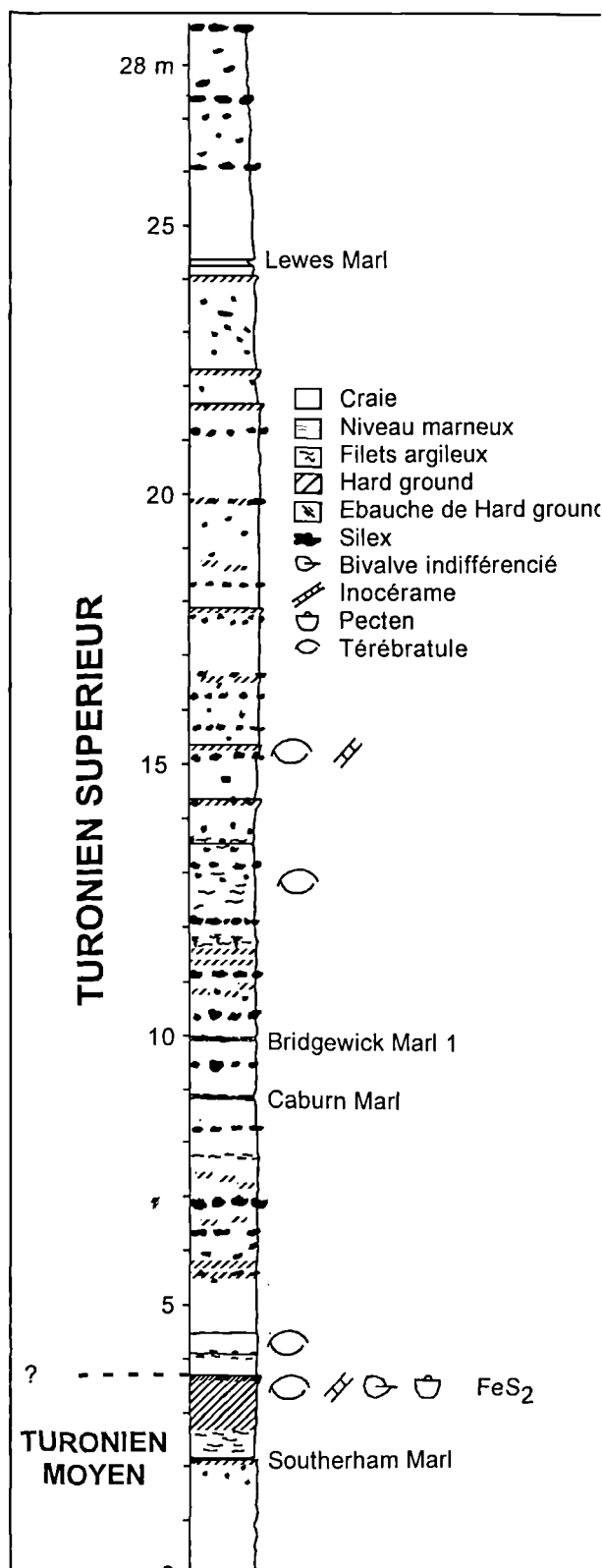


Fig. 3. — Coupe de Criel levée le long des falaises, de Criel en allant vers le Sud-Ouest. Elle permet d'observer notamment les Bridgewick marls 1 et 2, le Caburn et le Lewes marls.

Fig. 3. — Criel section along the cliffs from Criel towards the South-West showing Bridgewick marls 1 and 2, the Caburn and the Lewes marls.

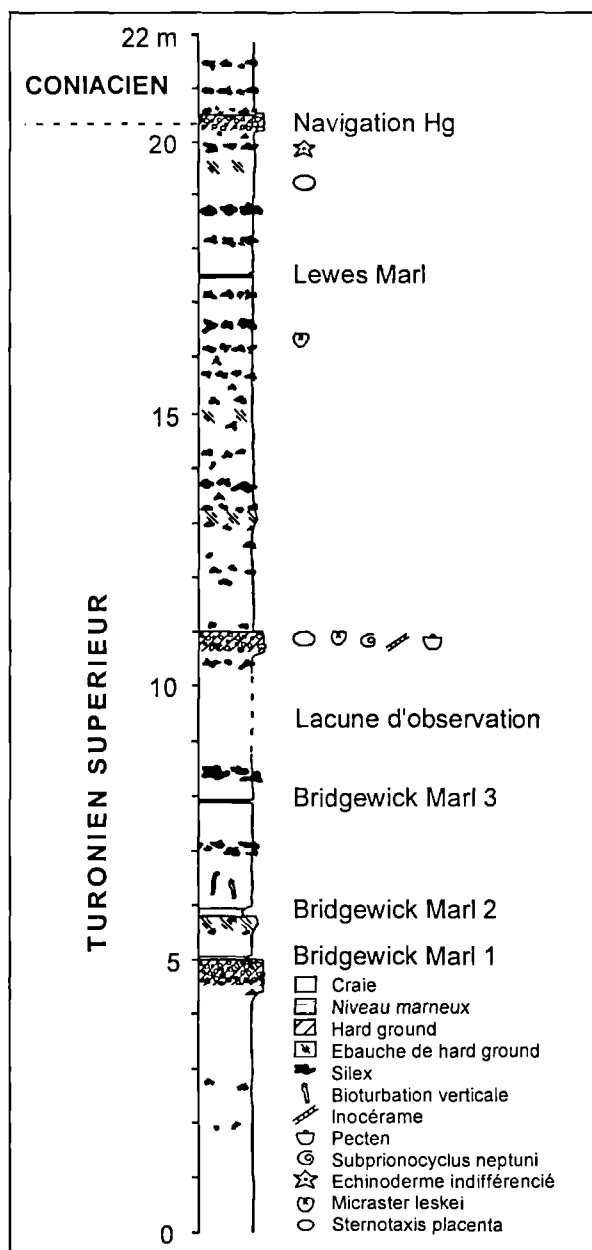


Fig. 4. — Coupe de l'Etoile. Sa position géographique intermédiaire entre la Normandie et le Boulonnais et la présence des trois Bridgewick marls particulièrement bien exposés constituent les principaux intérêts de cette coupe.

Fig. 4. — Etoile section. The main interests of this section are its location between Normandy and Boulonnais and the well-exposed Bridgewick marls.

## 2) Picardie : la coupe de l'Etoile

Décrite ici pour la première fois, cette coupe (Pl. XV) affleure dans une série de trois carrières abandonnées le long de la D112, entre les villages de l'Etoile et de Long, dans la vallée de la Somme à environ 15 km au Sud-Est d'Abbeville. Au total, 22 mètres de craie du Turonien moyen à supérieur sont visibles. De bas en haut la succession est la suivante (fig. 4) :

- 0 à 4,40 m : craie blanc grisâtre à silex rares.

- 4,40 m à 5,00 m : hardground très développé, incluant au tiers inférieur un lit de petits silex ramifiés, et présentant quelques nodules phosphatés à sa limite supérieure.

- 5,00 m à 10,60 m : craie blanche à silex. Trois niveaux marneux correspondant aux Bridgewick marls sont bien visibles respectivement à 5,00 m, 5,80 m et 7,90m. Les Bridgewick marls 1 et 3 constitués par une argile gris-vert présentent une épaisseur de 3 cm. En outre le Bridgewick marl 1 montre de nombreuses bioturbations de type *Chondrites*. Entre ces deux niveaux, le Bridgewick marl 2 constitué de marne verdâtre est beaucoup plus apparent, avec une épaisseur moyenne comprise entre 10 et 15 cm, pouvant atteindre 20 cm localement. D'autres niveaux repères sont également présents :

- à 5,60 m une ébauche de hardground, immédiatement sous le Bridgewick Marl 2 ;

- entre 6,10 m et 6,60 m, des bioturbations tubulaires verticales pouvant atteindre 40 cm de hauteur ;

à 7,00 m, un lit de gros silex en rognons ;

à 8,40 m, un lit de très gros silex dont certains mesurent jusqu'à 30 cm.

10,60 m à 11,00 m : hardground riche en macrofaune, avec en particulier des inocérames, ammonites : *Allocrioceras angustum* (J. de C. Sowerby), et échinides : *Micraster leskei* (Desmoulin) et *Sternotaxis plana* (Mantell).

11,00 à 20,20 m : craie blanche, fine, avec de nombreux lits de silex noirs en rognons. Des niveaux durcis existent à 13,10 m, 15,00 m et 19,50 m, ainsi qu'un mince lit de marne gris-vert à 17,50m qui correspond au Lewes marl. Un lit continu de très gros silex constitue un excellent repère visuel à 18,70m. *Micraster leskei* est recueilli à 16,40 m et *Sternotaxis placenta* (Agassiz) à 19,00 m.

20,25m à 20,50 m : Navigation hardground.

20,50m à 22m (fin de la coupe) : craie blanche, fine, à silex disposés en lits.

Par comparaison avec le Sud de l'Angleterre, la limite Turonien-Coniacien doit être située quelques décimètres sous le Navigation hardground.

C'est en se fondant sur la description de coupes assez comparables situées près de Longpré dans la vallée de la Somme que Briquet (1920) a la première fois attiré l'attention sur l'intérêt majeur des niveaux marneux du Turonien supérieur pour les corrélations.

## 3) Le Boulonnais : Coupes de Caffiers et du Cap Blanc Nez

Nous ne reviendrons pas en détail sur ces coupes qui viennent d'être révisées et décrites par Amédéo et Robaszynski, (2001a et b).

La Coupe de Caffiers (tranchée de chemin de fer) constitue la coupe la plus épaisse et la plus complète du Turonien du Boulonnais. Malheureusement, la coupe est actuellement végétalisée rendant les observations difficiles. Lors du creusement de la tranchée de chemin de fer en 1975, cette coupe permettait d'observer tous les horizons de bentonite du Glynde marl au Lewes marls.

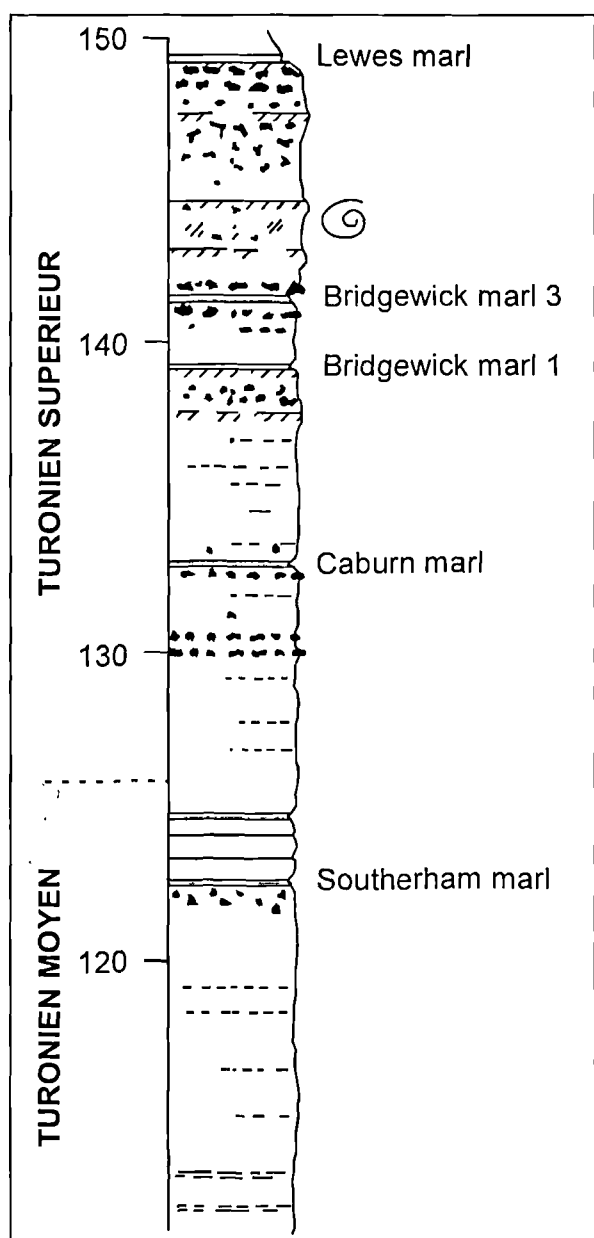


Fig. 5. — Coupe du Cap Blanc Nez (Boulonnais).

Fig. 5. — Cap Blanc Nez section (Boulonnais)

Difficilement accessibles, les quarante mètres constituant le sommet de la coupe du Cap Blanc Nez appartiennent au Turonien moyen à supérieur (fig. 5) (Pl. XV).

La formation des Mottelettes (de 96,80 à 121,90 m dans la succession lithologique publiée par Amédéo & Robaszynski, 2001a) est constituée d'une craie blanche à blanc-gris, parcourue de filets argileux verdâtres. Au dessus, de 121,90 m à 137 m, la formation du Guet correspond à une craie blanche à silex rares. La succession inclut plusieurs niveaux marneux pluricentimétriques à décimétriques, dont les Southerham marls (base à 122,5 m) et le Caburn marl (133 m).

Enfin, les treize derniers mètres de la coupe (formation de Caffiers) affleurent sous forme d'une craie blanche à nombreux silex et hardgrounds. La fréquence de *Subprionocyclus neptuni* est notée à 143,80 m dans cet intervalle qui correspond à un intervalle transgressif (Amédéo & Robaszynski, 2001a).

### III. — MÉTHODES ET RÉSULTATS

Les horizons de bentonites ont fait l'objet d'une analyse de leur fraction argileuse par diffraction des rayons X selon les méthodes préconisées par Holtzapfel (1985) et Moore & Reynolds, (1989). Par ailleurs, nous nous sommes attachés à étudier la minéralogie de la fraction silteuse en vue de la détermination des minéraux d'origine volcanique. Le protocole de traitement des échantillons est celui décrit par Bohor et Triplehorn (1993). Après décalcification à l'acide chlorhydrique (N/5), plusieurs lavages de la solution obtenue sont effectués. Puis, un passage sur colonne de quatre tamis (100, 80, 50 et 32  $\mu\text{m}$ ) est réalisé ; chaque classe granulométrique obtenue est récupérée dans une boîte de pétri et mise à sécher à l'étuve, jusqu'à évaporation totale de l'eau distillée. L'observation au microscope polarisant de chaque refus de tamis permet de repérer les minéraux volcaniques grâce à leurs propriétés optiques, puis de les placer sur plot à l'aide d'une aiguille montée, en vue de leur observation au MEB et de leur analyse à la sonde EDS.

Des analyses chimiques des horizons de bentonites ont été réalisées au CRPG CNRS, Nancy. Les éléments majeurs ont été dosés par ICP-AES, les éléments traces et les terres rares par ICP-MS.

#### 1) Cortèges argileux

Dans les trois secteurs étudiés (Normandie, Picardie et Boulonnais), les niveaux échantillonnés présentent des cortèges argileux constitués à plus de 90% par la smectite, ce qui est conforme aux analyses antérieures présentées sur des niveaux comparables (Deconinck *et al.*, 1991 ; Deconinck & Chamley, 1995 ; Vanderaverroet *et al.*, 2000). Le Bridgewick marl 2 de la coupe de l'Etoile constitue une exception, puisqu'il contient des proportions notables d'illite en plus de la smectite.

#### 2) Fraction silteuse

L'étude de la fraction comprise entre 100 et 32  $\mu\text{m}$  des horizons échantillonnés a permis d'isoler des cristaux automorphes. En général, les cristaux sont concentrés dans les fractions inférieures à 80  $\mu\text{m}$  où ils représentent entre 1 et 5 % de la fraction non carbonatée ; ils sont rares dans la fraction comprise entre 100 et 80  $\mu\text{m}$ .

Les particules d'origine volcanique observées au microscope électronique à balayage comprennent des cristaux automorphes de zircon, de quartz et de feldspath alcalin (Pl. XVI). Des esquilles de verre volcanique très riches en silice (85%, Godet, 2002) sont également identifiées, mais elles sont rares en raison de leur forte altération en argiles.

Eléments majeurs (wt %)	AG1 Southerham Senneville Normandie	My 20.20 Caburn Mimoyecques Boulonnais	My 27.5 BM2 Mimoyecques Boulonnais	AG5 Lewes Criel Normandie
SiO <sub>2</sub>	24.32	15.91	6.64	5.91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6.61	4.85	2.02	1.73
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.30	1.00	0.40	0.30
MnO	<0.03	<0.03	<0.03	<0.03
MgO	2.73	1.44	0.75	0.84
CaO	32.53	39.59	47.80	49.37
Na <sub>2</sub> O	0.16	<D.L.	<D.L.	0.18
K <sub>2</sub> O	0.32	0.27	0.09	0.12
TiO <sub>2</sub>	0.19	0.14	<D.L.	0.05
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.05	<D.L.	<D.L.	<D.L.
<b>Eléments traces (ppm)</b>				
As	2.67	0.58	0.71	<D.L.
Ba	30.4	32.2	19.8	14.5
Be	<D.L.	<D.L.	traces	<D.L.
Bi	0.5	0.28	0.09	0.10
Cd	0.57	0.39	0.26	<D.L.
Co	1.84	3.23	2.91	1.5
Cr	7.8	10.9	8.7	5.3
Cs	0.78	1.35	0.36	0.26
Cu	16.1	9.6	8.9	10.7
Ga	15.6	11.1	3.72	3.86
Ge	0.43	0.43	0.27	0.21
Hf	11.4	7.88	2.23	3.00
In	0.31	<D.L.	<D.L.	<D.L.
Mo	<D.L.	<D.L.	<D.L.	<D.L.
Nb	20.3	16.9	5.37	6.37
Ni	23.3	15.5	15.1	<D.L.
Pb	17.4	9.59	4.66	4.36
Rb	14.8	14.7	7.21	5.58
Sb	0.55	0.10	0.12	<D.L.
Sn	4.28	3.62	1.47	1.44
Sr	457	507	543	419
Ta	4.54	3.58	1.28	1.45
Th	12.1	8.69	4.45	3.74
U	0.87	0.78	0.47	0.36
V	18.8	21.5	12.6	8.6
W	1.77	0.23	<D.L.	0.84
Y	14.5	19.5	13.6	12.8
Zn	149	58.0	33.2	37.3
Zr	369	255	58.7	86.6
<b>Terres rares (ppm)</b>				
La	17.4	14.6	11.6	13.3
Ce	36.2	25.8	17.9	22.4
Pr	4.8	3.91	2.75	3.14
Nd	18.5	14.7	10.3	12.4
Sm	3.69	3.69	2.28	2.62
Eu	0.61	0.52	0.33	0.37
Gd	2.86	2.74	2.16	2.21
Tb	0.45	0.50	0.32	0.35
Dy	2.68	2.99	1.85	1.79
Ho	0.48	0.58	0.35	0.35
Er	1.22	1.70	0.83	0.92
Tm	0.19	0.21	0.13	0.13
Yb	1.21	1.49	0.77	0.80
Lu	0.18	0.21	0.13	0.12

Tabl. I. — Composition chimique de quelques horizons de bentonites turoniennes.

Table I. — Chemical composition of some Turonian bentonites

### 3) Données géochimiques

Nous considérons ici les quatre horizons de bentonites (Southerham, Caburn, Bridgewick 1 et Lewes marl) échantillonnés en Normandie et dans le Boulonnais (Tabl. I). Ces données sont à prendre avec prudence, car la constitution chimique des bentonites est fortement dépendante des mélanges avec l'encaissant notamment à cause de la bioturbation, des tris subis par les particules volcaniques lors de leur transport aériens et de l'altération météorique.

La teneur en CaO est fortement dépendante de la bioturbation qui introduit plus ou moins de craie au sein de l'argile. Cette teneur influence fortement l'abondance des autres éléments. Il est toutefois possible d'étudier des rapports d'éléments réputés immobiles pour identifier la nature du volcanisme auquel se rattache les bentonites turoniennes (voir ci-dessous).

Les profils de terres rares des bentonites normalisées par rapport aux Cody Shales sont caractérisés par une anomalie négative en europium (héritée du matériel volcanique différencié originel qui lui-même présente une telle anomalie), en cérium et par un enrichissement en terres rares légères comme c'est le cas pour la plupart des bentonites issues d'un magma rhyo-dacitique (Huff *et al.*, 1993 ; Wray, 1999 ; Jeans *et al.*, 2000). La figure 6 présente les profils obtenus au cours de cette étude. L'anomalie en cérium pourrait être liée à l'incorporation de phosphates ou de carbonates au sein de la bentonite en raison de la bioturbation (Wray, 1999) ou résulter de l'altération des particules volcaniques sous l'influence de l'eau de mer.

## VI. — DISCUSSION

### 1) Identification des niveaux de bentonite

Grâce aux analyses minéralogiques et géochimiques, la nature volcanique de certains horizons est confirmée. C'est le cas du Southerham Marl, du Caburn Marl, du Bridgewick Marl 1 et du Lewes Marl. Quant au Bridgewick Marl 2, son origine reste ambiguë.

En effet, les travaux de Wray (1999) avaient conclu à l'origine détritique de ce niveau, ce que semble confirmer l'analyse de son cortège argileux, puisqu'à la smectite prédominante s'ajoute de l'illite, témoignant en faveur d'une origine détritique (Godet, 2002). Les profils de terres rares réalisés à partir d'échantillons de Normandie montrent une anomalie négative en europium caractéristique des niveaux volcaniques. En revanche, le Bridgewick Marl 2 de la coupe de Mimoyecques (Boulonnais) ne présente pas l'anomalie en europium (Vanderaveroet *et al.* 2000). Cet horizon résulte donc très probablement d'apports mixtes, volcaniques et détritiques.

En résumé, l'origine volcanique du Southerham marl, du Caburn marl, du Bridgewick marl 1 et du Lewes marl peut être considérée comme certaine. La bentonite Bridgewick marl 2 semble avoir subi des apports détritiques locaux s'exprimant notamment par la présence d'illite détritique dans son cortège argileux.

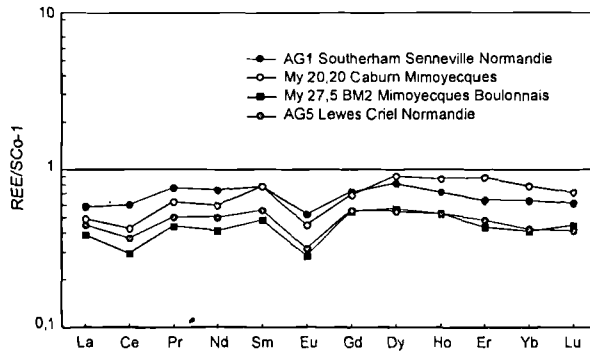


Fig. 6. — Profils de terres rares normalisés par rapport aux Cody Shales.

Fig. 6. — *Cody shales-normalized Rare Earth Elements profiles.*

## 2) Corrélation des bentonites

A partir de l'identification des bentonites dans les différentes coupes, des corrélations ont pu être établies (fig. 7). En admettant une compaction des craies identiques dans les différents secteurs d'étude, elles mettent en évidence des taux de sédimentation variables d'un secteur à l'autre. Dans la partie inférieure du Turonien supérieur, entre le Southerham et le Bridgewick marl 1, le Boulonnais est beaucoup plus subsident que la Normandie qui constituait un haut-fond. En revanche, dans la partie supérieure du Turonien supérieur, entre le Bridgewick marl 1 et le Lewes marl, le secteur normand devient au moins aussi subsident que le Boulonnais. Cette évolution est probablement liée à l'instabilité tectonique qui affecte le bassin Anglo-parisien au Turonien supérieur/Coniacien inférieur (Mortimore & Pomerol, 1997; Mortimore *et al.*, 1998).

## 3) Nature du volcanisme

Grâce aux analyses géochimiques, la construction de diagrammes tectono-magmatiques est envisageable. En particulier, le diagramme de Winchester & Floyd (1977), mettant en relation les rapports  $Zr/TiO_2$  et  $Nb/Y$  en fonction des différents types de roches volcaniques, permet de déterminer la nature du volcanisme à l'origine des bentonites turoniennes. Les points correspondants au Southerham Marl (Normandie), au Caburn Marl (Boulonnais) et au Lewes Marl (Normandie), ont été reportés sur la figure 8. Les échantillons se situent dans le champ des rhyolites, comendites et pantellérites et semble donc dériver de magmas acides, ce qu'indique par ailleurs la très forte teneur en silice des verres volcaniques et la minéralogie des phases pyroclastiques résiduelles (quartz, zircon). Ces résultats sont en parfait accord avec ceux publiés antérieurement sur des niveaux comparables (Pacey, 1984; Deconinck *et al.*, 1991; Wray, 1999).

## 4) Fréquence des événements volcaniques

Il est intéressant de s'interroger sur la fréquence des événements volcaniques à l'origine des bentonites du Turonien supérieur. Ces événements qui ont conduit à d'épais niveaux de grande extension correspondent à l'expression sédimentaire d'éruptions extrêmement importantes. De telles éruptions ne sont pas connues dans la période historique.

L'ordre de grandeur de ces éruptions, pourrait se rapprocher de l'éruption du Toba, 800 à 1000 km<sup>3</sup> de cendres émises, corrélables sur des distances atteignant 3000 km. Cette éruption s'est produite il y a environ 70 000 ans (Schulz *et al.*, 2002).

En première approximation, on peut considérer que le Southerham marl marque la limite entre le Turonien moyen et le Turonien supérieur. Par ailleurs, le Lewes marl constitue le dernier niveau de bentonite avant le Navigation hardground qui marque approximativement la limite Turonien/Coniacien. Au Turonien supérieur, 5 événements volcaniques majeurs à l'origine des horizons de bentonites sont donc enregistrés si l'on prend en compte le Bridgewick marl 2. L'âge de la limite entre le Turonien et le Coniacien est voisin de  $88,7 \pm 0,5$  Ma selon Obradovitch (1993), voisin de  $89 \pm 0,5$  Ma d'après Gradstein *et al.* (1994). La limite entre le Turonien moyen et supérieur est moins bien établie, mais se situerait autour de 90,3 Ma. On peut donc estimer la durée du Turonien supérieur entre 1,1 et 2,1 Ma. Les événements volcaniques paroxysmaux à l'origine des bentonites interviendraient donc en moyenne tous les 220 000 à 420 000 ans. Qu'en est-il des éruptions volcaniques mineures telles que celles que nous connaissons dans la période historique ?

Par rapport à l'éruption du Toba, ces éruptions émettent des volumes de cendres beaucoup moins importants, de l'ordre de quelques km<sup>3</sup> (Pinatubo, 7 km<sup>3</sup> en 1991) à dizaines de km<sup>3</sup>. La plus importante éruption historique connue, celle du Tambora qui eut lieu en 1815 délivra environ 150 km<sup>3</sup> de cendres. Ces cendres peuvent constituer des niveaux significativement épais à proximité des volcans actifs, mais à grande distance, l'épaisseur des lits de cendres diminuent rapidement. Les lits de cendres étant peu épais, ils sont rapidement dilués dans les sédiments par les organismes benthiques à l'origine d'une bioturbation importante. Ces cendres sont donc difficilement préservées. Dans les zones volcaniques actives, la fréquence de ces éruptions est très importante de l'ordre de la dizaine d'années. Il est donc vraisemblable qu'au cours du Turonien supérieur, des éruptions volcaniques relativement peu importantes constituaient un bruit de fond de l'activité volcanique et qu'occasionnellement, une éruption beaucoup plus importante se produisait. Ce bruit de fond « volcanique » a nécessairement apporté de la silice facilement mobilisable au milieu marin.

## 5) Réflexion sur l'origine des silex

La question de l'origine des silex de la craie est ancienne. Il est classiquement admis que la silice a une origine biogénique et provient de la dissolution puis de la reprécipitation d'organismes siliceux (diatomées, radiolaires, et surtout éponges siliceuses). L'opale A sécrétée par ces organismes provenait de la silice dissoute dans l'océan crétacé, la silice provenant elle-même de l'hydrolyse des silicates affleurant sur les masses continentales émergées. Certains auteurs ont proposé que la silice provenait aussi de l'altération sous-marine des basaltes océaniques, notamment au Cénomaniens/Turonien, période marquée par une accréation importante (Pomerol & Aubry, 1977). La présence de bentonites au Turonien supérieur montre que le volcanisme aérien constituait sûrement une source importante de silice.

Plusieurs observations suggèrent que les silex pourraient avoir un lien avec le volcanisme aérien.

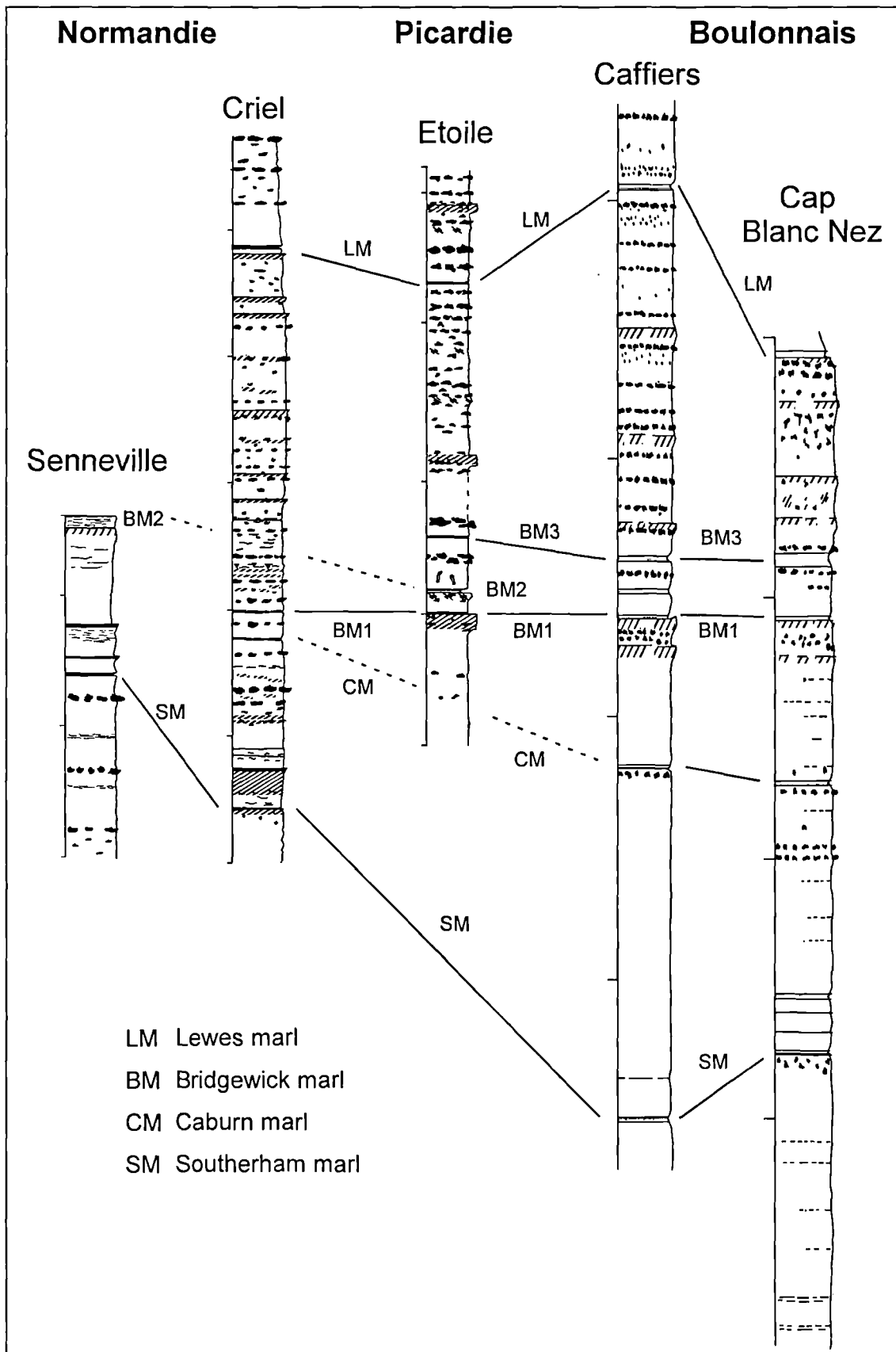


Fig. 7. — Corrélation des coupes étudiées d'après les niveaux de bentonites.

Fig. 7. — Correlation of the studied section according to the bentonites.

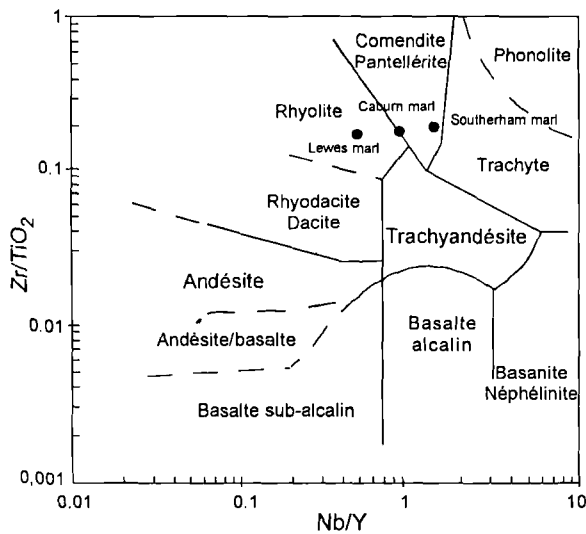


Fig. 8. — Diagramme tectono-magmatique de Winchester et Floyd (1977) montrant le caractère acide du volcanisme à l'origine des bentonites turoniennes.

Fig. 8. — Winchester and Floyd's diagram showing that the Turonian bentonites originate from acid volcanism.

- Si l'on considère l'ensemble du Turonien, la fréquence des silex augmente fortement à partir du Glynde marl (plus ancienne bentonite du Turonien) en Angleterre comme dans le Nord-Ouest du bassin de Paris. Il semble donc que l'activité volcanique aérienne initiée au Turonien moyen coïncide avec l'apparition des silex.

- Certains alignements de silex sont corrélables sur de grandes distances à l'image des bentonites. L'exemple du Lewes flint, et du Caburn flint, alignements de rognons de silex corrélables du Sud de l'Angleterre au Nord-Ouest du Bassin de Paris est caractéristique.

- Dans le Coniacien moyen, l'East Cliff marl et les Hope Points marls niveaux marneux décrits à Douvres (Gale, 1996) n'ont pas d'équivalents dans le Boulonnais, mais Amédro et Robaszynski (2000) mentionnent que « curieusement, plusieurs minces lits de silex tabulaires existent à l'emplacement présumé des niveaux marneux à Caffiers (Boulonnais)... Il est peu probable que cette double coïncidence soit le fait du hasard ce qui suscite une question : les niveaux marneux originellement présents n'auraient-ils pas été oblitérés par une silicification ? Deux arguments macro- et micropaléontologiques confortent l'idée d'une corrélation entre les niveaux marneux du Kent et les lits de silex tabulaire du Boulonnais ». Cette observation suggère un passage latéral possible entre niveau marneux et silex. Par ailleurs, des silicifications (chert, veines de silice) associées à

des bentonites ont été signalées par Kolata *et al.* et Merriman & Roberts (1990).

Ces trois observations suggèrent un lien génétique entre les deux types d'événements sédimentaires ; bentonites et alignements de silex seraient issus *pro parte* respectivement directement et indirectement du volcanisme aérien. Les explosions occasionnelles de forte intensité seraient à l'origine des bentonites, alors que les émissions fréquentes d'extension moindre et en quantités plus faibles de matériel pyroclastique seraient à l'origine des alignements de silex. Cette origine serait vraisemblablement indirecte. La silice d'origine volcanique pourrait favoriser le développement d'organismes siliceux qui seraient eux mêmes à l'origine des lits de silex. Les particules d'origine volcanique, pourraient également jouer le rôle de nucléi des rognons de silex ce qui expliquerait la grande extension de leurs alignements. Cette hypothèse est toutefois critiquable, car on peut s'interroger sur l'absence de silex dans les bentonites. Cette absence peut néanmoins s'expliquer de deux manières ; d'une part, les éruptions paroxysmales ont probablement perturbé les écosystèmes et gêné le développement des organismes siliceux, d'autre part, l'argilosité importante, conséquence de l'altération des verres volcaniques a pu empêcher la précipitation de silice sous forme de rognons de silex.

En résumé, les bentonites correspondraient à des éruptions paroxysmales (du type de celle de Toba) tandis que les alignements de silex correspondraient à des éruptions volcaniques de moindre extension et volumétriquement moins importantes.

## V. — CONCLUSION

Une activité volcanique importante est enregistrée dans le Turonien moyen à supérieur du Nord-Ouest du bassin de Paris. Cette activité s'exprime clairement par la préservation d'horizons de bentonites, niveaux argileux résultant de l'altération sous-marines de verres volcaniques en smectites. L'épaisseur relativement importante des bentonites (quelques centimètres) et leur très grande extension suggèrent qu'elles ont pour origine des éruptions explosives ultrapliniennes majeures dont la périodicité serait de plusieurs dizaines voire centaines de milliers d'années. Des éruptions de moindre importance telles que celles connues dans la période historique, dont la périodicité est de quelques années à quelques dizaines d'années se sont nécessairement produites également, mais le trop faible volume de cendres émis n'a pas permis leur préservation sous forme de bentonites. Cette activité volcanique aérienne est à l'origine d'apports de silice à la « Mer de la Craie », silice qui pourrait en partie jouer un rôle dans l'apport de silice nécessaire à la formation des silex. Les alignements de silex, dont certains sont corrélables sur de grande distance à l'image des bentonites pourraient indirectement résulter de retombées de cendres volcaniques.

## BIBLIOGRAPHIE

AMÉDRO F. et ROBASZYNSKI F. (2000). - Les craies à silex du Turonien supérieur au Santonien du Boulonnais (France) au regard de la stratigraphie événementielle. Comparaison avec le Kent (U.K.). *Géol. Fr.*, 4, p. 36-56.

AMÉDRO F. et ROBASZYNSKI F. (2001a). - Les craies turoniennes du Boulonnais (France) au regard de la stratigraphie événementielle. Comparaison avec le Kent (UK) et la Normandie (F). *Bull. trim. Soc. Géol. Normandie Amis Muséum du Havre* 87, 2 et 3, 2000 (2001), p. 31-49.

- AMÉDRO F. et ROBASZYNSKI F. (2001b). - Evénements sédimentaires et bio-écologiques dans les craies du Boulonnais : des repères pour des corrélations précises intra- et inter bassins. *Ann. Soc. Géol. Nord T.8* (2<sup>ème</sup> série), p.159-171.
- BRIQUET A. (1920).- Turonien supérieur et Sénonien inférieur dans le Nord de la France. *Ann. Soc. Géol. Nord*, 44, p. 1-11.
- BOHOR B.F. et TRIPLEHORN D.M. (1993). - Tonsteins: Altered Volcanic-Ash Layers in Coal-Bearing Sequences: Boulder, Colorado. *Geol. Soc. America, Special paper* 285, p. 1-44.
- BRETON G. (1998). - Excursions géologiques sur le littoral entre Le Havre et Fécamp (Normandie, France). *Bull. trim. Soc. Géol. Normandie et Amis Muséum du Havre*. T.85, Fasc.1, p. 1-39.
- DECONINCK J.F., AMÉDRO F., DESPRAIRIES A., JUIGNET P. et ROBASZYNSKI F. (1991). - Niveaux repères de bentonite d'origine volcanique dans les craies du Turonien du Boulonnais et de Haute-Normandie. *C. R. Acad. Sci. Paris* 312 (II), p. 897-903.
- DECONINCK J.F. et CHAMLEY H. (1995). - Diversity of smectite origins in Late Cretaceous sediments: example of chalks from Northern France. *Clay Minerals* 30, p. 365-379.
- ERNST G., SCHMID F. et SEIBERTZ E. (1983). - Event-Stratigraphie im Cenoman und Turon von NW-Deutschland. *Zitteliana* 10, p. 531-554.
- GALE A.S. (1996). - Turonian correlation and sequence stratigraphy of the chalk in southern England. In *Sequence Stratigraphy in British Geology* Hesselbo S.P. & Parkinson D.N. (eds), *Geol. Soc. special publication, London* 103, p. 177-195.
- GODET A. (2002).- Enregistrement sédimentaire d'événements volcaniques au Turonien moyen et supérieur dans le Bassin de Paris. *D.E.A. Lille*, 50 p.
- GRADSTEIN F.M., AGTERBERG F.P., OGG J.G., HARDENBOL J., VAN VEEN P., THIERRY J., et HUANG Z.(1994) A Mesozoic time scale. *Journ. Geophys. Res.*, 99, B12, p. 24051-24074.
- GRIM R.E. et GÜVEN N. (1978). Bentonites : Geology, Mineralogy, Properties and Uses. *Developments in Sedimentology* 24: p. 1-160.
- HOLTZAPFFEL T. (1985). - Les minéraux argileux : préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Publication SGN*, n°12: 135 p.
- HUFF W.D., MERRIMAN R.J., MORGAN D.J. et ROBERTS B. (1993). - Distribution and tectonic setting of Ordovician K - bentonites in the United Kingdom. *Geol. Mag.* 130(1): p. 93-100.
- JEANS C.V., WRAY D.S., MERRIMAN R.J. et FISHER M.J. (2000). - Volcanogenic clays in Jurassic and Cretaceous strata of England and the North Sea Basin. *Clay Minerals* 35: p. 25-55.
- JUIGNET P. (1991). - Les craies du littoral du Pays de Caux. Structures sédimentaires et tectoniques. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, 28, p. 46-58.
- JUIGNET P. et BRETON G. (1992). - Mid-Cretaceous sequence stratigraphy and sedimentary cyclicity in the Western Paris Basin." *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 91: p. 197-218.
- JUIGNET P. et BRETON G. (1994). - Stratigraphie, rythmes sédimentaires et eustatisme dans les craies turoniennes de la région de Fécamp (Seine-Maritime, France). Expression et signification des rythmes de la craie." *Bull. trim. Soc. Géol. Normandie et Amis Muséum du Havre*, T.81, Fasc.2: p. 55-81.
- KOLATA D.R., HUFF W.D. & BERGSTRÖM S.M. (1996).- Ordovician K-bentonites of Eastern North America. *Special paper, Geol. Soc. Am.*, 313, 1 – 84.
- MERRIMAN R.J. & ROBERTS B. (1990).- Metabentonites in the Moffat Shale Group, Southern Uplands of Scotland : geochemical evidence of ensialic marginal basin volcanism. *Geol. Mag.*, 127, p. 259-271.
- MOORE D.M. & REYNOLDS R.C. (1989). - *X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals*. Oxford University Press. 322 p.
- MORTIMORE, R.N. (1983). - The stratigraphy and sedimentation of the Turonian-Campanian in the Southern Province of England. *Zitteliana* 10, p. 27-41.
- MORTIMORE R.N. (1986). - Stratigraphy of the Upper Cretaceous White Chalk of Sussex. *Proc. Geol. Ass.*, 97, p. 97-139.
- MORTIMORE R.N. et POMEROL B. (1987). - Correlation of the Upper Cretaceous White Chalk (Turonian to Campanian) in the Anglo-Paris basin. *Proc. Geol. Assoc.* 98, (2), p. 97-143.
- MORTIMORE R.N. et POMEROL B. (1997). - Upper Cretaceous tectonic phases and end Cretaceous inversion in the Chalk of the Anglo-Paris Basin. *Proc. Geol. Assoc.* 108, p. 231-255.
- MORTIMORE R.N., WOOD, C., POMEROL, B. et ERNST, G. (1998). - Dating the phases of the subhercynian tectonic epoch : Late Cretaceous tectonics and eustatics in the Cretaceous basins of northern Germany compared with the Anglo-Paris Basin. *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie* 1, 1996 (11/12) , p. 1349-1401 ; Stuttgart.
- OBRADOVITCH J.D. (1993). - A Cretaceous time Scale, in Caldwell, W.G.E. & Kauffman E.G. eds., *Evolution of the Western interior Basin: Geol. Assoc. Canada, Special Paper*, 39, p. 379-396.
- PACEY N.R. (1984). - Bentonites in the chalks of central eastern England and their relation to the opening of the Northeast Atlantic. *Earth Planet. Science Lett.* 67, p. 48-60.
- POMEROL B. et AUBRY M.P. (1977). - Relation between western European chalks and opening of the North Atlantic. *J. Sed. Petrol.*, 47/3, p. 1027-1035.
- QUINE M. et BOSENCE D. (1991). - Stratal geometries, facies and sea-floor erosion in Upper Cretaceous Chalk, Normandy, France. *Sedimentology* 38: p. 1113-1152.
- SCHULZ H., EMEIS K. C., ERLLENKEUSER H., VON RAD U. et ROLF C. (2002).- The Toba Volcanic Event and interstadial/Stadial Climates at the marine Isotopic Stage 5 to 4 Transition in the Northern Indian Ocean. *Quat. Research.*, 57, p. 22-31.
- SIEBERTZ E. et VORTISCH W. (1979). - Zur Stratigraphie, Petrologie und Genese einer Bentonit-Lage aus dem oberen Mittle-Turon (Oberkreide) des südöstlichen Münsterlandes. *Geol. Rundsch.* 68/2, p. 649-679.
- VANDERAVEROET P., AMÉDRO F., COLLETÉ C., DECONINCK J.F., RECOURT P. et ROBASZYNSKI F. (2000). - Caractérisation et extension de niveaux repères de bentonites dans le Turonien supérieur du Bassin de Paris (Boulonnais, Aube). *Geodiversitas* 22 (3), p. 457-469.
- WINCHESTER J.A., et FLOYD P.A. (1977).- Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements. *Chemical geology*, 20, p. 325-343.



- WRAY D.S. (1995). - *Origin of clay-rich beds in Turonian chalks from Lower Saxony, Germany - a rare-earth element study.* *Chem. Geol.* 119, p. 161-173.
- WRAY D.S. (1999). - *Identification and long-range correlation of bentonites in Turonian-Coniacian (Upper Cretaceous) chalks of northwest Europe.* *Geol. Mag.* 136 (4), p. 361-371.
- WRAY D.S. et GALE A.S. (1993). - *Geochemical correlation of marl bands in Turonian chalks of the Anglo-Paris Basin.* In : *High resolution stratigraphy*, Hailwood, E.A. & KIDD, R.B. (eds). *Geol. Soc. Special Publication, London* 70, p. 211-226.
- WRAY D.S., WOOD C.J., ERNST G. et KAPLAN U. (1996). - *Geochemical subdivision and correlation of clay-rich beds in Turonian sediments in northern Germany.* *Terra Nova* 8, p. 603-610.
- ZIMMERLE W. (1989). - *Vestiges of volcanic activity in Cretaceous sediments of Europe.* In Wiedmann, J. (Ed.), *Cretaceous of the Western Tethys-Proceedings 3rd International Cretaceous Symposium*, Tübingen, 1987. E. Schweizerbart, Stuttgart, p. 951-987.

PLANCHE XV

Coupes étudiées. 1.- Coupe de Senneville, montrant le Southerham marl = niveau Eletot, 2.- Coupe de Criel, partie basale montrant le Caburn marl et le Bridgewick marl 1 (BM1), 3.- Coupe de Criel, partie sommitale montrant le Lewes marl. 4.- Détail du Lewes marl à Criel, 5.- Coupe de l'Étoile, BM = Bridgewick marl. 5.- Coupe du Cap Blanc Nez (Turonien moyen et supérieur)

*Studied sections 1.- Senneville section showing the Southerham marl, 2.- Criel section, Lower part showing the Caburn and the Bridgewick marl 1(BM1) 3.-Criel section, upper part showing the Lewes marl. 4.- Detail of the Lewes marl at Criel, 5.- Etoile section, BM = Bridgewick, 5.- Cap Blanc Nez section (Middle and Upper Turonian).*

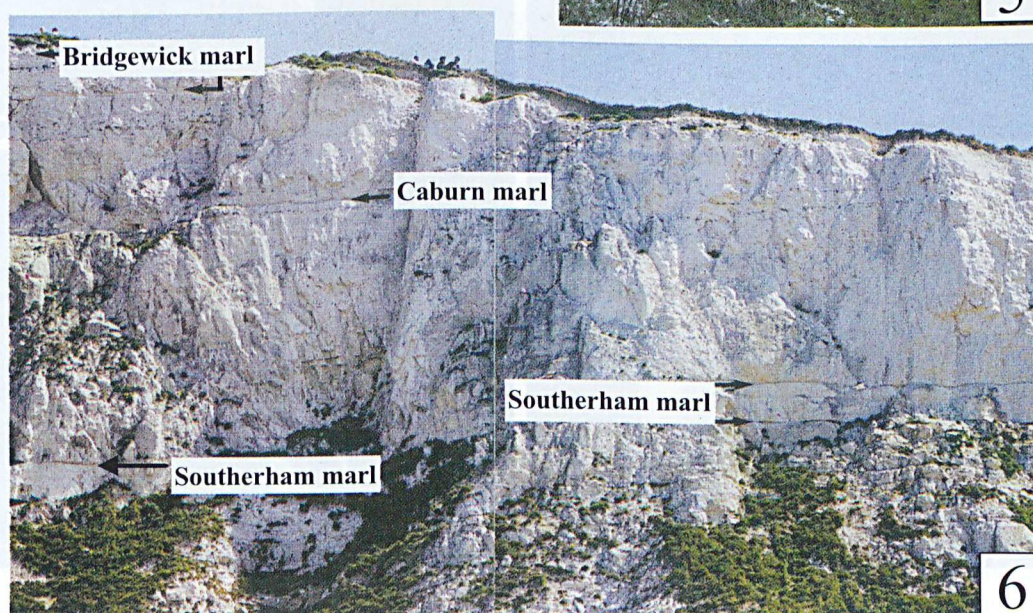
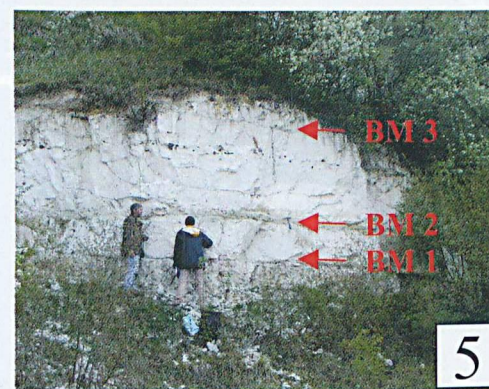
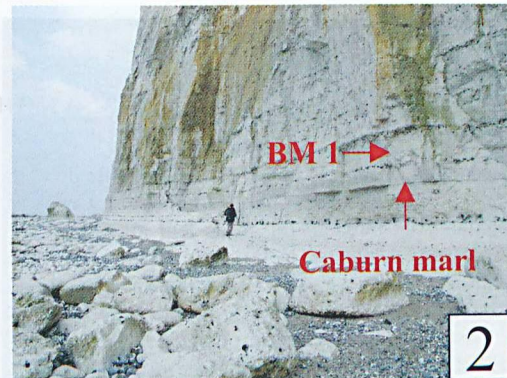
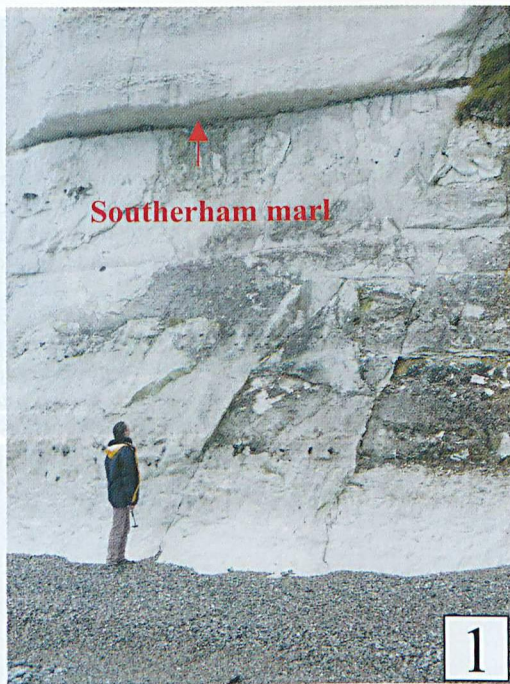
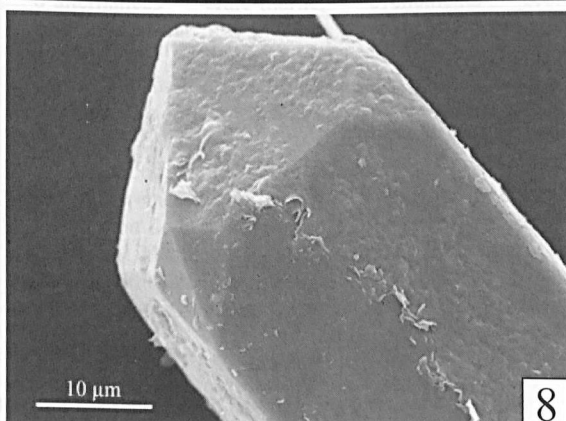
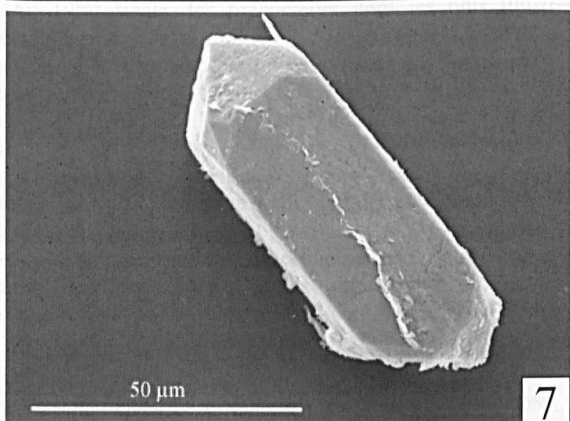
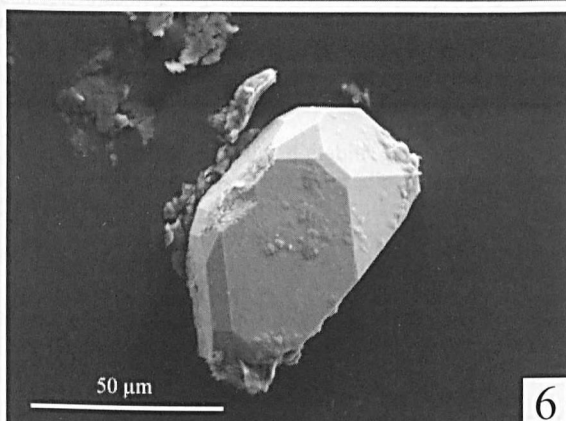
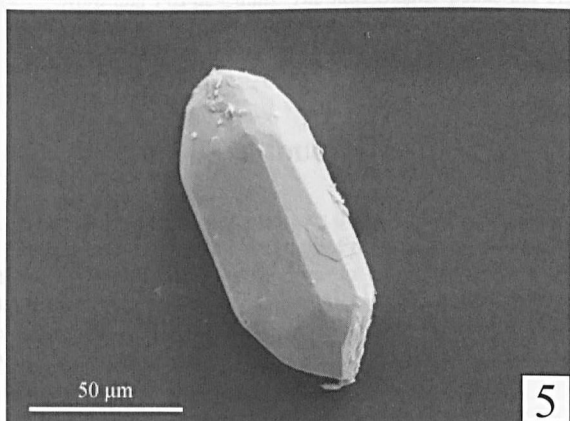
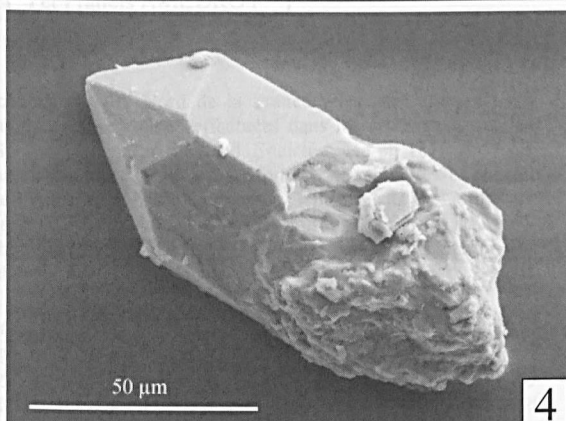
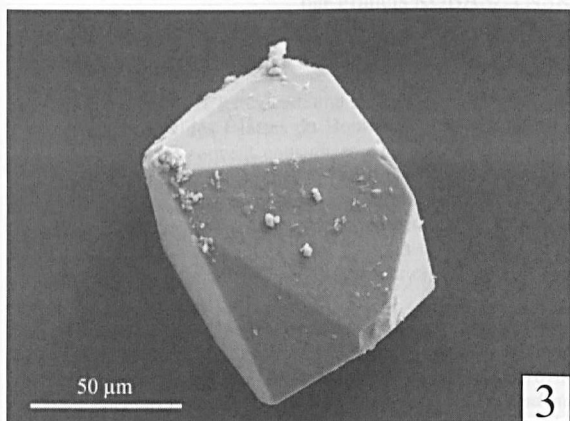
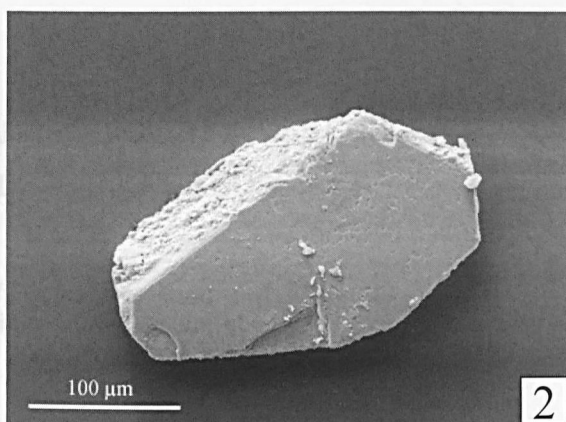
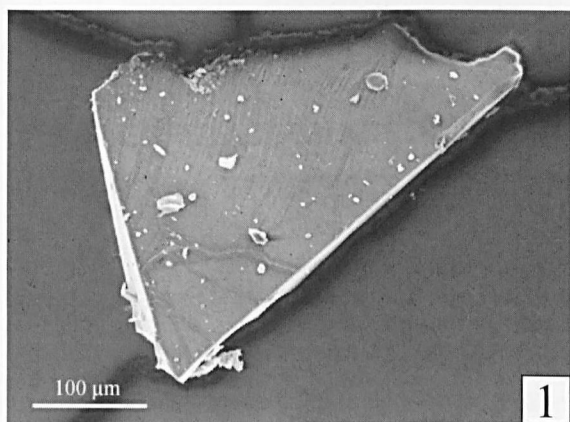


PLANCHE XVI

Particules volcaniques observées au MEB. 1 – Esquille de verre volcanique (Lewes marl, Normandie). Ces particules sont rares en raison de leur altération en smectites. L'analyse à la sonde EDS révèle une grande richesse en silice (environ 85%). 2 – Feldspath alcalin, (Lewes marl, Normandie) 3 et 4 - Cristaux automorphes de quartz. (3, Caburn marl, 4 Lewes marl, Normandie) 5,6,7,8 - Cristaux de zircon. (5, Bridgewick marl 1, Normandie; 6, Bridgewick marl 1 Carrière de l'Etoile, Picardie; 7 et 8 Caburn marl, Normandie)

*SEM micrographs of volcanic particles. 1 – Glass shards, (Lewes marl, Normandy) these particles are uncommon because of their replacement by smectites. EDS chemical analyses reveals high silica content (around 85%). 2 – Alkali feldspar (Lewes marl, Normandy), 3 and 4 – Euhedral crystals of quartz, (3, Caburn marl, 4 Lewes marl, Normandy) 5,6,7,8 - euhedral crystals of zircon (5, Bridgewick marl 1, Normandy; 6, Bridgewick marl 1 Etoile quarry, Picardy; 7 and 8 Caburn marl, Normandy)*





## LE CRÉTACÉ DU NORD DE LA FRANCE : ÉVOLUTION DES CONCEPTS ET ASPECTS NOUVEAUX DEPUIS JULES GOSSELET

### The Cretaceous of the North of France : evolution of concepts and new aspects since Jules Gosselet

par Francis ROBASZYNSKI (\*) et Francis AMÉDRO (\*\*)

*Résumé.* — Le Crétacé est une époque géologique bien connue dans le Nord de la France grâce aux affleurements spectaculaires des falaises du Boulonnais ainsi qu'aux nombreuses observations effectuées dans les carrières et que les géologues ont souvent consignées dans les Annales de la Société géologique du Nord, Société créée en 1870 par Jules Gosselet. Dans une première partie, on verra quelle évolution ont subi les interprétations stratigraphiques en termes d'assises, de zones et d'étages pour les successions allant de l'Albien au Santonien dans les départements du Nord et du Pas-de-Calais. Une seconde partie fera ressortir les concepts qui ont conduit à focaliser l'attention sur des aspects nouveaux de la géologie du Crétacé, tant dans les domaines de la lithologie et de la biostratigraphie que dans l'interprétation des milieux de sédimentation, de la rythmicité, des analyses géochimiques, des événements, etc.

*Abstract.* — *The Cretaceous is one of the well known geological time in the North of France thanks to the huge outcrops of the Boulonnais cliffs as to the numerous observations in the quarries and pits, most of them being recorded in the Annals of the Société géologique du Nord, a Society created in 1870 by Jules Gosselet. In a first chapter is exposed the evolution of the stratigraphic interpretation of "assises", zones and stages from Albien to Santonian succession in the departments of Nord and Pas-de-Calais. The next chapter points out the concepts which led to focus attention on new aspects of the geology of the Cretaceous, as in the scope of litho-and biostratigraphy as in the interpretations of environments, rhythms, geochemical analysis, events etc.*

#### I. — INTRODUCTION.

Le Crétacé est l'une des périodes du calendrier géologique les mieux connues dans le Nord de la France grâce aux coupes complètes visibles dans les falaises du Cap Blanc-Nez mais aussi du fait des nombreux affleurements et carrières dans la couverture crayeuse, de l'étude des puits de mines pour l'extraction du charbon et des projets successifs de percement du tunnel sous la Manche.

Au 19<sup>ème</sup> siècle, les précurseurs dont les plus illustres furent Jules Gosselet et Charles Barrois défrichent le terrain et reconnaissent une succession d'assises qui associent la lithologie et le contenu fossilifère avec tantôt un sens de zone, tantôt un sens de formation (« Craie glauconieuse à *Ammonites laticlavus* », « Marne à *Terebratulina gracilis* »). L'« Esquisse géologique du Nord de la France » publiée par Gosselet en 1881 constitue une synthèse des connaissances acquises à l'époque. Les deux guerres mondiales entraînent un arrêt prolongé des études. Le second projet de tunnel sous la Manche et l'avènement de la micropaléontologie sont l'occasion de nouvelles recherches dans les années 1960. A

partir de 1975, le souci d'établir des corrélations à grande distance entre des bassins sédimentaires conduit à la construction d'échelles paléontologiques parallélisées associant macro-, micro- et nannofossiles (Robaszynski, Amédro coord. *et al.*, 1980). Aujourd'hui, l'accent est mis sur la recherche d'événements à caractère global : changements rapides de hauteur du niveau marin, éruptions volcaniques à caractère explosif aboutissant au dépôt de cendres très fines à l'origine de niveaux marneux verdâtres à bentonite, variations des paramètres orbitaux de la terre induisant la genèse d'alternances craie-marne, événements écologiques caractérisés par l'abondance d'un macrofossile. Tous ces événements définissent des lignes-temps isochrones permettant des corrélations encore plus précises intra- et interbassins (Amédro & Robaszynski, 2001).

Dans ce qui suit, on verra en première partie quelle est la part du Crétacé dans l'œuvre de Jules Gosselet puis quelle est l'évolution de la stratigraphie de ce système après Gosselet et Barrois. Un tableau fera apparaître les principales avancées dans la litho- et la biostratigraphie du Crétacé du Nord de la France depuis l'époque des précurseurs. Dans une deuxième

(\*) Faculté Polytechnique de Mons, 9, rue de Houdain, 7000 MONS, Belgique. Courriel : francis.robaszynski@fpms.ac.be

(\*\*) 26, rue de Nottingham, 62100 CALAIS, France. Courriel : francis.amedro@free.fr

partie on fera ressortir les nouveaux concepts qui ont conduit aux acquisitions « modernes » dans les champs d'étude de la pétrographie, des figures sédimentaires, des cycles et séquences, de la silicification, des cendres volcaniques, des événements biologiques et biochimiques, etc.

**Remarque.** De nombreux résultats présentés au chapitre III ont déjà été exposés sinon publiés dans diverses revues. Nous tentons ici de résumer les principaux acquis récents et de les rendre disponibles et accessibles au public plus large des professeurs de sciences naturelles des lycées et collèges de l'enseignement secondaire ainsi qu'à toute personne désirant comprendre les avancées des sciences géologiques régionales depuis plusieurs décennies... emboitant ainsi les pas de Jules Gosselet qui se souciait beaucoup de la transmission des savoirs.

## II. — LES TRAVAUX SUR LE CRÉTACÉ DANS L'ŒUVRE DE JULES GOSSELET

Dans l'œuvre protéiforme de Jules Gosselet (1832-1916), le Crétacé tient une place importante – surtout dans la deuxième partie de sa carrière – mais certainement pas la plus importante. Rappelons le contexte dans lequel ces travaux ont été entrepris. Né en 1832 à Cambrai (pays de craie, si bien étudié ensuite par Leriche, un de ses élèves), la voie suggérée par le père de Gosselet devait aboutir au diplôme de pharmacien. Toutefois Gosselet préférait les promenades en Thiérache pour découvrir la nature puis, paradoxalement, il se retrouve professeur de mathématiques au Quesnoy. Pour en sortir, il se présente aux examens de licence à Paris... auxquels il échoue ! Pourtant, parmi les trois examinateurs, Constant Prévost le remarque pour son caractère indépendant et la grande variété de ses connaissances et lui propose un poste de préparateur en géologie à la Sorbonne. Il a 21 ans et c'est là qu'il apprend à classer des collections tout en suivant les cours de ses deux maîtres : Constant Prévost et Edmond Hébert. Le premier, ouvert, libéral, sceptique, fait penser ses élèves, les incite à élaborer des hypothèses et à les tester, et estime que c'est en soi que l'on trouve les meilleures ressources. Hébert, quant à lui, est pondéré, réglé, dogmatique et considère qu'il transmet la vérité par la science : les élèves ont à enregistrer des connaissances et à accepter la parole du maître (Barrois, 1920). De ses deux guides, Gosselet unira en lui l'esprit d'indépendance, l'enthousiasme et la tendance à critiquer les théories absolues du premier, mais aussi la rigueur des observations, le souci de précision, l'ordre et la méthode du second.

C'est avec l'empreinte de ces deux visages de la science qu'il abordera l'étude des terrains primaires de l'Ardenne, de l'Avesnois, du Boulonnais et de la Belgique, travaux qu'il poursuivra toute sa vie et qui ont été l'essentiel de ses recherches jusque dans les années 1880-1900. C'est là qu'il a affirmé sa méthodologie personnelle fondée sur les relations directes et réciproques entre les faits et les idées.

Ponctuellement, quelques publications ont trait au Crétacé, par exemple en 1858 sur le Gault du Hainaut, en 1865 sur le Cambrésis, en 1869 sur la craie de Lezennes et sur la Meule de la région de Valenciennes, en 1873 sur l'âge des « Rabots » de Mons etc. En 1881, les terrains secondaires forment un volume de son « Esquisse géologique du Nord de la France » où il résume les caractères du Crétacé de tout le Nord du Bassin de Paris tels qu'il les a observés lui-même sur le terrain. Puis, après la sortie de son monumental ouvrage sur

l'Ardenne en 1888, il étudie le Tun de Lille en 1899 et donne ses idées sur la sédimentation de la craie en 1902. A cette date, il a aussi publié toutes les cartes géologiques au 1/80.000<sup>e</sup> du Nord de la France.

De plus, un gros travail est déjà en chantier puisqu'il a décidé de rédiger une étude complète des « Assises crétaciques et tertiaires dans les fosses et sondages du Nord de la France », gigantesque projet qu'il mettra plus d'une décennie à réaliser. Là, il compare en détail les informations obtenues en subsurface avec ce qu'il connaît en affleurement depuis le Boulonnais jusqu'au Cambrésis et la Thiérache. Dans cette synthèse, il interprète avec un esprit critique permanent les données de tous les sondages et puits de mine qui lui ont été fournies par les Compagnies d'exploitation de charbon et les Compagnie des Eaux. Quatre fascicules seront publiés de son vivant (1904-1913) et le dernier fascicule sera achevé par son élève Dubois.

## III. — L'ÉVOLUTION DES TRAVAUX SUR LE CRÉTACÉ DANS LE NORD DE LA FRANCE

Des centaines de publications jalonnent la connaissance du Crétacé dans le Nord de la France et il serait difficile de mentionner l'apport de chaque note et de chaque auteur depuis près de deux siècles. Aussi essaierons-nous de définir quelques phases – bien artificielles il est vrai – dans la suite des acquisitions, depuis l'époque des pionniers jusqu'aux temps contemporains. Une tentative dans ce sens, mais localisée au Boulonnais, avait déjà été menée lors de la publication d'une synthèse sur la litho-biostratigraphie du Crétacé. On pourra y trouver quelques développements historiques ainsi que de nombreuses références qu'il serait lourd de reprendre ici dans leur détail (Robaszynski & Amédéo coord. *et al.*, 1980, p. 198-201).

### 1) Phase de reconnaissance

Entre 1780 et 1850, peu de géologues s'attardent sur la craie : ils essaient d'abord de définir l'ordre de superposition des différentes craies dont les affleurements les plus démonstratifs et les plus complets se trouvent dans les falaises du Boulonnais entre Wissam et Sangatte. Ainsi ont fait Duhamel *et al.* en 1795, Phillips en 1819, Brongniart (1822, 1835) ou Rozet en 1828.

Sur le tableau I, la colonne « Brongniart » montre les trois divisions lithologiques reconnues et publiées en 1811 et reprises en 1822 et 1835. Quelques fossiles sont cités par Brongniart qui défend les « caractères zoologiques des formations » lui permettant de déterminer l'âge relatif des craies quelles que soient les caractéristiques lithologiques. C'est dire qu'il est parmi les premiers à considérer que les fossiles sont essentiels pour établir des corrélations entre des coupes séparées par des distances parfois importantes.

### 2) Phase descriptive

Cette période s'étend d'environ 1850 à 1880 puis jusqu'en 1913 et elle voit de nombreux géologues s'occuper – entre autres – de la craie. Cette appétence pour le Crétacé est certainement liée au fait qu'une chaire de géologie a été créée à l'Université de Lille en 1864 et que son premier titulaire,



agé de 32 ans, est Jules Gosselet. Juste avant son arrivée, quelques travaux sont déjà publiés tels ceux de Gaudry en 1860 et de Le Hon en 1864, puis viendront ceux de Rigaux en 1866, de Chellonneix en 1872 et les classifications d'Hébert (1874, 1875). Les nombreuses contributions sur le Crétacé du Boulonnais entre 1870 et 1880 ont probablement été catalysées aussi par deux événements : le premier est la création de la Société géologique du Nord en 1870 par un Gosselet qui rassemble les géologues sur le terrain et offre les Annales pour la diffusion des connaissances ; le second est en rapport avec le premier projet de tunnel sous la Manche pour lequel Potier et de Lapparent (1875) avaient reçu la responsabilité de procéder à des sondages sur terre et en mer.

Les grandes subdivisions lithologiques et leurs zones paléontologiques correspondantes sont stabilisées par Gosselet dans son « Esquisse géologique du Nord de la France » en 1881 puis reprises dans ses derniers travaux sur les fosses et sondages (1904-1913).

Sur le tableau I, les colonnes « Hébert » et « Gosselet » font apparaître les grandes lignes de la « classification du terrain crétacé supérieur » telles que publiées par Hébert en 1875. Bien que les noms d'étages relatifs au Crétacé supérieur aient été créés par d'Orbigny en 1842-1847 et Coquand en 1857, Hébert en 1863 préfère encore associer les termes lithologiques et les zones de fossiles dans des « assises » qui prêtent parfois à confusion. Ce n'est qu'en 1875 qu'il adopte les noms d'étages pour des groupements d'assises mais avec une certaine imprécision. Gosselet (1881) reprend dans un premier temps les subdivisions de son maître Hébert puis, en suivant les travaux de ses élèves dont Barrois, et à la lecture de ceux de de Grossouvre (1901, 1908), il fait passer en 1909 la zone à *Micraaster decipiens* à la base du Sénonien et la zone à « *Ammonites inflatus* » dans l'Albien. Ce classement sera adopté jusque dans ses ultimes parutions sur les « fosses et sondages ».

Il faut remarquer qu'à partir des années 1870, Barrois a contribué au moins autant que son maître Gosselet à la connaissance du Crétacé du Nord de la France. Parmi ses contributions essentielles sur ce sujet, citons en 1873 sa comparaison du Crétacé traversé par le chemin de fer de St Omer à Boulogne avec celui du cap Blanc-Nez, en 1874 son étude sur le Gault – ou Albien argileux – du bassin de Paris, en 1875, son travail sur la zone à *Belemnites plenus* et, en 1878, son mémoire sur le Crétacé des Ardennes.

### 3) Phase de dépression

Les deux guerres mondiales du 20<sup>ème</sup> siècle provoquent une diminution considérables des études fondamentales sur la craie. Toutefois, quelques notes donnent des contributions fort importantes sur le Crétacé inférieur.

Jusque dans les années 1965-1970, l'ordre général de la succession des craies est emprunté au schéma de Gosselet et sert aux levés de la nouvelle carte géologique au 1/50.000<sup>e</sup>. En outre, inaugurée par Marie (1941), la micropaléontologie des foraminifères intervient très souvent pour dater les assises autrement que par les macrofaunes classiques et apparaît comme un outil de corrélation très commode dans le cadre des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> projets de tunnel sous la Manche (Monciardini, 1980).

Dans la colonne « 1920-1970 » (Tabl. I) on voit que les unités lithologiques sont encore associées à un fossile pour le

Cénomaniens, le Turonien et le Sénonien. En revanche, des améliorations majeures sont apportées au Crétacé inférieur qui voit l'Aptien et l'Albien subdivisés en plusieurs unités paléontologiques (Destombes P. & J.P., 1938). En outre, Briquet (1919) remarque l'intérêt de niveaux marneux particuliers dans le Turonien et leur extension géographique qui peut servir de niveau repère considéré *a priori* comme isochrone, tel le niveau à « arborisations vertes » séparant le Turonien moyen du Turonien supérieur. Bien qu'à l'époque, on ne savait pas que ces niveaux représentaient des cendres volcaniques évoluées en argiles, Briquet avait mis le doigt intuitivement sur la présence d'« événements » instantanés dans la sédimentation et réellement isochrones.

### 4) Phase de stratigraphie à haute résolution

Depuis 1975, un changement de regard sur les successions géologiques du Crétacé a abouti en près de trois décennies à une stratigraphie multicritères où l'on peut maintenant définir des unités sédimentaires se déposant dans des intervalles de temps de l'ordre de 20 000 ans.

En conséquence, il devient possible d'établir des corrélations précises entre des bassins parfois éloignés de plusieurs centaines de km comme par exemple les bassins de Paris-Londres et de Münster (Amédéo & Robaszynski, 2001, et les références incluses).

Le tableau I montre qu'à partir de 1975, des observations plus détaillées – et Jules Gosselet n'aurait certainement pas désavoué cette méthode – ont permis d'améliorer la stratigraphie du Crétacé du Nord de la France : au plan de la lithologie, des formations sont définies indépendamment des zones en tenant compte des recommandations de la Commission Internationale de Stratigraphie ; de même au plan de la biostratigraphie des ammonites, des autres macrofossiles et des microfossiles, des biozones d'assemblage ou d'intervalle sont nommées et conduisent à des subdivisions en étages et sous-étages reconnues internationalement (Robaszynski 1997, 1999, 2000, 2001). De plus, des événements sédimentaires comme les niveaux argileux repérés originellement par Briquet, ont révélé leur origine volcanique par la présence de bentonite et sont des outils de corrélation de grande précision (Deconinck *et al.*, 1991 ; Vanderaveroet *et al.*, 2000), de même que d'autres événements lithologiques et biostratigraphiques comme ceux indiqués dans la dernière colonne. L'avantage majeur de ces événements est qu'ils permettent un repérage stratigraphique rapide et précis d'un affleurement qui contient au moins un ou deux de ces repères et ceci sans recourir à une analyse biostratigraphique complète, toujours relativement plus longue.

## IV. — QUELQUES APPORTS NOUVEAUX DANS L'ÉTUDE DU CRÉTACÉ DU NORD DE LA FRANCE AU COURS DES TROIS DERNIÈRES DÉCENNIES

La craie est un faciès singulier dont la structure a pu être dévoilée grâce au microscope électronique à balayage (MEB). Après cet acquis important qui est une conséquence du développement technologique de l'électronique, d'autres apports nouveaux ont suivi : par exemple la liaison entre la connaissance des traces fossiles et la silicification, l'interprétation en termes de cycles astronomiques des

Alexand BRONGNIARD 1835	Edmond HEBERT 1863, 1874, 1875	Jules GOSSELET, Charles BARROIS 1881, 1909, 1913	1920 - 1970	formations	zones macropal.	étages	F. ROBASZYNSKI & F. AMEDRO, 1980 et F.A., F.R. 1997, 2000, 2001 et Owen 1975, Juigné & K 1976, Hancock et al 1977, Destombes 1979, Symposium Bruxelles 1996
craie blanche	LITHOL. 1. à <i>Bel mucronata</i> zone à <i>Bel quadrata</i>	<i>B. mucronata</i> <i>Bel quadrata</i>	craie blanche sans silex	Coquelles	<i>Cl. undulatifol.</i>	CAMP	appartition/ extinction de foraminifères marquants <i>G. cristata</i> Whitaker's 3 inch band Bedwell's columnar <i>Lianoceramus</i> <i>Sf. bolonca</i>
---	craie blanche sans silex	<i>Micraster cor anguinum</i>	<i>Micr. cor anguin</i>	Caiffiers (Gare)	<i>M. corang</i>	CANTON	Bedwell line <i>A. r. verus</i> <i>Echinoceras</i> Barrons sponge Whitaker's 3 inch band Bedwell's columnar <i>Lianoceramus</i> <i>Sf. bolonca</i>
---	craie blanche à silex	<i>M. cor festudin. = decipiens</i>	<i>Micr. cor festudin. et In involutus</i>	Caiffiers (Pont)	<i>Peron. fridos. M. decip</i>	CONACIEN	Beeding hg Hope gap hg Navigation hg Lewes m Bridgwick m Caburn m Southernham m Glynde m New Pit m Rund Down m Lutworth m <i>Scripanoceras</i> Niveau à <i>A. plenus</i> <i>R. cushmani</i>
craie tufau	craie verte Bonne Pierre Gris Meule cr à cornus	<i>M breviporus = teskeri</i>	Meule, tun cr. bl. à silex niv à abot. vertes	Caiffiers (Pont)	<i>Subb nepluni M. teskeri</i>	CONACIEN	Navigation hg Lewes m Bridgwick m Caburn m Southernham m Glynde m New Pit m Rund Down m Lutworth m <i>Scripanoceras</i> Niveau à <i>A. plenus</i> <i>R. cushmani</i>
---	Bleus	<i>Ter. gracilis</i>	craie marneuse sans silex	Guet	<i>Collignoni woodgari</i>	TURONNIEN	Navigation hg Lewes m Bridgwick m Caburn m Southernham m Glynde m New Pit m Rund Down m Lutworth m <i>Scripanoceras</i> Niveau à <i>A. plenus</i> <i>R. cushmani</i>
---	Dièves	<i>In labialis</i>	dièves vertes ou craie noduleuse	Molteilletes	<i>Mamm. nodosoides</i>	TURONNIEN	Navigation hg Lewes m Bridgwick m Caburn m Southernham m Glynde m New Pit m Rund Down m Lutworth m <i>Scripanoceras</i> Niveau à <i>A. plenus</i> <i>R. cushmani</i>
---	craie glauc	<i>Bel plenus</i>	banc à <i>Adinocam plenus</i>	Grand Blanc-Nez Crupes	<i>Mamm. nodosoides</i>	TURONNIEN	Navigation hg Lewes m Bridgwick m Caburn m Southernham m Glynde m New Pit m Rund Down m Lutworth m <i>Scripanoceras</i> Niveau à <i>A. plenus</i> <i>R. cushmani</i>
---	craie blanche ou grise	<i>Holaster subglobosus</i>	craie grise	Escalles	<i>Calycoc naviculare</i>	CENOMANIEN	Navigation hg Lewes m Bridgwick m Caburn m Southernham m Glynde m New Pit m Rund Down m Lutworth m <i>Scripanoceras</i> Niveau à <i>A. plenus</i> <i>R. cushmani</i>
---	Dièves blanche Dièves rouges Tourlia	<i>Amm. latifolius</i> <i>Perlen asper</i>	craie grise marneuse (lunell) <i>Sc varians</i>	Cran	<i>Acanth. jukesbrownei</i> <i>Acanth. mofo</i> <i>Y. acyl</i> <i>Lunnigti inermis</i>	CENOMANIEN	Navigation hg Lewes m Bridgwick m Caburn m Southernham m Glynde m New Pit m Rund Down m Lutworth m <i>Scripanoceras</i> Niveau à <i>A. plenus</i> <i>R. cushmani</i>
---	Gault	<i>Amm. inflatus</i>	cr. glauc Plocosc. Tourlia	Petit Blanc-N Strouanne	<i>Manteliteras dixoni</i> <i>Mant. mantelli</i> <i>M. saxb</i> <i>S. schu</i> <i>R. carci</i>	CENOMANIEN	Navigation hg Lewes m Bridgwick m Caburn m Southernham m Glynde m New Pit m Rund Down m Lutworth m <i>Scripanoceras</i> Niveau à <i>A. plenus</i> <i>R. cushmani</i>
---	Gault	<i>Amm. interruptus</i>	atq. gris bleu <i>Morf. inflatum</i> <i>Hyst. varicosum</i> <i>Dip. cristatum</i> <i>Dip. bicipitatus</i> <i>Dim. nobile</i> <i>Dim. nobile</i> <i>Hopl. dentatus</i> <i>Hopl. benefianus</i> <i>Hopl. stemmanni</i> <i>Otolith. normannaie</i> <i>Otolith. burgeois</i> <i>Protob. puzosianus</i> <i>Cleon floridum</i> <i>Sonn. kitcheni</i> <i>Leym. regularis</i>	Lottinghen	<i>Morf. penninatum</i> <i>Morf. inflatum</i> <i>Morf. pricei</i> <i>Diplo. cristatum</i> <i>Dim. bicipitatus</i> <i>Dim. nobile</i> <i>Dim. nobile</i> <i>Hopl. dentatus</i> <i>Hopl. benefianus</i> <i>Hopl. stemmanni</i> <i>Otolith. normannaie</i> <i>Otolith. burgeois</i> <i>Protob. puzosianus</i> <i>Cleon floridum</i> <i>Sonn. kitcheni</i> <i>Leym. regularis</i>	VRAC	Navigation hg Lewes m Bridgwick m Caburn m Southernham m Glynde m New Pit m Rund Down m Lutworth m <i>Scripanoceras</i> Niveau à <i>A. plenus</i> <i>R. cushmani</i>
---	sables verts	<i>Amm. mammillat.</i>	sables verts . P1 Douv mammillat	Gardes	<i>Hypacanth. jacobii</i>	ALBIEN	Navigation hg Lewes m Bridgwick m Caburn m Southernham m Glynde m New Pit m Rund Down m Lutworth m <i>Scripanoceras</i> Niveau à <i>A. plenus</i> <i>R. cushmani</i>
glauconie crayeuse	---	<i>Amm. millefianus</i> <i>Ost. leymeryi</i>	sables verts argiles noires	Wissant Verinchthun Cal-Cornu	<i>Hypacanth. jacobii</i> <i>Parahopl. nuffieldensis</i> <i>Tropaeum bowerbanki</i> <i>Gesh. deshayesi</i>	ALBIEN	Navigation hg Lewes m Bridgwick m Caburn m Southernham m Glynde m New Pit m Rund Down m Lutworth m <i>Scripanoceras</i> Niveau à <i>A. plenus</i> <i>R. cushmani</i>

Tab. I. — Tableau de l'évolution des termes stratigraphiques dans le Crétacé du Nord de la France.  
Table I. — Table of the evolution of stratigraphical terms in the Cretaceous of the North of France.

rythmes de la craie, l'analyse en séquences de dépôt des successions de craies et de marnes et la tenue en compte des figures sédimentaires et diagénétiques, les zonations phylogénétiques des macro- et microfossiles... toutes disciplines qui, réunies, conduisent à mieux comprendre la genèse et le contrôle de la sédimentation de la craie.

On évoquera ci-après quelques approches nouvelles qui peuvent être illustrées par des exemples dans le Crétacé du Nord de la France.

### 1) Pétrographie de la craie.

Jusque dans les années 1965, les outils d'observation de la craie se limitaient à la loupe à main et à la loupe binoculaire pour les objets tridimensionnels. Le microscope était employé pour de la craie rendue transparente par un façonnage en plaque mince. Les grossissements les plus élevés ne pouvaient guère dépasser 600 à 1000 x pour des raisons d'optique. Dès lors, la texture de la craie ne pouvait être élucidée puisque l'essentiel de ses composants, les coccolithes, n'atteint que le millième de mm, c'est à dire la limite du pouvoir de résolution du microscope (sauf à utiliser des objectifs à immersion permettant d'accéder au demi-millième de mm). Depuis les années 1965-1970, la mise en œuvre du MEB rend facile des grossissements de 1000 à 50000 x qui révèlent avec détail la structure des coccolithes et la morphologie des particules les composant. Leur arrangement dans une matrice formée de nombreux débris et particules est également visible et se caractérise par des contacts par point, ce qui ménage de nombreux pores souvent inférieurs au nanomètre.

Si maintenant on voulait définir la roche craie, on pourrait l'exprimer de la façon suivante : *la craie est une roche carbonatée calcique, tendre, tachant les doigts, à grain très fin, formée dans sa majeure partie par l'accumulation sans ciment de coccolithes ou de leurs pièces constitutives.*

Quant à la vitesse de dépôt de la craie, celle-ci atteint à peine 1 à 3 mm par siècle ! (il a fallu près de 7,5 millions d'années au Cap Blanc-Nez pour déposer les 150 mètres de craies du Cénomaniens et Turonien, soit environ 2 mm/siècle).

La figure 1 montre le nannofaciès d'une craie blanche de la région lilloise. On y distingue de petites couronnes de quelques millièmes de mm de diamètre, formées elles-mêmes de minuscules pièces de carbonate de calcium cristallisé en calcite. Ces couronnes – ou coccolithes – sont à l'origine assemblées en coccosphères (fig. 2) secrétées par des algues unicellulaires vivant à l'intérieur des coccosphères qui les protègent. Ces algues seraient planctoniques et vivent dans la tranche supérieure des eaux marines où elles captent la lumière nécessaire à leur développement. Quant les algues meurent, les coccosphères tombent lentement vers le fond marin et se dissocient souvent en pièces calcitiques, le tout formant une vase au fond de la mer. La compaction ultérieure due au poids des sédiments qui s'accumulent chasse l'eau entre les éléments et on obtient de la craie.

Comme il n'y a pratiquement pas de ciment entre les coccolithes et leurs débris, le pourcentage des pores dans la roche – ou porosité – est très élevé et atteint 30 à 40% : la craie séchée est une roche légère. C'est une différence essentielle avec les roches calcaires proprement dites où les éléments constitutifs sont soudés entre eux par un ciment de

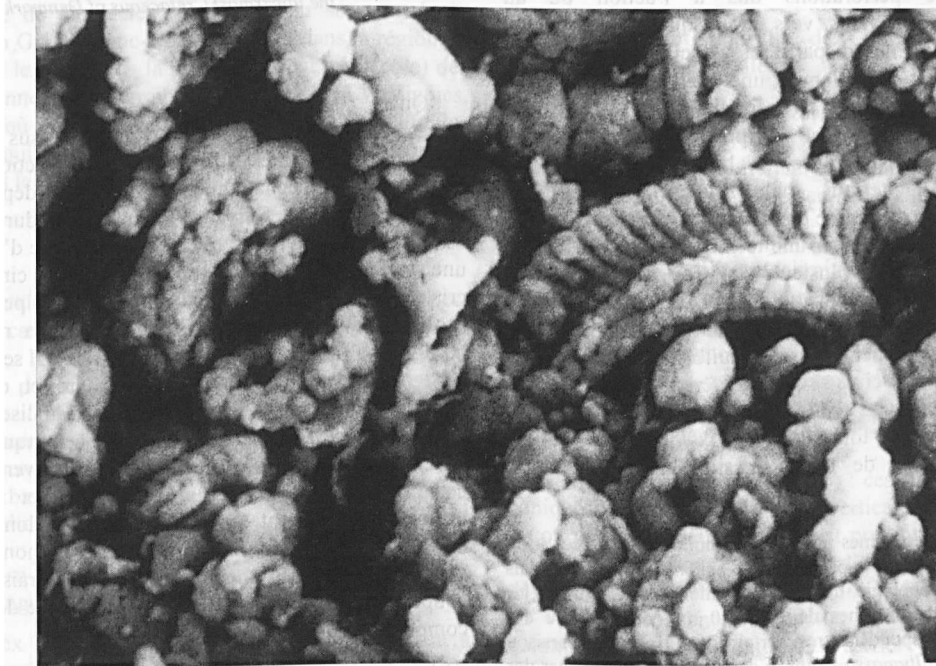


Fig. 1. — Craie blanche coniacienne d'Haubourdin, près de Lille (F) vue au microscope électronique : les coccolithes en anneau sont intégrés dans une matrice constituée d'éléments désagrégés de coccolithes (le diamètre du grand coccolithe est d'environ 2 millièmes de mm).

Fig. 1. — Coniacian white chalk from Haubourdin, near Lille (SEM) : two coccoliths are integrated in a matrix of particular coccoliths (the diameter of the greater is about 2 micrometers).

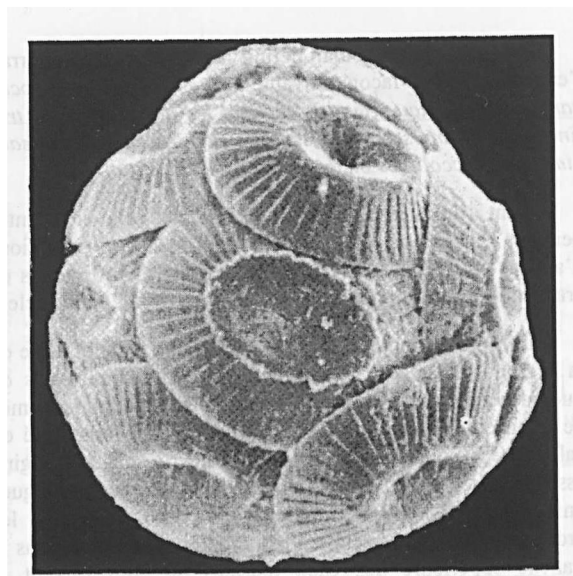


Fig. 2. — Coccosphère entourée de coccolithes; l'algue marine unicellulaire vit à l'intérieur (diamètre : environ 5 micromètres).

Fig. 2. — Coccosphere formed of coccoliths ; the unicellular marine algae leaves inside (diameter : about 5 micrometers).

nature calcitique ou autre, ce qui réduit la porosité à quelques pour-cent mais assure une cohésion élevée (ce qui est le cas des hardgrounds, ci-après).

## 2) Des niveaux bioturbés aux hardgrounds de la craie.

Dans leur majorité, les craies sont affectées par des *bioturbations* qui marquent les traces de terriers, de fouissements, de perforations dus à l'action ou au déplacement d'êtres vivants, vers, mollusques, crustacés etc, et parfois d'organismes disparus et actuellement inconnus, mais tous indiquant généralement une bonne oxygénation du milieu sédimentaire. Quand le remplissage des traces est réalisé par un sédiment d'une composition ou d'une teinte différente de la craie en place, les bioturbations se voient directement sur le terrain, mais souvent la nature du remplissage est peu différente de la matrice crayeuse. Dans ce cas, on peut les visualiser par une technique simple : prendre un morceau de craie de plusieurs dm<sup>3</sup> (ou une carotte s'il s'agit d'un sondage), l'aplanir ou la scier suivant une surface perpendiculaire à la stratification, bien nettoyer dans l'eau à la brosse et laisser sécher ; passer ensuite sur la face aplanie une huile claire : celle-ci va se fixer préférentiellement sur les matières argileuses et les teinter vigoureusement en gris-vert foncé ; on voit alors tous les réseaux de traces qui se recoupent (les types de traces fossiles selon Ekdale et Bromley 1991, fig. 3).

Remarque. — Les termes utilisés pour nommer les traces — ou *ichnogènes* — ne désignent pas l'animal qui a créé la trace mais simplement la morphologie de la bioturbation. Par exemple, les terriers en forme de branches de 20 à 40 mm de diamètre des *Thalassinoides* correspondent très certainement, par comparaison avec les actuelles *Callinassa major*, à des galeries réalisées par des crevettes callianassides. En revanche on ne connaît pas très bien la nature des animaux ayant réalisé les traces de *Chondrites* ou de *Zoophycos*.

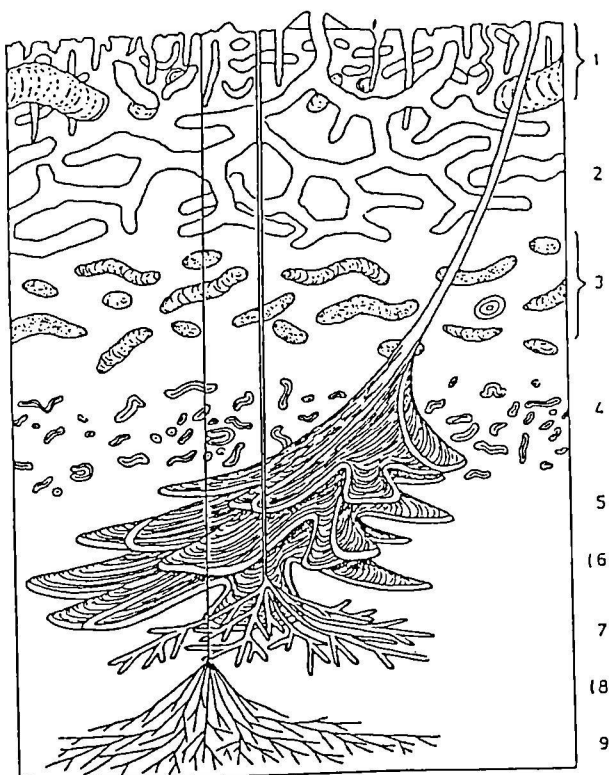


Fig. 3. — Aspect et position relative de traces fossiles dans la craie (selon Ekdale & Bromley, 1991). 1 : a) puits verticaux de fousseurs ; b) *Planolites* horizontaux ; c) *Taenidium* ; 2 : terriers de petits crabes callianassides ou *Thalassinoides* ; 3 : *Planolites* sombres et *Taenidium* ; 4 : *Anchonichnus* ; 5-6 : *Zoophycos* en lames spiralées ; 7-8 : deux sortes de *Chondrites*.

Fig. 3. — Trace fossil tiering and relative position of ichnogenera in the uppermost Cretaceous of Denmark.

Quant aux *hardgrounds* (surfaces durcies), ils représentent une étape tardive d'un processus induit par un ralentissement de la sédimentation et par l'action de courants sous-marins empêchant plus ou moins le dépôt de boue à coccolithes (fig. 4). Suivant l'intensité et la durée d'action de ces courants, il se forme d'abord une surface d'omission puis une surface d'érosion. A ce stade, une cimentation par cristallisation de calcite dans la craie peu consolidée provoque des concentrations calcitiques en nodules et un *hardground* s'ébauche. Si la cimentation se poursuit, le *hardground* devient un fond rocheux durci et, dans le cas où l'érosion se poursuit, des galets s'individualisent et peuvent être emportés : le *hardground* devient tronqué (Juignet & Kennedy, 1974). Ces surfaces durcies peuvent couvrir des centaines de km<sup>2</sup>, sont quasi-isochrones et indiquent des lacunes de sédimentation plus ou moins longues pouvant durer pendant une ou plusieurs zones d'ammonites (quand la sédimentation est rythmée et par comparaison avec des coupes complètes, on peut apprécier la durée de la lacune en comptant le nombre de cycles manquants).

La craie à nodules durcis et tenaces est bien visible au Cap Grand Blanc-Nez où elle forme une unité de teinte jaunâtre d'environ 15 m d'épaisseur à mi-falaise.

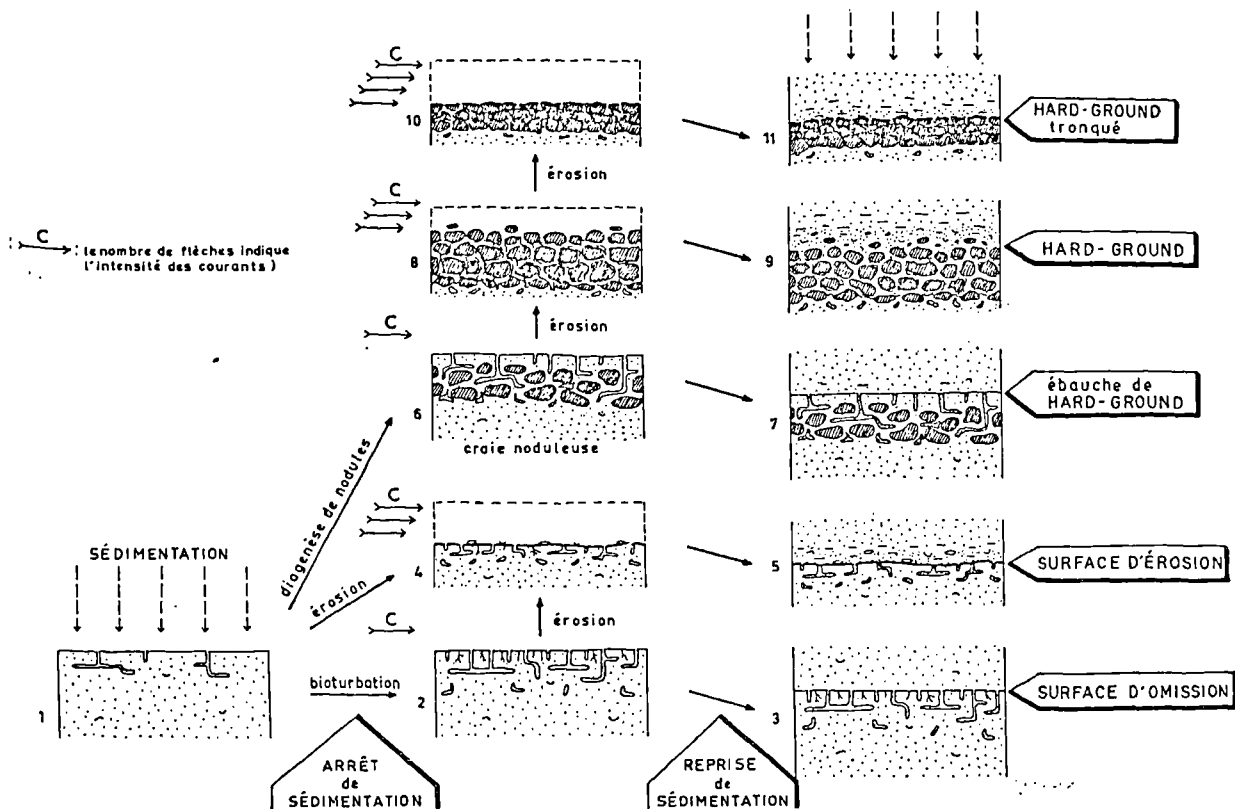


Fig. 4. — Genèse des différents types de discontinuités sédimentaires dans la craie (selon Juignet & Kennedy, 1974).

Fig. 4. — Origin of different types of stratigraphic discontinuities in the chalk.

Des hardgrounds sont bien connus dans le Turonien supérieur-base du Coniacien, également au sommet de la falaise du Cap Grand Blanc-Nez mais aussi dans la région de Lille : ce sont les 3 tuns (= la pierre qui tient, résistante) des carrières aériennes et souterraines d'Haubourdin à Wattignies, à Hellemmes où ils sont traversés par le métro, ou encore les « meules », équivalentes aux tuns, percées par les puits et sondages dans le Pas-de-Calais.

### 3) Les silex.

Dans les craies européennes, les silex ont souvent l'aspect de rognons à cassure conchoïdale de teinte noire et à cortex crayeux blanc. Ils sont constitués de silice essentiellement sous forme de calcédoine, c'est à dire de quartz microcristallin organisé en piles de cristallites ou pseudofibres ménageant des pores occupés par de l'eau (de ce fait les silex sont gélifs car, soumis pendant longtemps à des températures basses, l'eau de constitution gèle et les fait éclater), (Fröhlich, 1991).

Les silex se présentent sous des morphologies variées et l'on peut distinguer suivant leur époque de formation :

i/ des silex précoces dont l'individualisation souvent à partir de traces fossiles est pénécotemporaine du dépôt de la craie ;

ii/ des silex tardifs se formant lors des mouvements tectoniques et qui tapissent les plans de failles.

#### a) les silex précoces

Ils soulignent souvent des horizons bioturbés ou envahissent certains fossiles :

- cavités de fossiles : c'est le cas des éponges dont la structure devient alors bien visible, des échinides et des lamellibranches dont l'intérieur de la thèque ou des valves est envahi par la silice tout en préservant la coquille calcitique ;

- silex zoophycos (b, fig. 5) : ce sont des traces laissées par un organisme filiforme limivore qui se nourrit dans la craie peu consolidée et adopte un déplacement spiralé par rapport à un axe (fig. 3) ; souvent, l'axe spiralé seul et son environnement proche sont silicifiés ; ces formes silicifiées sont fréquentes dans le Crétacé depuis le Turonien et abondent dans quelques niveaux du Turonien supérieur (falaises du Pays de Caux) ;

- silex paramoudras (c, fig. 5) : ces traces silicifiées sont coniques, évasées vers le haut, verticales, pouvant atteindre un ou plusieurs mètres de haut et présentant souvent un axe central crayeux figurant la place d'un organisme filiforme à développement vertical ou *Bathichnus paramoudrae* ; on peut en voir des spécimens de petite taille dans le Bedwell's columnar flint du Santonien de la carrière de Coquelles ;

- silex digitiformes (d, fig. 5) : la silice envahit des traces fossiles de fouisseurs, ce qui rend visible leur aspect tridimensionnel ; le cas le plus fréquent se rapporte aux bioturbations d'un crustacé callianasside : les *Thalassinoides*.

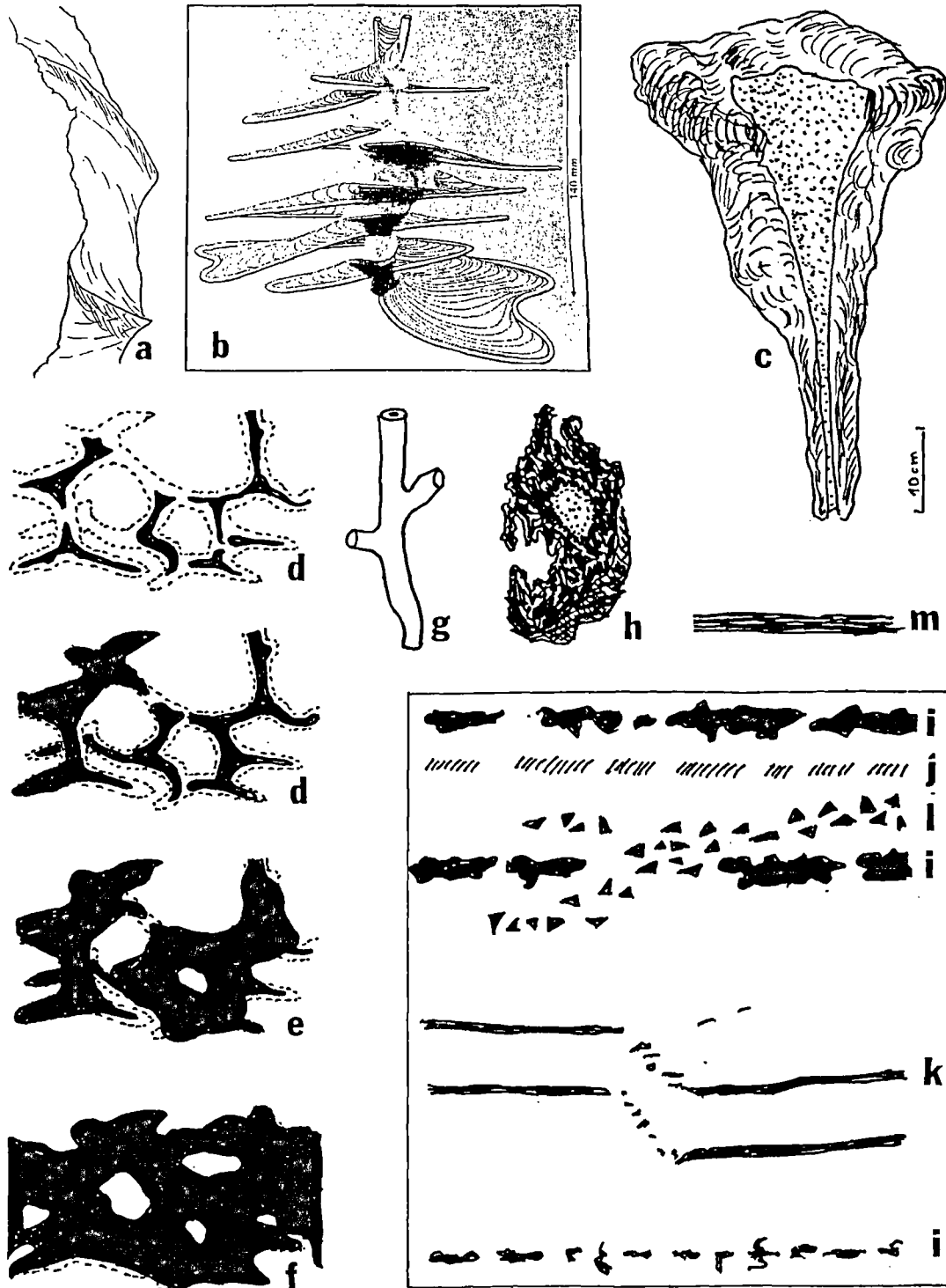


Fig. 5. — Aspect de différents silex précoces, a : silex *Zoophycos*, partie axiale ; b : interprétation d'un silex *Zoophycos* (selon Bromley & Ekdale, 1984) ; c : silex paramoudra brisé suivant son axe montrant le remplissage crayeux du cône interne ; d : deux stades de silex digitiformes résultant de la silicification partielle de bioturbations de *Thalassinoides* ; e : silex en rognons ou « silex cornus » de Gosselet ; la silice envahit et déborde les terriers ; f : silex en bande résultant de la coalescence de plusieurs rognons voisins ; g : silex tubulaire avec, à la partie supérieure, une âme centrale silicifiée ; h : silex « carieux », irrégulièrement silicifiés, avec une géode interne remplie de grains de craie et de microfossiles plus ou moins silicifiés ; i-l : allure d'un front de falaise composite montrant en i : des niveaux de silex digitiformes et en rognons, j : un niveau de craie durcie ou hardground résultant d'un arrêt momentané de l'accumulation sédimentaire ; k : silex en lames avec fentes en échelon silicifiées ; l : craie bréchique, irrégulière, dont une partie est injectée sous le niveau de silex en rognons i.

Fig. 5. — Aspect of various early flints, a : *Zoophycos*; b : interpretation of a *Zoophycos* flint; c : paramoudra flint showing chalky axis; d : finger flints from the silicification of *Thalassinoides* burrows; e : hornflints which silica extending the burrows; f : flint band resulting of the coalescence of several hornflints; g : tubular flint; h : "carius" flint, irregularly silicified; i-l : seacliff front showing sheet flints in k and breccia flint in l partly injected below the hornflint level in i.

ubiquistes dans la craie, dont les terriers souvent branchés à angle droit ont un diamètre de 10 à 60 mm ; les silex tubulaires sont particuliers par le fait qu'ils se présentent comme des manchons silicifiés d'allure tubulaire avec parfois une âme centrale en silex ;

- silex en rognons (f, fig. 5) : la silice déborde les bioturbations qui peuvent devenir coalescentes et l'on ne peut plus voir leur forme originelle ; ces silex forment des niveaux épousant la stratification et, en falaise ou en carrière, ils apparaissent sous forme de cordons parallèles ;

- silex en bande (g, fig. 5) : parfois les rognons eux-mêmes deviennent coalescents ce qui donne un niveau quasi continu de un à plusieurs décimètres d'épaisseur comme, par exemple, le « Whitaker's three inch flint » visible dans les anciennes carrières de Coquelles, à quelques mètres sous la surface, vers le sommet du Coniacien ;

- silex « cariés » (h, fig. 5) : ce sont des silex en rognons où la silicification n'est pas complète, avec un cortex à surface irrégulière ; souvent ils présentent des cavités internes également irrégulières contenant encore de la craie granuleuse, plus ou moins silicifiée où ont été parfois décelés des foraminifères et des diatomées ; ils sont fréquents dans le Coniacien-Santonien du Pays de Caux ;

- silex en lames (k, fig. 5) et bréchiques (l, fig. 5) : dans les falaises de Haute-Normandie, il existe des brèches interstratifiées vers la limite Turonien-Coniacien correspondant à des niveaux de cisaillement subparallèles à la stratification des masses crayeuses qui auraient subi une translation latérale faible, décimétrique à métrique, ceci peut-être à l'occasion de séismes sous une charge de quelques mètres ou plus de craie. Au cours du déplacement, la semelle brise des terriers en voie de silicification et donne des brèches. La surface de décollement elle-même est parfois silicifiée en lames de silex de quelques mm à cm d'épaisseur également subparallèles à la stratification (Juignet & Breton, 1997) ;

- silex tabulaires (m, fig. 5) : ils sont surtout connus dans la craie anglaise au Nord du bassin de Londres : épais de 1 à 3 cm, ils apparaissent très continus et avec une grande extension géographique (Mortimore *et al.* 2001) ; leur origine n'est pas élucidée ;

#### b) les silex tardifs

Ils concernent surtout des silex plats qui tapissent des surfaces de failles. Ces failles affectent souvent toute la série crétacée et les terrains tertiaires surincombants ; elles correspondent à des accidents tectoniques en distension ou à des réseaux de décrochements conjugués d'âge tertiaire.

Pour l'enchaînement des processus sédimentaires et de silicification ainsi que pour l'origine de la silice, on peut se reporter à Juignet & Breton (1997), Frölich (1991), Robaszynski (1994).

#### 4) Les niveaux marneux à bentonite.

Les craies contiennent toujours plus ou moins de minéraux argileux, ce qui les rend plus marneuses. Dans le cas des alternances craie-marne du Cénomaniens inférieur du Cap Petit Blanc-Nez par exemple, des teneurs en argiles de 10 à 25% confèrent un caractère imperméable à la « craie bleue » ou Formation du Petit Blanc-Nez et c'est dans cette unité

lithologique particulière qu'a été foré le tunnel sous la Manche. Plus haut dans la succession sédimentaire, les craies blanches à silex du Turonien supérieur – Coniacien ne contiennent plus, quant à elles, que quelques pour-cent d'argiles mais, dans le premier cas comme dans le dernier, les minéraux argileux sont mélangés à la craie et ne forment pas de niveaux individualisés.

Un examen attentif et détaillé de la suite lithologique du Turonien révèle l'existence de bandes de 1 à 5 cm d'épaisseur d'argiles marneuses gris à gris-vert où les teneurs en argiles atteignent ou dépassent les 50%. Leur analyse minéralogique met en évidence une teneur élevée en smectites du type bentonite (Deconinck *et al.*, 1991). Ce type de minéral argileux, dit gonflant, a la propriété d'adsorber entre ses feuillets constitutifs une grande quantité de molécules d'eau ou de cations divers qui font gonfler sa structure jusqu'à 40 fois, ce qui est le cas des bentonites (de Fort Benton, Montana, USA). L'origine de cette espèce argileuse est liée au dépôt de cendres volcaniques qui, tombant en milieu marin, évoluent chimiquement pour donner naissance à cette smectite particulière.

Afin de confirmer l'origine volcanique on recherche également dans les niveaux marneux des éléments visibles au microscope optique comme les particules de verres volcaniques en esquilles, les cristaux de zircon et d'apatite qui sont d'excellents signaux de volcanisme... quand ils sont présents. La géochimie des éléments en traces (Sr, Ba, Ta, Ce, etc) et des terres rares (La, Nd, Eu, Ho, Tb, etc) constitue également un bon outil : par exemple, une teneur plus faible en Europium serait un critère positif de volcanisme (Wray, 1999 ; Vanderaveroet *et al.*, 2000)... à condition que les bioturbations ne provoquent pas de mélange d'argiles détritiques et de bentonite quand celles-ci sont superposées dans un même niveau.

L'intérêt majeur du repérage des niveaux marneux à bentonite réside dans le fait qu'il s'agit de dépôts instantanés à l'échelle des temps géologiques et qui affectent de vastes surfaces comprenant un ou plusieurs bassins sédimentaires. De ce fait, ce sont des outils de corrélation extrêmement précis pour établir des correspondances entre des successions dilatées ou condensées d'une même région ou entre des coupes éloignées de plusieurs centaines de km et appartenant à des bassins sédimentaires différents (Amédéo & Robaszynski, 2001).

Le Turonien supérieur est exemplaire pour illustrer ces deux conjonctures. Les niveaux marneux à bentonite, isolés ou assemblés en faisceaux de 2 à 5 bandes plus minces, ont été nommés sur des coupes du SW de l'Angleterre où ont été caractérisés, de bas en haut, les Southerham, Caburn, Bridgewick et Lewes Marls (colonne « Dover » de la figure 6 et Mortimore, 1983 ; Mortimore *et al.*, 2001). A la figure 6, dans la coupe très condensée exposée dans les falaises de Fécamp en Haute-Normandie, les niveaux Southerham (= Eletot) et Bridgewick sont présents tandis que les deux autres ont dû être érodés par des courants. En allant du Kent vers l'Est, aussi bien dans le Nord et l'Est du bassin de Paris que dans les bassins du Nord de l'Allemagne où les successions sont dilatées, les niveaux à bentonite permettent de tracer des lignes-temps très précises pour des corrélations par ailleurs contraintes par de bons outils paléontologiques comme les ammonites (*Subprionocyclus*) et les oursins irréguliers (*Micraster*).

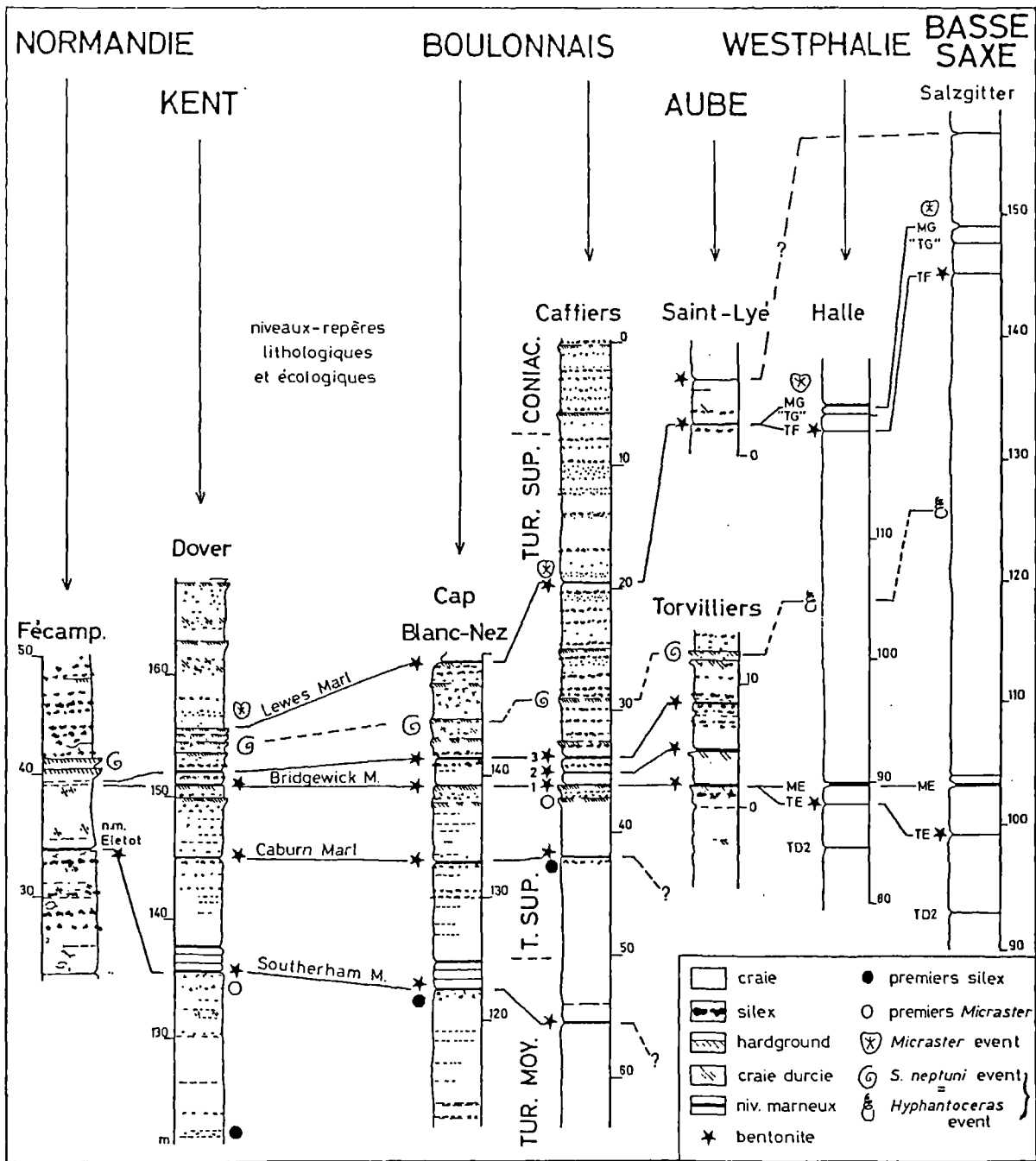


Fig. 6. — Les niveaux marneux à bentonite du Turonien supérieur : corrélation entre des coupes du bassin de Paris-Londres (Kent, Normandie, Boulonnais, Aube) et des bassins du Nord de l'Allemagne (Westphalie, Basse-Saxe), selon Amédéo & Robaszynski, 2001.

Fig. 6. — The Upper Turonian bentonitic marl seams : correlation between sections in the London-Paris Basin and the North Germany basins.

5) La sédimentation rythmée ou périodique.

Du Cénomaniens au Santonien, deux exemples de sédimentation rythmée sont bien illustrés dans les affleurements permanents des falaises du NW de la France : les alternances marne-craie et les alternances craie-niveaux de silex.

a) Marne-craie.

Dans le Boulonnais, entre les coupes du Petit et du Grand Blanc-Nez, le Cénomaniens est constitué par une suite ininterrompue d'alternances marne gris-bleu - craie grisâtre. Dans le Cénomaniens inférieur, entre le Cap Petit Blanc-Nez et le Cran d'Escalles, ces alternances ont des épaisseurs



variant de 0,5 m à 2 m, les termes marneux s'amincissant au profit des termes crayeux en montant dans la série. Il en est à peu près de même pour la moitié du Cénomanien moyen entre le Cran d'Escalles et le Grand Blanc-Nez. Le reste du Cénomanien moyen ainsi que le Cénomanien supérieur devienne nettement plus crayeux et les parties marneuses ne représentent plus que quelques centimètres entre les bancs de craie blanche de 0,2 à 0,5 m. Le sommet du Cénomanien devient de la craie massive où la rythmicité n'apparaît plus très clairement (Amédéo & Robaszynski, 2001).

Depuis quelques décennies, l'origine de la sédimentation périodique a fait l'objet de nombreux travaux et, petit à petit, s'est dégagée une théorie astronomique de l'explication des alternances qui est confortée par des faits convergents.

Dans le Sud de l'Angleterre, Gale (1990) a dénombré 212 alternances de 0,2 à 1 m dans le Cénomanien, organisées en 44 groupes de 3 à 5 rythmes et l'ensemble se retrouve quasi à l'identique dans le Boulonnais.

Suivant Gilbert (1895), Milankovitch (1941) et plus récemment Berger (1988, 1992), la sédimentation pélagique carbonatée cyclique est contrôlée par les climats, eux-mêmes en relation avec les fluctuations de l'orbite terrestre qui commandent les variations de l'intensité de l'insolation.

En conséquence, les rythmes suivent un contrôle orbital selon des cycles astronomiques (dits de Milankovich) de précession des équinoxes (+/- 20000 ans). La variation d'excentricité de l'orbite terrestre autour du soleil module le premier signal suivant une période de +/- 100000 ans, ce qui rassemble des faisceaux de 5 précessions. Par ailleurs, il existe un deuxième mode d'excentricité dont la période de +/- 400000 ans présente une grande stabilité au cours des dernières centaines de millions d'années. Les fluctuations climatiques qui en résultent se manifestent par une augmentation ou une réduction de la productivité planctonique marine liée à la température superficielle des eaux, et par une variation de l'érosion continentale qui affecte la quantité d'argiles détritiques arrivant dans les mers. Le résultat est la sédimentation de doublets marne-craie dont la succession est suivie avec précision sur plus de 200 km en Angleterre et qui est bien démontrée entre le Cap Blanc-Nez et Folkestone (Amédéo, 1993), (fig. 7).

Si l'on admet que chaque doublet représente environ 20000 ans, l'ensemble des 212 doublets (sans compter les lacunes dues à l'existence de hardgrounds) correspond à une durée de l'étage Cénomanien de 4 à 4,5 millions d'années, ce qui est compatible avec les données obtenues avec les mesures radiométriques de potassium-argon.

Ainsi, la cyclostratigraphie permet non pas d'évaluer qualitativement des durées mais de les mesurer... à 20000 ans près. Elle devient un outil à très haute résolution pour la durée des zones biostratigraphiques, des lacunes ou des condensations de sédimentation dans les hardgrounds, et aussi pour la mesure du temps de migration d'une espèce fossile etc. Toutefois, elle ne peut être mise en œuvre que sous certaines conditions : disposer d'affleurements de coupes continues dans des bassins où le taux de sédimentation est suffisamment élevé et où les variations climatiques dues à des causes orbitales peuvent être enregistrées.

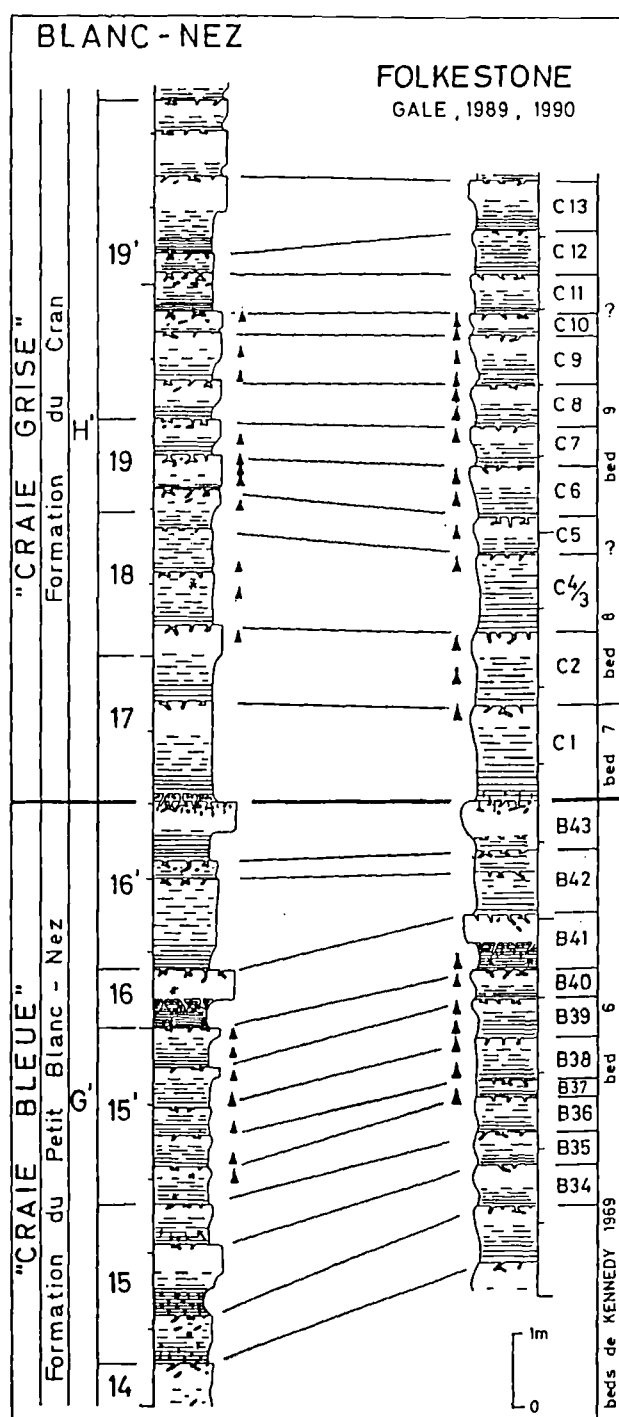


Fig. 7. — Cyclostratigraphie dans le Cénomanien : les doublets marne-craie sont identiques de part et d'autre du détroit du Pas de Calais (selon Amédéo, 1993).

Fig. 7. — Cyclostratigraphy in the Cenomanian : the marl-chalk couplets are identical on the opposite sides of the Channel.

b) Craie-silex.

Du Turonien supérieur au Santonien dans le Boulonnais et jusqu'au Campanien dans le Pays de Caux, la craie blanche est souvent lardée de cordons de silex dont la répartition

verticale est suffisamment régulière pour apparaître comme des doublets craie-silex de 0,5 à 1,5 – 2 m sur des épaisseurs atteignant 1 à 3 centaines de mètres. La présence de bandes de silex paraît aussi liée à des cycles et les auteurs sont de plus en plus nombreux pour admettre que les variations périodiques de la concentration en silice dans la craie au cours de la sédimentation est reliée à des changements chimiques des océans, eux-mêmes sous contrôle orbital de type Milankovitch, avec des cycles de précession de 20000 ans (Zijlstra, 1994).

La quantité de silice captée par les organismes (éponges, diatomées, radiolaires) serait plus importante lors des époques de plus faible insolation correspondant à des minima de productivité de formes planctoniques carbonatées comme les coccolithes. Cette silice très soluble se dissout et se concentre dans les zones à oxygène réduit sous la surface du sédiment et envahit petit à petit les bioturbations où elle se dépose sous forme d'opale évoluant ensuite en calcédoine.

### 6) Séquences sédimentaires et variations globales du niveau des mers.

Dans un dispositif où sont juxtaposés plusieurs milieux (continent – plate-forme – bassin), trois facteurs principaux contrôlent l'espace disponible pour la sédimentation : la subsidence c'est-à-dire l'enfoncement du fond marin, les apports détritiques venant du continent ou ceux provenant de la productivité des organismes planctoniques, et les variations globales du niveau des mers ou eustatisme (fig. 8).

Quand le niveau marin s'abaisse, continent et plate-forme sont érodés et alimentent un prisme sédimentaire de bas niveau se déposant sur la pente continentale : c'est une période de régression marine.

Quand le niveau de la mer s'élève, la transgression vers le continent s'effectue sur une surface où s'élaborent des grains de glauconie et de phosphate ; la sédimentation est réduite, les courants peuvent aboutir à la réalisation de surfaces d'omission ou de hardgrounds : c'est l'intervalle transgressif (souvent très fossilifère).

Quand le niveau de la mer se stabilise vers le haut, l'espace disponible est important et se remplit par des apports venant du continent ou qui s'accumulent par prolifération de restes de plancton calcaire : il se dépose un prisme de haut niveau.

La succession des trois prismes réalise un cortège sédimentaire complet ou séquence (Vail *et al.*, 1987).

Comme il s'agit de la variation du niveau marin océanique, ces hausses et baisses du niveau marin contrôlent en partie la sédimentation dans le monde entier. De ce fait, les séquences sont utilisables comme outils de corrélation à valeur globale (*in* Robaszynski & Amédéo, 1993).

Dans le Boulonnais, une analyse détaillée de la lithologie, des surfaces de bancs, des figures sédimentaires et des contenus paléontologiques du Cénomaniens a conduit à distinguer six séquences eustatiques dont trois complètes et trois incomplètes (Robaszynski *et al.*, 1998). La figure 9 expose la courbe des principales variations transgressives et régressives du niveau marin, déduite de l'analyse litho-biologique des successions sédimentaires depuis l'Aptien jusqu'au Santonien dans le Nord de la France.

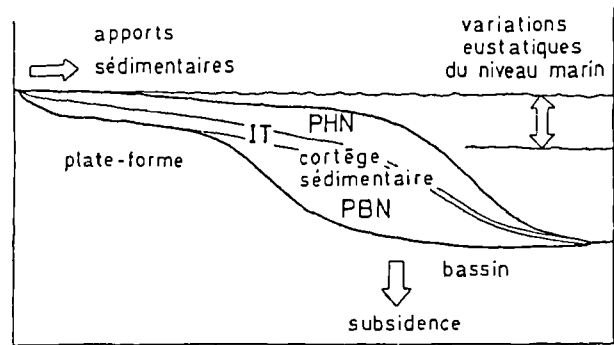


Fig. 8. — Les trois facteurs contrôlant l'espace disponible pour le dépôt d'un cortège sédimentaire complet ou séquence formée de trois prismes successifs; PHN : prisme de haut niveau, IT : intervalle transgressif; PBN : prisme de bas niveau (selon Vail *et al.*, 1987).

Fig. 8. — The three main variables controlling sediment accommodation for a three fold sequence.

### 7) L'hypoxie dans la zone à *Actinocamax plenus*.

L'anoxie est un état d'absence d'oxygène libre dans les eaux intersticielles d'un sédiment qui vient de se déposer ou dans les eaux au-dessus du fond marin ; la matière organique incluse dans le sédiment ne pouvant être oxydée et dégradée s'accumule dans le sédiment qui prend une teinte noire et peut devenir une future roche mère de pétrole. Par ailleurs, les conditions de vie des organismes marins ne sont plus favorables dans ces eaux anoxiques et, si le manque d'oxygène persiste pendant plusieurs dizaines de milliers d'années ou plus, cela peut entraîner l'extinction d'espèces dont la niche écologique se trouve dans les strates d'eaux marines inférieures (on utilise le terme d'hypoxie quand le sédiment n'est pas noir, c'est-à-dire qu'il est seulement sous-oxygéné, ce qui arrive quand la sédimentation ne s'effectue pas trop loin d'un continent ou dans des milieux pas trop profonds).

De telles conditions géochimiques, hypoxiques surtout, ont affecté la mer de la craie au Cénomaniens terminal, au cours de la zone à *Metoicoceras geslinianum*, bien visible dans la falaise du Grand Blanc-Nez dans la Formation des Crupes (ou zone à *Actinocamax plenus* ou « *plenus marl* » des auteurs anglais). D'une épaisseur totale de 1,3 à 1,5 m, la Formation est constituée de 8 horizons (ou « beds » de Jefferies, 1963) que l'on retrouve dans pratiquement tous les affleurements du bassin de Paris-Londres. Il s'agit d'un événement à caractère global lié à la transgression du Cénomaniens terminal – Turonien inférieur et qui témoigne d'une hauteur relative du niveau de la mer parmi les plus importantes du Crétacé. Elle est accompagnée d'un épisode hypoxique à anoxique global qui entraîne l'extinction de nombreux macro- et microfossiles parmi lesquels des céphalopodes : *Calycoceras naviculare*, *Metoicoceras geslinianum*, *Sciponoceras gracile*, *Euomphaloceras septemseriatum*, *Sc. bohemicum anterius*, *Actinocamax plenus* etc, des foraminifères planctoniques comme tout le groupe des *Rotalipora* et des formes benthiques comme *Arenobulimina advena* etc (fig. 10).

Ce type d'épisode est souligné par l'augmentation dans la roche d'un isotope stable comme le carbone 13. La modification de la teneur en C13 par rapport au C12 est un signe de la variation de la productivité organique sur le

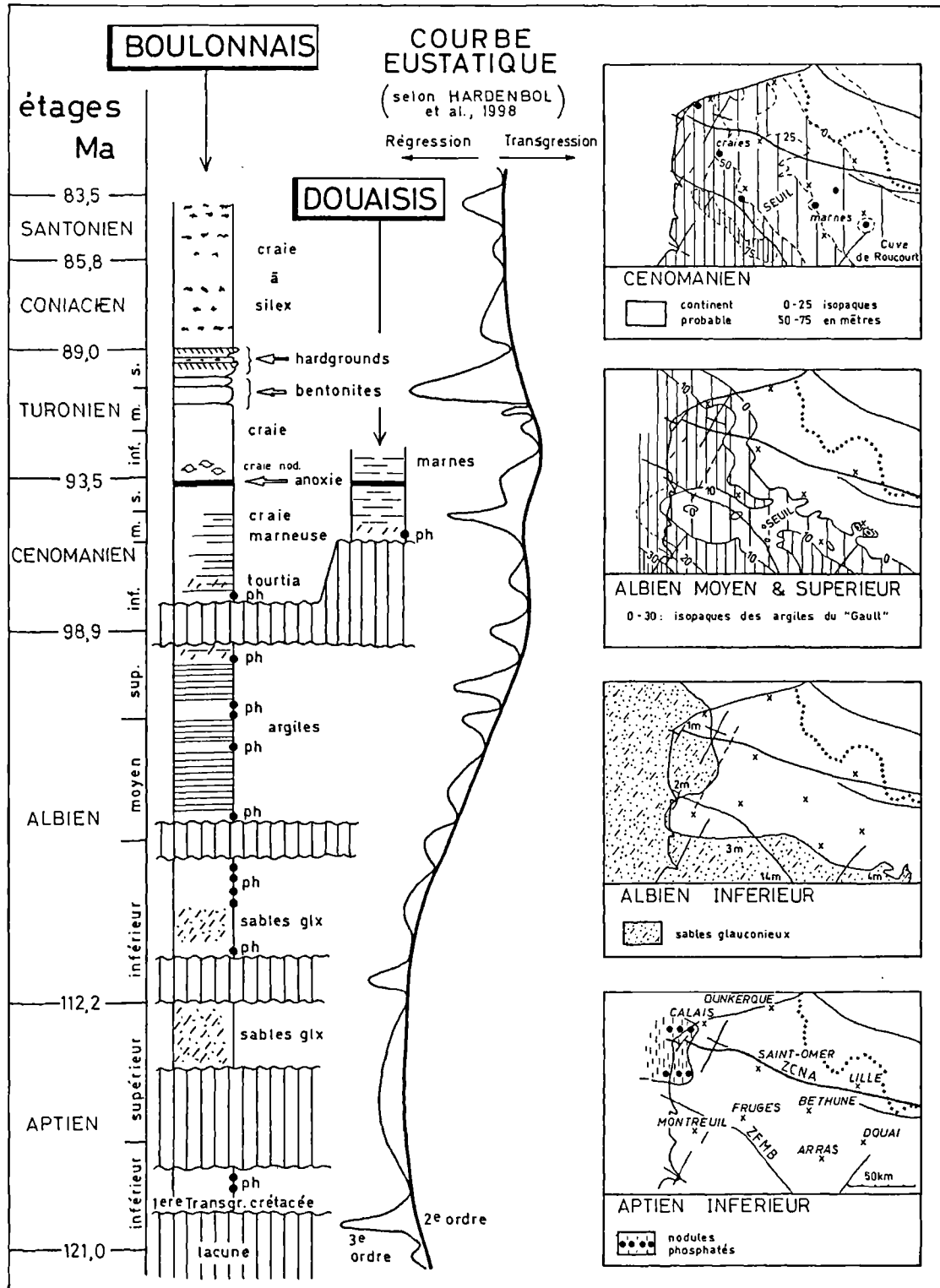


Fig. 9. — Courbes de variations du niveau marin contrôlant le dépôt du Crétacé dans le Nord de la France. 3<sup>ème</sup> ordre : principales séquences. 2<sup>ème</sup> ordre : courbe enveloppe montrant la tendance transgressive générale des mers crétacées de l’Aptien au Turonien. A droite : paléogéographie du Nord de la France à 4 époques.

Fig. 9. — Diagram of the sea-level variations controlling the Cretaceous deposition in the North of France. 3<sup>rd</sup> order : main sequences. 2<sup>nd</sup> order : contour line showing the transgressive trend between Aptian and Turonian. On the right : palaeogeographical aspect of the North of France at 4 stages (Robaszynski & Amédéo in Beckary ed. 2002).

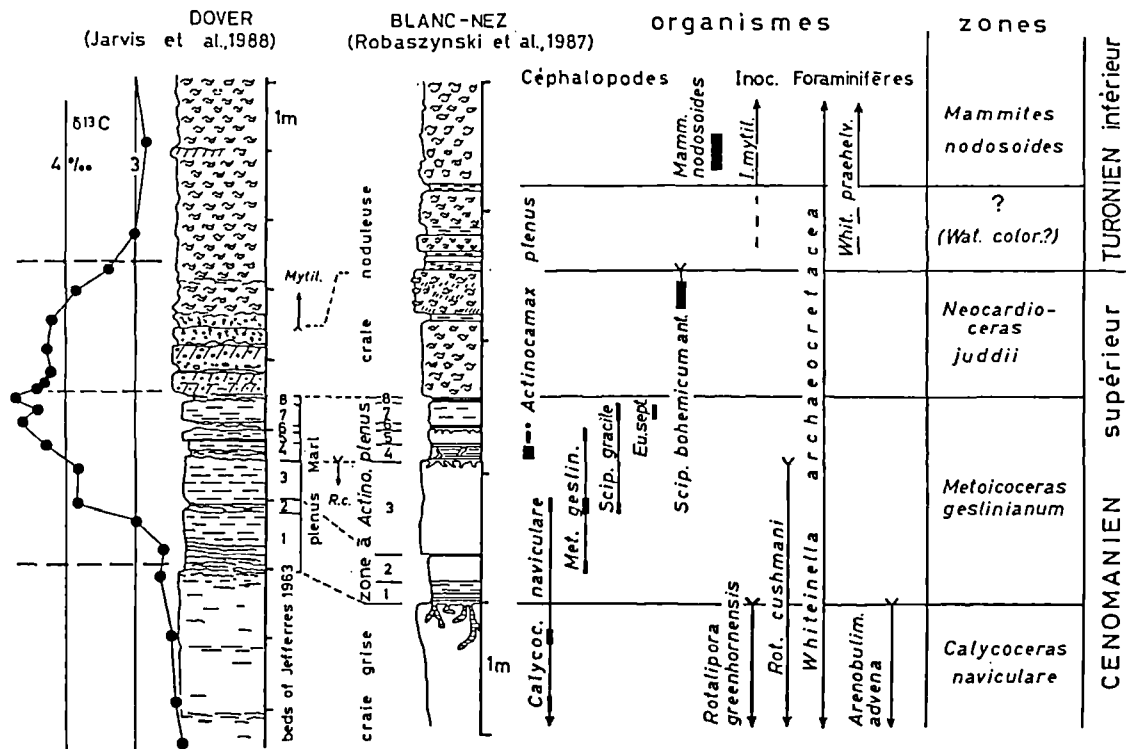


Fig. 10. — La zone à *Actinocamax plenus* (Fm des Crupes, K). A gauche : courbe de variation du rapport des isotopes stables C13/C12 =  $\delta^{13}C$  indiquant le développement d'une période hypoxique dans la mer du Cénomanién terminal (augmentation du  $\delta^{13}C$  d'environ 1,5 ‰).

Fig. 10. — The *plenus* zone. At the left : the  $\delta^{13}C$  variation curve, indicative of a hypoxic time within the uppermost Cenomanian.

plateau continental. En effet, le C12 est le plus abondant dans la nature et, s'il est enfoui dans des sédiments anoxiques, il ne peut plus être oxydé puis recyclé dans les eaux océaniques. De ce fait sa teneur relative baisse au profit du C13 qui paraît alors plus abondant (bien que la variation ne soit que de + 1 à 2 ‰, elle est suffisante pour être significative et détectée au spectrographe de masse).

Ainsi le rapport isotopique C13/C12 (nommé  $\delta^{13}C$  et exprimé en ‰) augmente quand le plateau continental reçoit des dépôts riches en matière organique, ce qui se réalise lors des transgressions majeures.

Dans le cas de la zone à *A. plenus*, des travaux menés à Douvres (Jarvis et al., 1988), montrent une augmentation très sensible du  $\delta^{13}C$  dans le Cénomanién terminal (fig. 10). Actuellement, des travaux sont engagés sur cette zone au Grand Blanc-Nez pour contrôler les valeurs du  $\delta^{13}C$  dont les fluctuations au cours du temps s'avèrent un outil de précision pour des corrélations à grande distance par exemple avec des coupes étudiées en Tunisie (Accarie et al., 1996) ou dans le Western Interior.

### 8) Autres techniques physico-chimiques.

Dans le domaine géochimique, on dispose de techniques d'analyses pour mesurer les teneurs en éléments-traces du manganèse et du strontium ou de ses isotopes. Les courbes de variations du Mn correspondent assez bien avec celles du  $\delta^{13}C$  tandis que certaines valeurs des rapports des isotopes du Sr peuvent servir d'éléments de datation (in Juignet, 1997).

La minéralogie des cortèges argileux des craies est en partie contrôlée par le binôme érosion-variation de niveau marin. Au Cénomanién inférieur les smectites dominent puis, du Cénomanién moyen au Turonien moyen, le couple illite-kaolinite devient prépondérant et correspond à la transgression cénomano-turonienne (Deconinck et al., 1989).

La magnétostratigraphie n'a pas été testée par le fait qu'il n'y a pas d'inversion magnétique majeure dans la chronozone 34, c'est-à-dire de l'Aptien au Santonien. En revanche, des datations radiométriques avec la méthode potassium-argon ont été réalisées sur des glauconies du Cénomanién basal. Les résultats proposent un âge de 94,6 millions d'années +/- 3, 7 en utilisant les constantes de désintégration de l'époque des mesures (Elewaut & Robaszynski, 1977). La valeur de ces constantes ayant changé depuis, la valeur calculée maintenant correspond sensiblement à un âge de 96 millions d'années pour la base du Cénomanién (ou de 98,9 MA avec les constantes américaines, cfr. Robaszynski et al., 1998). D'autres moyens d'étude existent encore mais n'ont pas été mis en œuvre dans les craies du Nord de la France (Juignet, 1997).

### 9) La biostratigraphie.

Du Boulonnais au Cambrésis, des travaux macro- et micropaléontologiques ont été développés depuis 1975, de l'Aptien au Santonien. Les principaux résultats figurent dans la colonne de droite du tableau I et peuvent être résumés de la façon suivante (références dans les notes de F. Amédéo et F. Robaszynski).

- *Ammonites* : les récoles *in situ* de spécimens bien localisés dans des coupes métrées et détaillées au point de vue de la lithologie ont abouti à la construction d'échelles de distribution verticale et à des zonations : 4 zones dans l'Aptien, 18 dans l'Albien – l'étage le plus long avec ses 12 à 13 Ma, 8 dans le Cénomaniens et 3 dans le Turonien. Au-dessus, les ammonites sont trop rares pour fonder une zonation.

Suivant les zones, la précision temporelle peut varier de 0,2 à plus d'1 MA.

- *Autres macrofaunes* : les inocérames, les échinides et certains lamellibranches, gastéropodes, brachiopodes et coraux viennent épauler très utilement les zonations par ammonites.

- *Foraminifères* : en associant les formes benthiques et planctoniques, on peut établir de l'Albien au Santonien au moins 14 subdivisions qui reflètent celles fixées par Monciardini (1980) pour les besoins de la cartographie des régions crayeuses. A des fins chronostratigraphiques, les biozones mises en œuvre dans le Boulonnais (Robaszynski *in* Robaszynski & Amédro, 2001) tiennent compte de l'évolution de la définition des étages selon les discussions lors du Symposium de Bruxelles en 1995 sur les limites des étages crétaés.

- *Autres microfossiles* : les nannofossiles calcaires, les dinoflagellés et les ostracodes fournissent également des moyens de datation relative qui peuvent compléter les zonations par foraminifères (Robaszynski *et al.*, 1980).

*Remarque* : les outils physico-chimiques – excepté les méthodes radiométriques – sont très généralement « équivoques », c'est-à-dire qu'ils ne peuvent pas assurer des corrélations temporelles certaines : un hardground, un lit de silex, un cycle de Milankovitch ne donnent pas un âge, ils peuvent s'individualiser à n'importe quelle place dans la suite stratigraphique.

A l'inverse, les outils biostratigraphiques sont univoques et permettent des corrélations temporelles à grande distance pour autant que les espèces ne soient pas diachrones et que l'on n'utilise pas des espèces endémiques, restreintes à des provinces marines sans communications avec leurs voisines.

## 10) Les événements et la stratigraphie événementielle.

Un événement géologique est un fait de courte durée affectant une grande surface. Il peut s'agir d'un niveau d'abondance d'un fossile ou bien le moment d'apparition ou d'extinction d'une espèce, de la présence d'un niveau marneux détritique ou volcanique ou d'un banc de silex particulier, d'un pic d'isotope stable – par exemple  $\delta^{13}\text{C}$  lié à une période anoxique – de figures sédimentologiques spéciales telles les bioturbations, les structures lamellaires, les hardgrounds, etc.

La plupart de ces événements sont considérés comme isochrones à l'échelle des temps géologiques et, une fois répertoriés et inclus dans un cadre biostratigraphique contraint par des macro- et microfossiles marqueurs, ils permettent d'édifier une succession d'horizons repères conduisant à un repérage stratigraphique immédiat sur le terrain. Ils définissent des lignes-temps très fines comparativement aux zones macro- et micropaléontologiques beaucoup plus longues. La stratigraphie événementielle apparaît ainsi comme un outil de précision complémentaire à celui de la biostratigraphie « classique ».

L'inventaire des principaux horizons-repères de l'Albien au Santonien dans le Nord de la France est résumé dans la colonne de droite du tableau I.

A titre d'exemple de terrain, on peut reprendre les événements majeurs visibles dans le Cénomano-Turonien

exposé de façon permanente dans les falaises du Cap Blanc-Nez et qui se retrouvent quasiment à l'identique dans les falaises britanniques entre Folkestone et Douvres ou dans celles du Sussex ainsi que dans l'Aube.

La figure 11 montre clairement une suite d'une quarantaine d'événements de diverse nature (selon Amédro & Robaszynski, 2001) bien exposés depuis le Cap Petit Blanc-Nez jusqu'au Cap Grand Blanc-Nez.

1. - Un événement sédimentologique : la présence de glauconie et de phosphate dans une craie granuleuse, indiquant la base d'une transgression (c'est le « Tourtia ») ;

- un événement biologique : l'abondance d'*Inoceramus crippsi* ;

- un événement lithologique : une bande métrique de marne bleue à glauconie et grains de quartz indiquant un nouvel Intervalle Transgressif.

2. - Un événement lithologique : une bande décimétrique de marne sableuse finement glauconieuse avec graviers phosphatés pénétrant par des bioturbations du genre *Thalassinoides* dans la craie sous-jacente, marquant une nouvelle surface de transgression.

3. Trois événements se succèdent :

- un événement volcanique : une bande de 2 dm de marne très sombre à bentonite se voit très nettement comme une forte ligne noire en falaise ;

- un événement lithologique : deux bancs à nombreuses éponges très lithifiées ;

- un événement biologique entre les deux précédents : c'est le 1<sup>er</sup> niveau d'abondance de la petite rynchonelle *Orbirhynchia mantelliana*.

4. Un ensemble de cinq événements se développe sur environ 6 m :

- un événement lithologique : deux bancs crayeux distants de 2 m et liés à des alternances de type Milankovitch ;

- trois événements écologiques : des bioturbations de teinte claire, un 2<sup>ème</sup> niveau à *O. mantelliana*, un horizon à *Entolium* et autres petits fossiles ;

- un événement lithologique : le sommet du banc crayeux supérieur est perforé et induré et constitue une surface de transgression.

5. - Un événement bio-écologique au sein de 6 alternances : un 3<sup>ème</sup> niveau à *O. mantelliana* associé à de nombreuses ammonites déroulées *Sciponoceras baculoide* ;

- un événement lithologique : le banc supérieur des 6 alternances est une surface d'érosion à grande distribution géographique (la « Mid Cretaceous non sequence » des auteurs anglais).

6. Trois événements se succèdent sur environ 6 mètres :

- deux événements bio-écologiques : abondance d'*Inoceramus atlanticus* puis de la petite huître *Pycnodonte* ;

- un événement sédimentologique : un banc d'environ 3 m de calcarénite dont les « structures lamellaires » apparaissent sous la forme de lentilles aplaties cm à dm (mini-chenaux ?).

7. La limite Cénomano-Turonien est jalonnée par une suite d'au moins une vingtaine de litho-bio-et chimio-événements sur à peine 3 m d'épaisseur (fig. 10) :

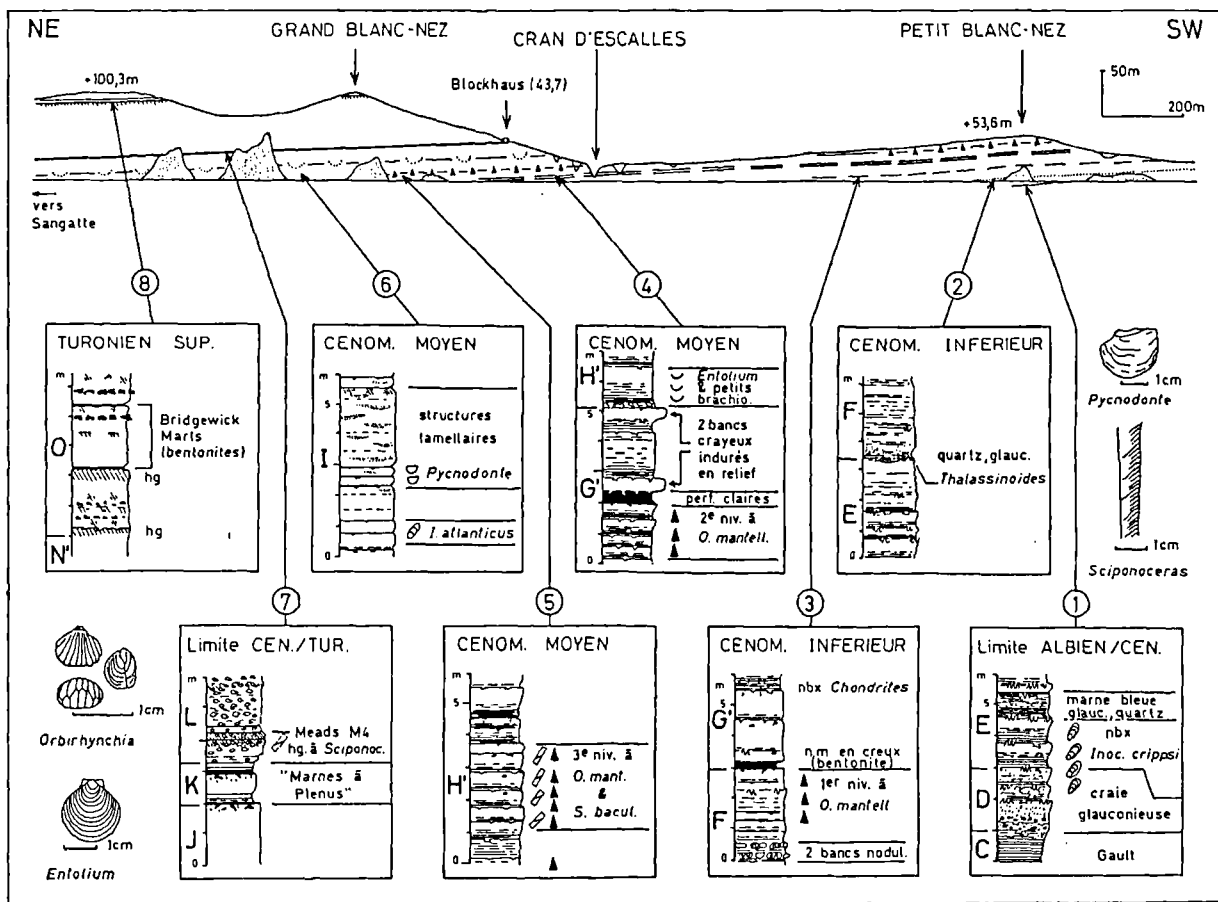


Fig. 11. — Quelques événements d'ordre lithologique, bio-écologique, volcanique et géochimique dans les craies du Cénomanien et du Turonien entre les caps Petit et Grand Blanc-Nez du Boulonnais.

Fig. 11. — Some litho-bio-chemico-events in the Cenomanian-Turonian chalks between Petit and Grand Blanc-Nez in the Boulonnais.

- une douzaine d'événements lithologiques : le sommet perforé de la craie massive, les 8 bancs (« beds ») du niveau à *A. plenus*, le hardground à *Sciponoceras*, les 2 niveaux du Mead Marls, le début de la craie noduleuse ;

- au moins 5 événements biologiques importants : l'extinction du foraminifère *Rotalipora cushmani* dans le banc 3, la présence d'*A. plenus* dans les bancs 4, 5 et 6, l'extinction d'au moins 4 espèces d'ammonites cénomaniennes, l'apparition des *Inoceramus mytiloides* etc ;

- des événements géochimiques : pics de  $\delta^{13}C$  dans les deux dernières zones d'ammonites du Cénomanien.

8. - Des événements volcaniques dans le Turonien supérieur : 2 niveaux marneux à bentonite (Bridgewick marls), l'inférieur reposant sur un hardground.

### 11) La tectonique.

Le Boulonnais est encore la région la plus favorable pour les études tectoniques grâce aux affleurements en falaise et aux carrières ouvertes dans la craie (Colbeaux *et al.*, 1991). Vandycke et Bergerat (1992) ont relevé les accidents, mesuré les direction et pendage des fractures, en ont déduit la cinématique des failles et décrochements ainsi que les paléocontraintes et en ont extrait les implications géodynamiques.

Les travaux du tunnel sous la Manche ont également été l'occasion de traiter statistiquement les mesures en souterrain, de voir la localisation des accidents et d'accéder à la déformation des matériaux. Les résultats ont conduit Pairis *et al.* (1997) à replacer dans le contexte Nord-Européen les serrages et distensions qui ont affecté la région, du Crétacé au Néogène. De plus, les levés géologiques nécessités par la révision de la carte géologique au 1/50000<sup>e</sup> de Marquise ont été appuyés par des sondages à la tarière sur 5 sites le long de l'accident NW-SE de Landrethun. L'interprétation de l'étude lithologique de ces sondages conduit à considérer cet accident comme une flexure plutôt qu'une faille telle qu'elle apparaissait sur les cartes géologiques depuis Gosselet (Robaszynski & Amédéo, 2001).

### 12) La cartographie au 1/50000<sup>e</sup>.

Les contours des étages et sous-étages du Crétacé de la première édition de la feuille de Marquise avaient été assurés par Jean-Paul Destombes en 1971, à l'époque où l'outil micropaléontologique n'était pas encore d'utilisation systématique. De ce fait, aucune division chronostratigraphique n'était possible du Turonien supérieur au Santonien, intervalle qu'il plaçait dans un ensemble de « craie blanche à silex ».

Dans la révision de la feuille de Marquise dont les minutes ont été remises en 1997, on a pu séparer, grâce à l'étude des foraminifères extraits d'échantillons venant de plus d'une centaine d'affleurements, le Turonien supérieur, le Coniacien et le Santonien, et tracer des limites entre ces étages. Une épreuve de la 2<sup>ème</sup> édition de la feuille de Marquise a été présentée en 2000 au cours d'une séance spéciale de la Société géologique du Nord mais la carte définitive n'est pas encore à la disposition du public.

#### V. — CONCLUSION.

Après plus d'un siècle, les observations géologiques sur le Crétacé que Gosselet a consignées principalement dans les Annales de la Société géologique du Nord restent toujours des éléments d'information et d'analyse utilisables. Certes, certaines interprétations ou accolades stratigraphiques ont changé mais un fait de terrain, s'il est bien décrit, reste interprétable même si les grilles de lecture ont évolué. Dans ce sens, Gosselet, ses élèves et les membres de la Société qu'il a fondée en 1870 ont accompli un énorme travail.

Aujourd'hui, le regard s'est fait plus précis, plus pointu, mais le champ de vision s'est rétréci. La spécialisation apporte plus de compétence mais peut rendre le géologue aveugle dans bien des domaines. Toutefois, dans les 12 parties assez inégales qui font l'essentiel de cette mise au point destinée à un public large mais curieux, on aura pu se rendre compte que l'introduction de techniques et de concepts nouveaux ont conduit à des interprétations également nouvelles de faits géologiques restés antérieurement mal expliqués.

Maintenant, la litho-bio-chimio- et cyclostratigraphie ainsi que l'analyse séquentielle convergent en une stratigraphie intégrée où la stratigraphie événementielle prend une large part et permet – quand les conditions sont favorables et les critères suffisamment nombreux – de pratiquer la corrélation à 20000 ou 10000 ans près sur des distances de plusieurs centaines à plusieurs milliers de kilomètres pour des temps éloignés de 120 à 65 millions d'années. Cette précision temporelle pourra se décliner également dans les aspects tectoniques et cartographiques.

#### BIBLIOGRAPHIE

- ACCARIE H., EMMANUEL L., ROBASZYNSKI F., BAUDIN F., AMÉDRO F., CARON M. & DECONINCK J.-F. (1996). — La géochimie isotopique du carbone ( $\delta^{13}C$ ) comme outil stratigraphique. Application à la limite Cénomaniens-Turonien en Tunisie centrale. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 322, 11a, 579-586.
- AMÉDRO F. & ROBASZYNSKI F. (1997). — L'Aptien-Albien à Wissant et au tunnel sous la Manche à Sangatte (France) : la transgression éocrétacée au nord du bassin de Paris. *Géol. France*, 4, B.R.G.M., 15-26.
- AMÉDRO F. & ROBASZYNSKI F. (1999). — Les craies cénomaniennes du Boulonnais. Comparaison avec l'Aube (France) et le Kent (Royaume-Uni). *Géol. France*, 2, 33-53.
- AMÉDRO F. & ROBASZYNSKI F. (2001) - Les craies à silex du Turonien supérieur au Santonien du Boulonnais (France) au regard de la stratigraphie événementielle. Comparaison avec le Kent (U.K.). *Géol. France*, B.R.G.M., 2000, n°4, 39-56.
- AMÉDRO F. & ROBASZYNSKI F. (2001). - Evénements sédimentaires et bio-écologiques dans les craies du Boulonnais : des repères pour des corrélations précises intra- et interbassins. *Ann. Soc. géol. Nord*, 8 (2è s.), 159-171.
- AMÉDRO F. & ROBASZYNSKI F. (2001). - Les craies cénomaniennes du Cap Blanc-Nez (France) au regard de la stratigraphie événementielle. Extension de niveaux-repères du bassin anglo-parisien (Boulonnais, Kent, Normandie) à l'Allemagne du Nord. *Bull. trim. Soc. géol. Normandie et Amis Muséum du Havre*, 87, 2 et 3, 9-29.
- AMÉDRO F. & ROBASZYNSKI F. (2001). - Les craies turoniennes du Boulonnais (France) au regard de la stratigraphie événementielle. Comparaison avec le Kent (UK) et la Normandie (F). *Bull. trim. Soc. géol. Normandie et Amis Muséum du Havre*, 87, 2 et 3, 31-49.
- AMÉDRO F. (1993). — La lithostratigraphie et les biofaciès : des outils de corrélation dans les craies cénomaniennes du détroit du Pas de Calais. *Ann. Soc. géol. Nord*, 2<sup>ème</sup> s., 2, 73-80.
- BARROIS Ch. (1873). — Comparaison des assises crétacées mises au jour dans les tranchées du chemin de fer de Saint-Omer à Boulogne avec celles du Blanc-Nez. *Mém. Soc. Sci. Agric. Arts Lille*, 3, 11, 63-75.
- BARROIS Ch. (1874). — Sur le Gault et sur les couches entre lesquelles il est compris dans le bassin de Paris. *Ann. Soc. géol. Nord*, 2, 1-61.
- BARROIS Ch. (1875). — La zone à *Belemnites plenus*. Etude sur le Cénomaniens et le Turonien du Bassin de Paris. *Ann. Soc. géol. Nord*, 2, 146-193.
- BARROIS Ch. (1878). — Mémoire sur le terrain crétacé des Ardennes et des régions voisines. *Ann. Soc. géol. Nord*, 5, 227-487.
- BARROIS Ch. (1920). — Jules Gosselet. *Ann. Soc. géol. Nord*, 44, 10-47.
- BECKARY S. éd. (2002). — Géologie, patrimoine et environnement en Nord – Pas-de-Calais. Résumés d'interventions du colloque, Musée d'Histoire naturelle de Lille, 72 p.
- BERGER A. (1988). — Milankovitch theory and climate. *Rev. Geophys.*, 26, 624-657.
- BERGER A. (1992). — Le climat de la Terre. De Boeck Université, 479 pp.
- BONTE A. (1969). - Le Boulonnais. *Ann. Soc. géol. Nord*, 89, 23-46.
- BRIQUET A. (1919). — Turonien supérieur et Sénomien inférieur dans le Nord de la France. *Ann. Soc. géol. Nord*, 44, 127-137.
- BROMLEY R.G. & EKDALE A.A. (1984). — Trace fossil preservation in flint in the European chalk. *Journ. of Paleontol.*, 58, 298-311.
- BROMLEY R.G. (1996). — Trace fossils, biology, taphonomy and applications. 2<sup>nd</sup> edn. Chapman and Hall, London, 361 pp.
- BRONGNIART A. (1835). — Sur quelques terrains de craie hors du bassin de Paris. I. Craie de France. In CUVIER G. & BRONGNIART A. : Description géologique des environs de Paris, 3<sup>e</sup> édition p. 144-154. Paris, E. d'Ocagne.
- « BRUXELLES 1995 » : — Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Int. Symp. on Cret. Stage boundaries RAWSON P.F. et al. edit. 1996, *Bull. Inst. roy. Sc. nat., Belgique*, 66, suppl., 117 pp.
- CELET P. (1969). — Géologie du Cambésis et des régions environnantes. *Ann. Soc. géol. Nord*, 89, 91-102.

- CHELLONNEIX E. (1872). — Cap Blanc-Nez : note sur le Diluvium de Sangatte et les assises crétacées du Cap. *Mém. Soc. Sc. Agri., Arts, Lille*, 3<sup>e</sup> s., 10, 27 p., 1 pl.
- CHELLONNEIX E. (1872). — Note sur la craie du cap Blanc-Nez. *Ann. Soc. géol. Nord*, 3<sup>e</sup> s., 3, 431-439.
- COLBEAUX J.-P., AMÉDRO F., BERGERAT F., BRACQ P., CRAMPON N., DELAY F., DUPUIS C., LAMOUREUX C., ROBASZYNSKI F., SOMMÉ J., VANDYCKE S. & VIDIER J.-P. (1993). — Un enregistreur des épisodes tectoniques dans le bassin de Paris : le Boulonnais. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 164, 93-192.
- COQUAND H. (1857). — Position des *Ostrea columba* et *biariculata* dans le groupe de la craie inférieure. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 2, 14, 745-766.
- CRAMPON N. éd. (1997). — La craie : objet géologique, réservoir, matériau et paysage. *Ann. Soc. géol. Nord*, 2<sup>e</sup> s., 5, fasc. 3.
- DECONINCK J.-F., AMÉDRO F., DESPRAIRIES A., JUIGNET P. & ROBASZYNSKI F. (1991). — Niveaux repères de bentonites d'origine volcanique dans les craies du Turonien du Boulonnais et de Haute Normandie. *C.R. Acad. Sci. Paris*, 312, 2, 897-903.
- DECONINCK J.-F., HOLTZAPFFEL T., ROBASZYNSKI F. & AMÉDRO F. (1989). — Données minéralogiques, géochimiques et biologiques comparées dans les craies cénomaniennes à santoniennes du Boulonnais. *Geobios*, mém. sp., 11, 179-188.
- DELATTRE Ch. (1969). — Les grands traits géologiques de l'Artois. *Ann. Soc. géol. Nord*, 89, 79-90.
- DESTOMBES J.-P. & P. (1938). — Note sur le Gault de Wissant. *Ann. Soc. géol. Nord*, 62, 98-121.
- DESTOMBES J.-P. (1971). — Carte géologique à 1/500000, feuille de Marquise, contours du Crétacé. BRGM, Orléans.
- DESTOMBES P. (1979). — Ammonites. In : Le stratotype de l'Albien. RAT edit. CNRS, Paris.
- DUHAMEL, MALLET, MONNET & TIESSET (1795). — Mémoire sur la minéralogie du Boulonnais, dans ses rapports avec l'utilité publique. *Journal des Mines*, Paris, 1, 34-54.
- DUTERTRE A.P. (1925). — Note sur le Crétacé inférieur du Bas-Boulonnais. *Ann. Soc. géol. Nord*, 48, 35-74.
- EKDALE A.A. & BROMLEY R.G. (1991). — Analysis of composite ichnofabrics : an example in Uppermost Cretaceous chalk of Denmark. *Palaios*, 6, 232-249.
- ELEWAUT E. & ROBASZYNSKI F. (1977). — Datations par la méthode K/Ar de glauconies crétacées du Nord de la France. *Ann. Soc. géol. Nord*, 97, 179-189.
- FRÖLICH F. (1991). — La matière et l'esprit : le silicium. Du May, Paris, 140 pp.
- GALE A.S. (1990). — A Milankovitch scale for Cenomanian time. *Terra Nova*, London, 1, 420-425.
- GAUDRY (1860). — Découverte de l'*Ostrea Leymeriei* à Wissant (Pas-de-Calais). *Bull. Soc. géol. Fr.*, 2, 17, 30-33.
- GILBERT G.K. (1895). — Sedimentary measurement of geological time. *Jl. of Geology*, 3, 121-125.
- GOSSELET J. (1858). — Note sur l'existence du Gault dans le Hainaut. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 2, 16, 122-130.
- GOSSELET J. (1881). — Esquisse géologique du Nord de la France et des contrées voisines. 2<sup>e</sup> fasc. : terrains secondaires. *Soc. géol. Nord*, 38, 169-278.
- GOSSELET J. (1902). — Observations sur la sédimentation de la craie. *Ann. Soc. géol. Nord*, 31, 63-79.
- GOSSELET J. (1904-1913). — Les assises crétaciques et tertiaires dans les fosses et les sondages du Nord de la France. Paris, Imprimerie nationale, 4 fascicules.
- GOSSELET J. (1909). — Aperçu géologique du département du Nord. *Ann. Soc. géol. Nord*, 38, 192-223.
- GROSSOUVRE A. de (1901, 1908). — Recherches sur la craie supérieure. Stratigraphie générale. *Mém. Carte géol. Fr.*, 1013 pp. ; II : les Ammonites de la craie supérieure. *Mém. carte géol. Fr.*, 264 pp.
- HANCOCK J.M., KENNEDY W.J. & WRIGHT C.W. (1977). — Towards a correlation of the Turonian Sequences of Japan with those of North-West Europe. *Paleont. Soc. Japan*, spec. pap. n°21, 151-168.
- HÉBERT E. (1863). — Note sur la craie blanche et la craie marseuse dans le bassin de Paris, et sur la division de ce dernier étage en quatre assises. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 2e s., 20, 605-631.
- HÉBERT E. (1874). — Comparaison de la craie des côtes d'Angleterre avec celle de France. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 3e s., 2, 416-428.
- HÉBERT E. (1875). — Classification du terrain crétacé supérieur. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 3e s., 3, 595-599, 1 tabl.
- JARVIS I., CARSON G.A., COOPER M.K.E., HART M.B., LEARY P.N., TOCHER B.A., HORNE D. & ROSENFELD A. (1988). — Microfossil assemblages and the Cenomanian-Turonian (Late Cretaceous) Oceanic Anoxic Event. *Cret. Research*, 9, 3-103.
- JEFFERIES R.P.S. (1963). — The stratigraphy of the Actinocamax plenus subzone in the Anglo Paris Basin. *Proceed. Geol. Ass.*, 74, 1-33.
- JUIGNET P. & BRETON G. (1997). — Brèches de silex, diagenèse et déformation dans les craies de Haute-Normandie (France). *Ann. Soc. géol. Nord*, 2<sup>e</sup> s., 5, 227-240.
- JUIGNET P. & KENNEDY W.J. (1974). — Structures sédimentaires et mode d'accumulation de la craie du Turonien supérieur et du Sénonien du Pays de Caux. *Bull. BRGM*, 4, n°1, 19-47.
- JUIGNET P. & KENNEDY W.J. (1976). — Faunes d'ammonites et biostratigraphie comparée du Cénomaniens du nord-ouest de la France (Normandie) et du sud de l'Angleterre. *Bull. Soc. géol. Normandie et Amis Muséum Le Havre*, 63, 1-192.
- JUIGNET P. (1997). — La craie : sédimentation et enregistrements stratigraphiques. Apports des méthodes d'études classiques et d'approches nouvelles. *Ann. Soc. géol. Nord*, 2<sup>e</sup> s., 5, 145-158.
- LAVALLEY A., LAROUSSE E., POTIER A. & LAPPARENT A. de (1877). — Chemin de fer sous-marin entre la France et l'Angleterre. Rapports sur les explorations géologiques faites en 1875 et 1876. Paris, 55 pp.
- LEHON (1864). — Note sur les couches néocomiennes et albiennes de Wissant. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 2, 21, 14-16.
- MARIE P. (1941). — Zones à foraminifères des marnes du Gault à Wissant (Pas-de-Calais). *C.R. somm. Soc. géol. Fr.*, 53-55.
- MONCIARDINI C. (1980). — Sénonien. In MEGNIEN C. ed. : synthèse géologique du Bassin de Paris. *Mém. BRGM* n° 101, vol. 1, 302-306.
- MORTIMORE R.N. (1983). — The stratigraphy and sedimentation of the Turonian-Campanian in the Southern province of England. *Zitteliana*, 10, 27-41.
- MORTIMORE R.N., WOOD C.J. & GALLOIS R.W. (2001). — British Upper Cretaceous Stratigraphy. Geological Conservation Review Series, n°23, Joint Nature Conservation Committee, Peterborough, 558 pp.



- ORBIGNY A. d' (1842-1947). — Paléontologie française. Terrains crétacés. Masson. Paris.
- OWEN H.G. (1875). — The stratigraphy of the Gault and Upper Greensand of the Weald. *Proc. Geol. Ass.*, 86, 475-498.
- PAIRIS J.L., MILLIEN A. & SIRIEYS P. (1997). — Fracturation et déformation de la craie. Retour d'expérience de la partie française du Trans-Manche. *Ann. Soc. géol. Nord*, 2<sup>e</sup> s., 3, 257-266.
- PHILLIPS W. (1819). — Remarks [...] containing some account of the Chalk Cliffs on the Coast of France, opposite to Dover. *Trans. Geol. Soc. London*, ser.1, 5, 17-51.
- POTIER A. & LAPPARENT A. de (1875). — Rapport sur l'exploration géologique sous-marine du Pas-de-Calais. 33-55 in LAVALLEY *et al.*, 1877.
- RIGAUX E. (1866). — Notice stratigraphique sur le Bas-Boulonnais. *Bull. Soc. Acad. Boulogne-sur-Mer*, 1, 95-123.
- ROBASZYNSKI F. & AMÉDRO F. (1993). — Les falaises crétacées du Boulonnais. La coupe de référence du Cap Blanc-Nez dans un contexte sédimentaire global. *Ann. Soc. géol. Nord*, 2 (2<sup>e</sup> s.), 31-44.
- ROBASZYNSKI F. & AMÉDRO F. (2001). — Des nouveautés dans le Crétacé de la feuille de Marquise (Ed. 2000). *Ann. Soc. géol. Nord*, 9 (2<sup>ème</sup> s.), 25-38.
- ROBASZYNSKI F. (1994). — Les craies du Bassin de Mons. In QUINIF Y. ed. Craies et calcaires en Hainaut, Calexpo, Fac. Pol. Mons, 16-25.
- ROBASZYNSKI F., AMÉDRO F., coord. et FOUCHER J.-C., GASPARD D., MAGNIEZ-JANNIN F., MANIVIT H. & SORNAY J. (1980). — Synthèse biostratigraphique de l'Aptien au Santonien du Boulonnais à partir de sept groupes paléontologiques : foraminifères, nannoplancton, dinoflagellés et macrofaunes. *Revue Micropal.*, Pasis, 22, 195-321.
- ROBASZYNSKI F., coord. (2000). — Actes des deuxièmes journées nationales du Patrimoine géologique, Lille, 16-18 juin 1999. *Ann. Soc. géol. Nord*, 7, 149-232.
- ROBASZYNSKI F., GALE A., JUIGNET P., AMÉDRO F. & HARDENBOL J. (1998). — Sequence Stratigraphy in the Upper Cretaceous series of the Anglo-Paris Basin : exemplified by the Cenomanian stage. In: DE GRACIANSKY P.-C., HARDENBOL J., JACQUIN T. & VAIL P.R. (eds) : Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European Basins. SEPM Special Publication n° 60, 363-386.
- ROZET (1828). — Description géognostique du Bassin du Bas-Boulonnais. Paris, 119 pp.
- VAIL P.R., COLIN J.P., JANDUCHENER R., KUCHLY J., MEDIIVILLA P. & TRIFILIEFF V. (1987). — La stratigraphie séquentielle et son application aux corrélations chronostratigraphiques dans le Jurassique du Bassin de Paris. *Bull. Soc. géol. Fr.*, III, 8, 1301-1321.
- VANDERAVEROET P., AMÉDRO F., COLLETÉ C., DECONINCK J.-F., RECOURT Ph. & ROBASYNSKI F. (2000). — Caractérisation et extension de niveaux repères de bentonites dans le Turonien supérieur du Bassin de Paris (Boulonnais, Aube). *Geodiversitas*, 22, 457-469.
- VANDYCKE S. & BERGERAT F. (1992). — Tectonique de failles et paléo-contraintes dans les formations crétacées du Boulonnais (France). Implications géodynamiques. *Bull. Soc. géol. Fr.*, 163, 553-560.
- WATERLOT G. (1969). — Aperçu géologique de la région de Lille. *Ann. Soc. géol. Nord*, 89, 67-77.
- WRAY D.S. (1999). — Identification and long-range correlation of bentonites in Turonian-Coniacian (Upper Cretaceous) chalks of northwest Europe. *Geol. Magazine*, 136, 361-371.
- ZIJLSTRA J.J. (1994). — Sedimentology of the Late Cretaceous and Early Tertiary (tuffaceous) chalk of Northwest Europe. *Med. Fac. Aard. Univ. Utrecht*, Geologica Ultraiectina, n°119, 192 pp.



## FORMATIONS SUPERFICIELLES OU QUATERNAIRE : LES DONNÉES DE LA FRANCE SEPTENTRIONALE DEPUIS JULES GOSSELET ET JULES LADRIÈRE

### Superficial deposits or Quaternary : the data of Northern France from Jules Gosselet and Jules Ladrière

par Jean SOMMÉ (\*)

*Résumé.* — Les données sur le Quaternaire acquises à l'époque de Gosselet ont ensuite été oubliées au profit de théories illusives, en particulier sur les cartes géologiques jusqu'aux années soixante-dix. La classification des limons due à Ladrière, adoptée par Gosselet, est pourtant un système lithostratigraphique qui préfigurait l'étude moderne des loess. De même a été rejetée l'évidence des systèmes de terrasses étagées des vallées artésiennes. En dehors du Flandrien, la théorie des niveaux marins a faussé l'interprétation de la falaise fossile de Sangatte qui est d'âge pléistocène moyen comme la Formation d'Herzele.

*Abstract.* — *The Quaternary data obtained at the epoch of Gosselet were then forgotten for the benefit of illusive theories, particularly on the geological maps until seventies. The classification of loams by Ladrière, adopted by Gosselet, is yet a lithostratigraphical system which prefigured the modern study of loess. In like manner was rejected the obviousness of stepped terraces systems of Artois valleys. Out of Flandrian, the theory of marine levels has warped the interpretation of the Sangatte fossil cliff which is Middle Pleistocene old like the Herzele Formation.*

#### I. — INTRODUCTION

Jules Gosselet et Jules Ladrière, deux noms associés, car lorsque le premier publie en 1903 le 4<sup>ème</sup> fascicule de son Esquisse géologique du Nord de la France, consacré aux terrains quaternaires, il présente la stratigraphie du terrain pléistocène en se référant directement à la classification établie par le second (Ladrière, 1890). Ce système est aussi exposé en 1900 lors de l'excursion du Congrès géologique international dirigée conjointement par Gosselet et Ladrière.

En partant de l'état des conceptions et des connaissances sur le Quaternaire régional à l'époque de Gosselet, dont la modernité est à souligner, il est intéressant d'observer le destin inégal de cet héritage, en partie abandonné ou oublié, au cours du siècle qui suit, au profit de théories illusives. Parallèlement la notion de « formations superficielles » est apparue dans la cartographie géologique et a eu tendance à se substituer à celle de « Quaternaire » avec les problèmes que cela pose encore actuellement. En effet, à partir de 1968, dans la légende de certaines feuilles de la carte géologique régulière à 1/50 000 de la région du Nord (Arras, Cassel, Cambrai en 1968 ; Steenvoorde, Hirson en 1969 ; Guînes, Marquise en 1971 ; Desvres, 1979 ; Hazebrouck, 1984 ; Boulogne, 1985)

les dépôts quaternaires continentaux sont regroupés sous la rubrique « formations (ou dépôts) superficiels » et séparés des « formations (ou terrains) sédimentaires ». Une classification plus purement stratigraphique n'est observée que pour les dépôts marins holocènes et pléistocènes des plaines maritimes (Montreuil, 1974 ; Calais, Dunkerque-Hondschoote, 1989).

#### II. — LES LOESS ET DÉPÔTS ASSOCIÉS DE VERSANTS

La classification du terrain quaternaire du Nord établie par Ladrière vaut essentiellement pour les limons et dépôts de versant. Dans une première étude publiée en 1879, surtout à partir de la région du Hainaut, le Quaternaire était divisé en deux périodes (« ancienne » et « récente », ce qui correspond à peu près au Pléistocène et à l'Holocène) et il était en particulier confirmé, en accord avec l'avis de Rutot et Van den Broeck (1878), que la « terre à briques », limon supérieur brun-rougeâtre, était une altération de l'« ergeron », terme populaire wallon qui désignait, dans l'industrie de la brique, une mauvaise terre, impropre à faire des briques en raison de sa teneur en calcaire. Ladrière publie ensuite en 1890 la synthèse stratigraphique où

(\*) Université des Sciences et Technologies de Lille, F 59655 Villeneuve d'Ascq cedex.

sont distinguées trois assises dans le Quaternaire (supérieure, moyenne et inférieure) (Sommé et Tuffreau, 1978). Il s'agit d'un système morpho-lithostratigraphique avant la lettre, montrant les variations latérales de faciès des unités tant régionales que locales et leur répartition dans le relief. Pour cette raison, le système de Ladrière, du moins pour ses assises supérieure et moyenne qui concernent les limons, s'est révélé directement interprétable en termes de stratigraphie des loess (fig. 1). Dès 1907, Briquet constatait que Ladrière, sous le nom de limons, étudiait en réalité les loess et leurs lehms d'altération.

Ainsi la limite entre l'assise moyenne et l'assise supérieure est placée au sommet du limon gris cendré qui surmonte le limon fendillé. En effet cet ensemble est un complexe de sols, défini dans la stratigraphie européenne des loess sous l'appellation de pédocomplexe de Stillfried A : le « limon fendillé » étant l'horizon profond d'un sol de type brun lessivé (Sol de Rocourt), développé au sommet du loess de l'avant-dernier Glaciaire (Saalien) et correspondant à l'Interglaciaire eemien ; le « limon gris cendré » rassemblant plusieurs dépôts et sols humifères de type gris forestier et steppique (Sol de Warneton. Paepé, 1964 ; Sols de Saint-Sauflieu, Antoine *et al*, 1994) et représentant la sédimentation-pédogenèse du Début Glaciaire weichselien. La limite nette (« ravinement ») entre ce complexe de sols et les dépôts limoneux pléniglaciaires weichseliens sus-jacents (« ergeron ») justifie la division morpho-lithostratigraphique de Ladrière.

L'assise moyenne de Ladrière est aussi significative des loess du Pléistocène moyen récent. C'est le cas du « Limon doux jaunâtre à points noirs » que l'auteur signale présent partout, dans le plateau de la Sambre, entre Escaut et Sambre et entre Escaut et Somme. En effet la couverture de loess de la France septentrionale est régulièrement constituée par les séquences des deux derniers glaciaires (Saalien supérieur et Weichselien) (Sommé *et al*, 1980) dont les phases pléniglaciaires ont des caractéristiques climatiques comparables (grandes fentes de gel liées au pergélisol). Avec le « limon panaché argileux », surtout présent dans la zone limoneuse orientale qui est la région-type, en Belgique et en France, de la Formation du Hainaut désignant les loess et paléosols du Pléistocène moyen, on a affaire à des loess anciens altérés par des pédogenèses de rang interglaciaire (Saalien, Holsteinien, Cromérien).

En 1912, il appartient à Commont, dont les études reposent sur le bassin de la Somme, tout en reprenant la classification de Ladrière, de montrer que le loess récent comporte trois ergerons dont l'inférieur est le limon gris cendré et d'insister sur l'importance du limon fendillé qui marque la partie supérieure du loess ancien, ce qui fonde la définition chronostratigraphique des limons du Pléistocène supérieur. Il paraît alors acquis que le limon fendillé est une altération du loess ancien, un « lehm », selon un terme qui a eu beaucoup de succès jusqu'aux années soixante. En effet, comme il représente la pédogenèse de l'Interglaciaire eemien, le « limon fendillé » de Ladrière est le marqueur stratigraphique du début du dernier cycle climatique interglaciaire-glaciaire qui représente le Pléistocène récent. Dès le début du siècle se trouvent ainsi définis les critères qui devaient permettre désormais de distinguer en stratigraphie les limons récents – Würm selon la nomenclature glaciaire

Système de Ladrière		Interpretation litho-et chronostratigraphique					
Assise supérieure	Limon supérieur brun-rougeâtre	Loess récents	Loess	Pléniglaciaire	WEICHSELIEEN	Pléistocène supérieur	
	Limon jaune (ergeron)		Cailloutis				
	Gravier super		Sol de Warneton				Début Glaciaire
Assise moyenne	Limon gris	Loess anciens	Sol de Rocourt	Interglaciaire	EEMIEN	Pléistocène moyen	
	Limon fendillé brun-rougeâtre		Loess				Glaciaires et Interglaciaires
	Limon doux à points noirs		Loess avec sols	HOLSTEINIEN			
	Limon panaché argileux		Cailloutis				
	Gravier moyen						

Fig. 1. — Le système stratigraphique de Ladrière (1890) et son interprétation moderne.

Fig. 1. — Stratigraphical classification of Ladrière (1890) and its present-day interpretation.

alpine, Weichselien selon la chronostratigraphie nordique – des limons anciens.

Dans le Nord de la France, l'importance du système de Ladrière n'a pas été reconnue par Dubois (1924) dont les conceptions basées sur les théories de Lamothe et Depéret ont fait marquer le pas au progrès des connaissances sur les limons. En effet, dans le chapitre de sa thèse consacré à la position stratigraphique des limons, après avoir fait un inventaire critique des classifications stratigraphiques antérieures, Dubois estime que celle de Ladrière donne une image déformée du Quaternaire en exagérant l'importance de l'ensemble formé par les assises moyenne et supérieure, qui ne formerait qu'un manteau recouvrant tous les autres dépôts quaternaires, et conclut que « les limons du Nord de la France sont des formations issues principalement de la désintégration et du remaniement à faible distance du socle préquaternaire », qu'il en est de tous les âges et qu'il n'y a « que des cas particuliers et locaux ». Il admet cependant l'existence de deux séries de limons, hétérogènes, l'une ancienne, l'autre dite récente (ergerons) qu'il date, selon son système stratigraphique, du début du Flandrien.

Les conceptions de Dubois ont influencé durant plusieurs décennies la représentation et l'interprétation des limons sur les cartes géologiques régionales à 1/80 000 et à 1/50 000 qui par ailleurs ne bénéficient guère de données nouvelles en raison de la rareté des études sur le Quaternaire. Dans ce domaine la région du Nord se trouve ainsi relativement à l'écart de l'avancement des connaissances et des idées sur les loess, les sables de couverture et leur stratigraphie qu'on constate dans les pays environnants de l'Europe occidentale.

Dans les dernières feuilles géologiques à 1/80 000 publiées (Arras, réimpression, 1938 ; Lille, 3<sup>e</sup> édit., 1941 ; Douai, 2<sup>e</sup> édit., 1947 ; Saint-Omer, 3<sup>e</sup> édit., 1957 ; Cambrai, 3<sup>e</sup> édit., 1963) et dans les nombreuses nouvelles cartes à 1/50 000 qui paraissent dans les années soixante, les notices présentent les limons (ou limons pléistocènes ou limons des plateaux) en notant que leur composition est très diverse en fonction de la constitution lithologique du sous-sol et qu'il est parfois possible de distinguer deux niveaux (ou couches ou horizons) : la terre à briques, décalcifiée, et l'ergeron. L'origine partiellement éolienne et la nature loessique sont

parfois mentionnées pour les limons du Cambrésis et de l'Artois (Delattre et Mériaux, 1967 ; Celet, 1968 ; Delattre, 1968). Sur les feuilles qui se trouvent au contact des régions à substrats crétacé et tertiaire, l'attribution éolienne est retenue pour les limons reposant sur la craie, mais la couverture limoneuse est réputée sableuse lorsqu'elle surmonte les sables landéniens, et argileuse lorsqu'elle est superposée à l'argile yprésienne en Flandre ou en Pévèle, selon le principe qu'il s'agit d'une « désintégration sur place, sans remaniement » du substrat sous-jacent (Waterlot, 1968 ; Desoignies et Thibaut, 1968 ; Desoignies et Sangnier, 1968 ; Bonte *et al.*, 1971). Pour la Flandre à substrat yprésien, il est cependant signalé que le limon porte le terme impropre d'« argile » qui désigne en réalité une terre à briques dite argilo-sableuse tandis que l'argile des Flandres est dénommée « clyte ». Ces contradictions tiennent alors au fait que la composition granulométrique des formations limoneuses n'a pas été clairement reconnue, la fraction limoneuse proprement dite (50 à 2 micromètres) étant méconnue. Le loess est ainsi décrit comme argilo-sableux, alors qu'il s'agit d'une roche de texture typiquement limoneuse dont la fraction sableuse (plus de 50 micromètres) est très faible et la fraction argileuse (moins de 2 micromètres) le plus souvent inférieure à 20 % en dehors des paléosols. La fraction granulométrique dominante, pour cela parfois appelée fraction loessique, est celle des limons grossiers (50 à 20 micromètres) qui crée en particulier le contact doux au toucher (Jamagne *et al.*, 1981). La couverture loessique s'étend aussi bien en Flandre qu'en Artois et Cambrésis, les faciès éoliens devenant limono-sableux dans le nord de la Flandre intérieure et dans les plaines de la Lys et de la Scarpe (Paepe, 1964 ; Sommé, 1975, 1978, 1980 ; Fourrier, 1989 ; Douay, 1993).

Le recours à la notion de « formations superficielles » qui se généralise à partir des années soixante pour désigner les formations géologiques récentes (essentiellement quaternaires) semble bien correspondre à la conception de limons issus de l'altération du substrat sous-jacent. L'emploi de cette notion traduit aussi l'objet principal de la carte géologique régulière qui est la stratigraphie du substrat, lequel se trouve plus ou moins masqué par les formations superficielles.

C'est à l'occasion des Travaux du Centenaire de la Société géologique du Nord qu'une synthèse sur les loess et la stratigraphie du Pléistocène récent dans le Nord de la France et en Belgique (Paepe et Sommé, 1970) est présentée, qui renoue avec l'héritage oublié de Ladrière. Fruit de nouvelles recherches menées conjointement dans les deux pays et confrontées en particulier dans le cadre de la Sous-Commission pour la Stratigraphie des Loess d'Europe (INQUA) — dont une réunion s'était tenue en 1967 en Belgique et dans le Nord de la France — cette étude montre que les unités lithostratigraphiques du Pléistocène récent se trouvent en continuité régulière selon une zonation éolienne périglaciaire (fig. 2). Celle-ci comporte dans l'Europe du Nord-Ouest la région des sables de couverture, la région de transition sablo-limoneuse et la région des loess et à travers cette zonation apparaît la continuité stratigraphique de la région s'étendant des Pays-Bas à la France septentrionale, ce qui justifie désormais la référence à la nomenclature chronostratigraphique de l'Europe du Nord. Rappelons que dans ce système le Pléistocène débute vers 2,5 Ma avec le Prétiglien, le Pléistocène moyen vers 0,9 Ma avec le Cromérien, le Pléistocène récent vers 125 ka avec l'Eemien, l'Holocène conventionnellement à 10 000 BP.

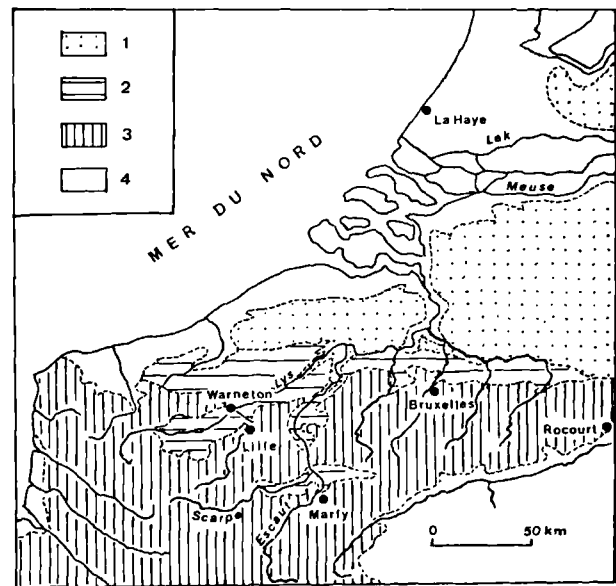


Fig. 2. — Carte des dépôts superficiels du Pléistocène supérieur dans l'Europe du Nord-Ouest (d'après J. Sommé, 1975, modifiée).  
1 : Zone des sables de couverture - 2 : Zone de transition sablo-limoneuse - 3 : Zone des loess - 4 : Holocène.

Fig. 2. — Map of the superficial deposits of Upper Pleistocene in North-western Europe (from J. Sommé, 1975, modified).  
1 : Coversands area - 2 : Sandy-loamy transition area - 3 : Loess area - 4 : Holocene.

La distinction en France entre une région orientale et une région occidentale des loess (Sommé, 1975, 1978, 1980), dont les limites ont varié au cours du temps en fonction de la zonation climato-sédimentaire, est en relation directe avec les observations faites à l'époque de Gosselet et de Ladrière. La région orientale, terrain par excellence de Ladrière, est celle où la forte épaisseur de loess s'accompagne d'une prédominance de dépôts avec paléosols du Pléistocène moyen (Formation du Hainaut) ; le faciès loessique typique caractérise aussi la séquence weichselienne (Formation de Marly). Dans la région occidentale située au NW de l'axe Scarpe-Sensée-Escaut, la sédimentation loessique typique ne se généralise qu'au Weichselien supérieur, les dépôts weichseliens sous-jacents étant sablo-limoneux (Formation de Lille) et la couverture, d'inégale épaisseur, est surtout formée de dépôts du Dernier Glaciaire (Sommé, 1980).

### III. — LES FORMATIONS FLUVIATILES.

En se référant au système stratigraphique pléistocène de Ladrière, Gosselet (1903) distingue deux groupes de couches : le diluvium, dû à l'action fluviale, qui se place à la base de l'assise inférieure, et les limons dont l'origine n'est pas encore alors déterminée. Le diluvium (ou dépôt caillouteux inférieur), associé à du sable, « est évidemment un dépôt fluvial dû à la rivière qui a creusé la vallée » et « se trouve soit dans le fond des vallées, soit sur leurs flancs, s'élevant en pentes régulières vers le plateau ou couvrant des terrasses étagées ». L'assise inférieure de Ladrière comprend en fait des formations fluviales dont l'âge est variable. Dès

ce début de siècle les systèmes de terrasses étagées sont définis pour les différentes vallées de la région gallo-belge (région comprise entre la Seine et le Rhin inférieur) et des essais de datation sont proposés (Briquet, 1907), en liaison avec le système de glaciations alpines de Penck et Brückner (Würm, Riss, etc) dont la notoriété commence à se répandre.

Cependant, outre ces formations en relation directe avec les vallées actuelles, Gosselet (1903) note l'existence de dépôts caillouteux (« diluvium des plateaux ») sur les terrasses élevées et sur les plateaux, notamment en bordure de l'Artois et en Flandre. Ce sont ces dépôts situés sur les hauteurs qui donneront lieu à un mémoire posthume (Gosselet, 1920) dans lequel l'auteur envisage d'y voir à titre « hypothétique » les témoins d'une nappe continue qui se serait déposée à l'embouchure des rivières qui descendaient de l'Artois et suggère la comparaison avec le diluvium du plateau de Lannemezan. S'appuyant sur cette hypothèse de Gosselet, Bonte (1955 b) propose une nouvelle interprétation de l'ensemble des formations fluviatiles de l'Artois et de sa bordure qu'il regroupe sous le terme de « Limon rouge à silex ». Celui-ci formerait une vaste nappe d'épandage due au ruissellement et à la solifluxion, élaborée tout au long du Tertiaire et du Quaternaire et ayant subi une fragmentation progressive sous l'action du réseau hydrographique et par glissement sur les pentes.

Cette théorie qui rejette l'évidence des systèmes de terrasses étagées a été appliquée systématiquement, dans les années soixante, sur les cartes géologiques à 1/80 000 et 1/50 000. Ainsi dans la 3<sup>e</sup> édition de la feuille de Saint-Omer à 1/80 000 (Waterlot, 1957) trois complexes de terrasses fluviatiles étagées sont cartographiés dans la vallée de l'Aa comme auparavant dans l'édition antérieure, mais dans la notice l'existence de terrasses est mise en doute au profit de l'interprétation du « limon rouge à silex descendu du plateau par glissement de talus et solifluxion ». Sur la carte de Saint-Omer à 1/50 000 (Desoignies et Thibaut, 1968), la subdivision en terrasses étagées (dites successives) est abandonnée et les formations sont cartographiées sous l'indice Rs (« Formations résiduelles à silex ») et rattachées au « limon rouge à silex d'origine continentale ». Seuls ont droit à l'appellation d'« alluvions anciennes » (Fy) les dépôts fluviatiles de la « basse terrasse » de Malhove qui affluent au niveau du fond de la vallée de l'Aa.

Sur beaucoup de cartes géologiques du Nord parues dans les années soixante et soixante dix les formations fluviatiles pléistocènes disparaissent également, interprétées selon la théorie du Limon rouge à silex et désignées par les expressions de « Formation résiduelle à silex » (Rs) (Waterlot, 1968 ; Desoignies, 1973) ou « Limons à silex » (Ls) (Delattre *et al.*, 1960 ; Delattre, 1967 ; Delattre, 1968 ; Bonte *et al.*, 1971). Des alluvions anciennes avec l'indice Fy sont cependant maintenues pour l'Escaut (Celet, 1968) et pour le bassin de la Canche (Destombes et Delattre, 1968 ; Delattre, 1969 ; Destombes, 1974 ; Delattre et Mériaux, 1977), région qui n'était pas visée par l'interprétation du « diluvium de l'Artois » de Bonte.

L'application de cette théorie est donc propre aux cartes géologiques, car les études contemporaines montraient par ailleurs, comme l'avait établi Briquet (1907), que les dépôts de terrasses fluviatiles sont de règle dans les vallées et à leur débouché dans le bas-pays (Bonte et De Heinzelin, 1966 ;

Boutry et Dollé, 1968 ; Sommé, 1969a, 1975 ; Tavernier et De Moor, 1975). Il semble que l'une des raisons qui ait motivé la critique de la notion de terrasses est le fait que justement au contact de ce bas-pays les dépôts fluviatiles se trouvent localisés sur des buttes ou des interfluvés. Or il s'agit là d'un dispositif de piémont en cônes étagés, corrélatifs du creusement des boutonnières élémentaires qui échancrent la retombée de l'Artois – particulièrement bien représenté avec le système de l'Aa – dont la signification tectonique s'impose, comme l'avait d'ailleurs suggéré Gosselet (1920). Le rôle de cette tectonique quaternaire a par ailleurs été montré à différentes échelles (Colbeaux *et al.*, 1977, 1978, 1980) et sa manifestation dans les formations meubles de la terrasse de Biache-Saint-Vaast, au demeurant bien datée (Saalien supérieur), a été décrite et mesurée en trois dimensions grâce aux conditions propices d'une fouille archéologique (Colbeaux *et al.*, 1981, 1988 in Tuffreau et Sommé, dir., 1988).

Sur les cartes géologiques régionales à 1/80 000 et à 1/50000 jusqu'en 1969 les dépôts fluviatiles des fonds de vallée (a2, puis Fz) figurent sous l'appellation « alluvions modernes », puis « alluvions récentes », termes qui sont un héritage du XIX<sup>e</sup> siècle. Mais le « terrain récent », qui était distingué du « terrain quaternaire ou diluvien » (Gosselet, 1890), est décrit ensuite sous l'appellation « Holocène » (Gosselet, 1903). Il faudra attendre le dernier quart du XX<sup>e</sup> siècle pour que cette approche stratigraphique pénètre la carte géologique (Destombes, 1974 ; Leplat *et al.*, 1984, 1989) ou figure dans la notice (Bonte *et al.*, 1982, 1985). Elle vient expliciter le contenu des alluvions « récentes », terme qui, sans autre précision, désigne en fait toute l'épaisseur du remblaiement de fond de vallée, lequel incorpore des dépôts pléistocènes surmontés par quelques mètres de sédiments proprement holocènes.

L'importance du colmatage quaternaire dans les plaines du Bas-Pays, en particulier dans la région lilloise (Bonte, 1955 a), a été confirmée dans la plaine de la Lys où les épaisseurs dépassent la trentaine de mètres (Colbeaux *et al.*, 1979), en même temps qu'a été démontrée l'ancienneté de l'approfondissement maximum – terme préférable à « creusement » car il n'engage pas la cause érosive ou tectonique. En effet le sondage d'Erquinghem-sur-la-Lys, réalisé lors du levé de la feuille d'Hazebrouck, a montré la présence de l'Eemien typique à 13 m de profondeur (0 à -5 m NGF) sous un faciès limono-tourbeux analogue à celui de l'Holocène (Sommé *et al.*, 1996), ce qui situe au Pléistocène moyen récent l'approfondissement des talwegs fossiles. De même, à Watten, au débouché de la vallée de l'Aa dans la plaine maritime, l'existence d'un tuf fluvio-lacustre du Début Weichselien, formant un vaste dépôt à 21 m de profondeur (-18 à -22 m NGF) (Sommé *et al.*, 1992, 1994), implique aussi une évolution morphologique de la vallée, avec son système de terrasses étagées, déjà réalisée au Pléistocène moyen

Ainsi le complexe des basses terrasses se trouve être d'un âge plus ancien qu'on ne l'estimait auparavant. En effet, dans la vallée de l'Aa, la terrasse de La Garenne-Neuffossé à Arques – où a été trouvé un squelette presque entier de *Mammuthus primigenius* (Pontier 1914) conservé au musée de Boulogne-sur-mer – dont le bed-rock domine d'une douzaine de mètres la surface du colmatage de fond, épais lui-même d'environ 10 m, a été considérée comme eemienne (Bonte et De Heinzelin, 1966 ; Tavernier et De Moor, 1975).

Or en fait cette terrasse est d'un âge nettement antérieur puisque l'approfondissement maximum de la vallée était déjà réalisé au Saalien comme le montre le sondage de Watten. Il en est de même dans la vallée de la Scarpe avec la basse terrasse de Biache-Saint-Vaast dont le bed-rock est à l'altitude de la surface du colmatage du fond de la vallée, épais de 13 m à cet endroit, et dont les formations fluviatiles, rapportées à l'avant-dernier interglaciaire, sont surmontées par les loess du Saalien supérieur et du Weichselien (Tuffreau et Sommé, dir., 1988).

#### IV. — LES FORMATIONS MARINES.

Pour Gosselet (1903), les dépôts marins quaternaires du Nord de la France sont représentés, d'une part par la « plage suspendue » de Sangatte et par les sables pissarts, sous-jacents aux tourbières de la plaine maritime, qu'il attribue au Pléistocène, et d'autre part par les dépôts qu'il considère comme holocènes : sables littoraux, argiles des laisses de mer, galets, dunes, auxquels s'ajoutent les sables et argiles qui recouvrent la tourbe de la plaine maritime à la suite de l'invasion marine du IV<sup>e</sup> siècle. Cette stratigraphie est précisée par les études de Briquet de 1905 à 1931 et par celles de Dubois de 1921 à 1932 qui vont servir de bases aux cartes géologiques littorales.

On doit à Dubois (1924) une nouvelle définition du Flandrien, terme d'étage créé en Belgique à la fin du siècle précédent dont la signification avait varié (Sommé, 1998). Appliquant les idées de Depéret et considérant que le nom est « tout à fait qualifié pour désigner l'ensemble des couches formées lors du dernier cycle sédimentaire reconnu dans les Flandres », il fait du Flandrien le dernier cycle sédimentaire transgressif, après le Monastirien. Selon Dubois, l'étage flandrien correspond à la fin du Pléistocène et à l'Holocène ; c'est dans cette acception que réside l'emploi de l'expression « transgression flandrienne ». Les dépôts flandriens sont divisés en trois assises : supérieure ou Assise de Dunkerque, moyenne ou Assise de Calais, inférieure ou Assise d'Ostende, les deux premières correspondant à l'Holocène, les dépôts de Dunkerque restant historiquement datés du III<sup>e</sup> au XIII<sup>e</sup> siècle. Par contre, Briquet (1930) restreint le sens de Flandrien aux sédiments d'une première transgression postglaciaire, le terme de « Dunkerquien » étant réservé aux dépôts de la seconde qui intervient à la fin de la domination romaine en Occident.

Ces nouvelles définitions et les notions de transgressions, soit au sens de Dubois ou à celui de Briquet, vont pendant plusieurs décennies influencer les conceptions du Flandrien, terme dont l'usage devient international et dont la signification stratigraphique se trouve liée à celui d'« Holocène ». L'Assise d'Ostende ayant été finalement reconnue d'âge interglaciaire eemien (Tavernier, 1954), le Flandrien comprend désormais les unités lithostratigraphiques de Calais et de Dunkerque déposées à l'Holocène. La sédimentation marine transgressive atteint la plaine maritime, en France comme en Belgique occidentale, au Boréal vers 8500 BP. L'expression de « transgression flandrienne », qui désignait la remontée du niveau de la mer au cours du Weichselien supérieur et de l'Holocène, ne peut plus être utilisée, puisque l'étage flandrien est par définition limité à la série et à l'époque holocène (Hedberg, ed., 1976), ce qui

exclut également la distinction d'un Dunkerquien séparé du Flandrien.

Quant au contenu de la Formation des Flandres, en France comme en Belgique, contrairement aux définitions de Dubois et de Briquet qui étaient d'ailleurs conformes aux vues de Gosselet, les premiers dépôts de Dunkerque, transgressifs sur la Tourbe de surface, appartiennent à la phase Dunkerque I, dans les siècles qui précèdent l'époque romaine. C'est lors de la phase Dunkerque II (IV<sup>e</sup>-VII<sup>e</sup> siècles après J.C.) qu'en France l'extension marine flandrienne est maximum, sauf dans le marais du Sud-Calais, (Paeppe, 1960 ; Sommé, 1969b, 1975 ; Bonte *et al.*, 1971 ; Leplat et Sommé, 1989 ; Leplat *et al.*, 1989 ; Houthuys *et al.*, 1993). A sa partie inférieure la séquence holocène débute souvent par une Tourbe de base qui a été datée du début du Boréal, vers 8300 BP à - 18 m NGF à Watten (Sommé *et al.*, 1992, 1994 ; Sommé, 1998) et qui est recouverte par les premiers dépôts transgressifs holocènes. Pour Dubois, comme pour les contemporains de Gosselet, les formations sous-jacentes, encore parfois épaisses de plus de 10 m, n'appartenaient qu'à « un seul grand cycle de sédimentation, une seule grande période de remblaiement » (Dubois, 1924), mais Briquet (1940) interprétera la discontinuité entre l'assise de Calais et celle d'Ostende par l'existence de « deux cycles séparés par un abaissement du niveau de la mer avec reprise de l'érosion ». Les dépôts de l'Assise de Calais reposent en effet sur des formations continentales weichseliennes et (ou) des formations marines plus anciennes. Ces dernières sont représentées en Belgique par la Formation (ancienne Assise) d'Ostende d'âge eemien. En France il doit en être de même avec les dépôts de Loon (sables coquilliers graveleux, épais de 5 à 10 m et culminant à -20 m NGF) qui ont été reconnus lors de la construction du Port rapide de Dunkerque et qui s'étendent largement dans la partie septentrionale de la plaine maritime. En effet cette formation, sous-jacente à un sol de marais attribuable au Boréal et à un limon brunâtre, possède une faune malacologique qui comporte des espèces disparues avant l'Holocène (Leplat *et al.*, 1989).

Les formations marines pléistocènes reconnues au début du XX<sup>e</sup> siècle sont représentées par la « plage suspendue » de la falaise de Sangatte, les cordons littoraux anciens du Calaisais (Petite Rouge Cambre, Coulogne, Attaques) qui la prolongent et les gisements littoraux boulonnais, en particulier dans la région de Wissant (Gosselet, 1903 ; Briquet, 1906). Adeptes des idées de Depéret, Dubois (1924) attribue les formations marines de la falaise fossile de Sangatte à l'étage Monastirien pour trois raisons principales : ligne de rivage un peu inférieure à + 20 m ; faune marine sensiblement identique à la faune actuelle ; présence dans les dépôts continentaux qui recouvrent les couches marines d'« *Elephas primigenius* » type évolué. Il écarte, sans vraiment le discuter, le fait stratigraphique — critère essentiel — de la présence de limons anciens et récents dans la couverture, mis en évidence par Briquet (1921, 1930) qui concluait justement à un âge plus ancien. Seule l'interprétation de Dubois a été appliquée sur la carte géologique à 1/80 000 Calais-Dunkerque (2<sup>e</sup> édit., 1939). L'attribution de la plage fossile de Sangatte, « niveau de 5 mètres » (d'après la dénivellation entre le système littoral fossile et son analogue actuel), au littoral du dernier interglaciaire (Monastirien, puis Normannien, Riss-Würm, Eemien), en fonction de la théorie des niveaux marins, a été la conception dominante jusqu'aux années soixante.

L'interprétation, fondée principalement sur la stratigraphie des épaisses formations de couverture, qui place le littoral fossile de Sangatte dans un interglaciaire du Pléistocène moyen récent, pressentie par Briquet, démontrée en particulier par Bourdier (1969), s'est définitivement imposée depuis le dernier quart du siècle (Sommé, 1975, 1979 ; Balescu et Haesaerts, 1984 ; Antoine, 1989 ; Sommé *et al.*, 1999). La 1<sup>e</sup> édition de la feuille géologique de Marquise à 1/50 000 (Bonte *et al.*, 1971) présentait les deux hypothèses (Eemien ou Interglaciaire précédent); la 2<sup>e</sup> édition (Mansy *et al.*, 2002) précise que la discussion se situe désormais entre les deux interglaciaires précédant l'Eemien et propose la corrélation avec la Formation d'Herzelee (Holsteinien).

En effet un nouveau gisement de Pléistocène marin a été découvert dans les années soixante-dix (Sommé, 1975) qui n'avait jamais été mentionné en territoire français tant sur la carte géologique à 1/80 000 (Waterlot, 1957 : Saint-Omer, 3<sup>e</sup> édition qui modifie peu celle de 1913) que sur la feuille à 1/50 000 (Sangnier, 1969 : Steenvoorde). Il s'agit de la formation visible alors à la briqueterie d'Herzelee, dont l'étude menée par une équipe franco-belge a permis de la proposer comme nouveau stratotype du Pléistocène moyen marin de la mer du Nord (Sommé *et al.*, 1978). L'unité marine supérieure, sablo-limoneuse très coquillière, qui correspond aux Sables d'Izenberge, antérieurement reconnus en Flandre belge, est attribuée à l'Holsteinien, interglaciaire daté de 300-350 ka (Sommé *et al.*, 1999). L'unité moyenne et surtout l'unité inférieure sableuse, dont l'extension régionale en surface et en altitude est plus importante, sont interprétées comme plus anciennes et dateraient du Cromérien (Vanhoorne and Denys, 1987).

L'événement paléogéographique majeur de cette région du bassin de la mer du Nord méridionale est donc la

formation au Pléistocène moyen d'une plaine maritime dont la configuration géographique annonce, en débordant ses limites, celle de l'Holocène et implique l'ouverture du Pas de Calais. Les gisements littoraux du Boulonnais (Formation du Fart avec *Mammuthus meridionalis* et *Hippopotamus major* à Wissant, Formation de la Slack à la Pointe-aux-Oies près de Wimereux) viennent à l'appui de cette hypothèse qui placerait la formation du Pas-de-Calais au Pléistocène inférieur, alors qu'antérieurement le domaine marin aurait été encore cantonné d'une part au large de la Normandie, d'autre part au niveau des Pays-Bas (Colbeaux *et al.*, 1980 ; Lefèvre et Sommé, 2001; Sommé, 2001). L'hypothèse d'une ouverture du Pas de Calais au Quaternaire, qui était déjà admise à l'époque de Gosselet (1899), reste cependant encore discutée et celle d'une série d'ouvertures et de fermetures du détroit depuis le Néogène est envisagée (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1998).

Après le foisonnement d'observations et d'idées qui a marqué l'époque de Gosselet, les perspectives prometteuses pour la connaissance du Quaternaire régional, en particulier celles de Ladrière et de Briquet, ont été abandonnées au profit de théories illusoire qui ont amené à ne pas tenir compte des évidences. Le concept de « formations superficielles », bien qu'étranger à la stratigraphie, s'est aussi imposé dans la cartographie géologique. Or cette notion, apparemment applicable aux régions de dénudation du substrat, s'avère inadaptée à une région de couverture comme la France septentrionale. C'est en effet à partir des données stratigraphiques de la couverture limoneuse, comme le présentait Ladrière, que les formations quaternaires doivent être interprétées, et traitées avec les mêmes principes cartographiques que ceux qui régissent les formations du substrat, à savoir en termes de lithostratigraphie et de chronostratigraphie (Lefèvre et Sommé, 2001).

## BIBLIOGRAPHIE

- ANTOINE, P. (1989). — Stratigraphie des formations pléistocènes de Sangatte (Pas-de-Calais) d'après les premiers travaux du Tunnel sous la Manche, *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, 1, p. 5-17.
- ANTOINE P., MUNAUT A.V. & SOMME J. (1994). — Réponse des environnements aux climats du Début Glaciaire weichselien : données de la France du Nord-Ouest, *Quaternaire*, 5 (3-4), p. 151-156.
- BALESCU S. & HAESAERTS P. (1984). — The Sangatte raised beach and the age of the opening of the Strait of Dover, *Geologie en Mijnbouw*, 63, p. 355-362.
- BONTE A. (1955 a). — Vallées quaternaires remblayées dans les environs de Lille, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 75, p. 111-122.
- BONTE A. (1955 b). — Sur la signification du diluvium de l'Artois, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 75, p. 160-173.
- BONTE A. & DE HEINZELIN J. (1966). — Session extraordinaire de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie et de la Société géologique de Belgique dans le Boulonnais du 8 au 11 septembre 1966 : Compte-rendu, *Bulletin de la Société belge de Géologie*, 75, p. 245-305.
- BONTE A., DESTOMBES J.P., THIBAUT P.M., SOMMÉ J. & RAMON S. (1971). — *Carte géologique à 1/50 000 : Guines XXII-3. Notice explicative*, B.R.G.M., Orléans.
- BONTE A., LEPLAT J. & SOMMÉ J. (1982). — *Carte géologique à 1/50 000, Desvres, Boulonnais est. Notice explicative*. B.R.G.M., Orléans.
- BONTE, A., COLBEAUX, J.P., LEPLAT, J. & SOMMÉ, J., (1985). — *Carte géologique à 1/50 000, Boulogne-sur-mer, Boulonnais sud. Notice explicative*. B.R.G.M., Orléans.
- BOURDIER F. (1969). — Etude comparée des dépôts quaternaires des bassins de la Seine et de la Somme, *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, 21, p. 169-231.
- BOUTRY J. & DOLLE P. (1968). — Le Quaternaire de la vallée de l'Aa, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 88, p. 19-23..
- BRIQUET A. (1906). — Notes sur quelques formations quaternaires du littoral du Pas-de-Calais, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 35, p.211-236.
- BRIQUET A. (1907). — Note préliminaire sur quelques points de l'Histoire plio-pléistocène de la région gallo-belge (Essai de classification chronologique des niveaux d'alluvions, des dépôts de loess et des gisements paléontologiques et archéologiques), *Annales de la Société Géologique du Nord*, 36, p. 2-44.



- BRIQUET A. (1921). — Sur l'origine du Pas-de-Calais, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 46, p. 141-157.
- BRIQUET A. (1930). — *Le littoral du Nord de la France et son évolution morphologique*, Orléans, 439 p.
- BRIQUET A. (1940-1945). — Basses terrasses et plaines maritimes littorales, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 65, p. 89-96.
- CELET P. (1968). — *Carte géologique à 1/50 000 : Cambrai XXV-7*, B.R.G.M., Orléans.
- COLBEAUX J.P., BEUGNIES A., DUPUIS C., ROBASZYNSKI F. & SOMMÉ J. (1977). — Tectonique de blocs dans le sud de la Belgique et le Nord de la France, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 97, p. 191-222.
- COLBEAUX J.P., LEPLAT J., PAEPE R. & SOMMÉ J. (1978). — Tectonique récente dans le Nord de la France et le Sud de la Belgique : exemple de la Plaine de la Lys (feuille Hazebrouck à 1/50000), *Annales de la Société Géologique du Nord*, 98, p. 179-188.
- COLBEAUX J.P., DUPUIS C., ROBASZYNSKI F., AUFFRET J.P., HAESAERTS P. & SOMMÉ J. (1980). — Le détroit du Pas de Calais : un élément dans la tectonique de blocs de l'Europe nord-occidentale, *Bulletin de l'Association des Géologues du Bassin de Paris*, 17, p. 41-54.
- COLBEAUX J.P., SOMMÉ J. & TUFFREAU A. (1981). — Tectonique quaternaire dans le Nord de la France : l'apport du gisement paléolithique de Biache-Saint-Vaast, *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, 3-4, p. 181-192.
- COMMONT V. (1912). — Note sur le Quaternaire du Nord de la France, de la vallée du Rhin et de la Belgique, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 41, p. 12-59.
- DELATTRE C., SCRIBAN R. & SEGOND R. (1960). — *Carte géologique à 1/50 000 : Béthune XXIV-5*, B.R.G.M., Orléans.
- DELATTRE C. (1967). — *Carte géologique à 1/50 000 : Lillers XXIII-5*, B.R.G.M., Orléans.
- DELATTRE C. (1968). — *Carte géologique à 1/50 000 : Arras XXIV-6*, B.R.G.M., Orléans.
- DELATTRE C. (1969). — *Carte géologique à 1/50 000 : Saint-Pol XXIII-6*, B.R.G.M., Orléans.
- DELATTRE C. & MERIAUX E. (1967). — *Carte géologique à 1/50 000 : Le Cateau XXVI-7*, B.R.G.M., Orléans.
- DELATTRE C. & MERIAUX E. (1977). — *Carte géologique à 1/50 000 : Bapaume XXIV-7*, B.R.G.M., Orléans.
- DESOIGNIES J. (1973). — *Carte géologique à 1/50 000 : Saint-Amand Crespin-Mons XXVI-5*, Notice explicative, B.R.G.M., Orléans.
- DESOIGNIES J. & SANGNIER P. (1968). — *Carte géologique à 1/50 000 : Carvin XXV-5*, B.R.G.M., Orléans.
- DESOIGNIES J. & THIBAUT P.M. (1968). — *Carte géologique à 1/50 000 : Saint-Omer XXIII-4*, B.R.G.M., Orléans.
- DESTOMBES J.P. (1974). — *Carte géologique à 1/50 000, Montreuil XXI-5 Baie de la Canche*, B.R.G.M., Orléans.
- DESTOMBES J.P. & DELATTRE C. (1968). — *Carte géologique à 1/50 000 : Fruges XXII-5*, B.R.G.M., Orléans.
- DOUAY F. (1993). — *La Flandre intérieure (Nord de la France). Caractérisation et cartographie des sols. Contribution à la connaissance des formations superficielles*. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 320 p.
- DUBOIS G. (1924). — *Recherches sur les terrains quaternaires du Nord de la France*, Mémoires de la Société Géologique du Nord, 8, Lille, 356 p.
- FOURRIER H. (1989). — *La Plaine de la Scarpe et ses bordures (Nord de la France). Analyse séquentielle des formations superficielles. Aspects sur les sols*. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille, 304 p.
- GOSELET J. (1890). — *Géologie élémentaire du département du Nord*, Lille, 40 p.
- GOSELET J. (1899). — De l'ouverture du Pas de Calais au Congrès de Boulogne-sur-mer, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 28, p. 289-297.
- GOSELET J. (1903). — *Esquisse géologique du Nord de la France et des contrées voisines*, 4<sup>e</sup> fascicule : *Terrains quaternaires*, Lille, p.343-421.
- GOSELET J. (1920). — Le diluvium des hauteurs dans la Flandre et sur les parties voisines de l'Artois (mémoire posthume), *Annales de la Société Géologique du Nord*, 55, p. 35-54.
- HEDBERG H. D. (ed.), (1976). — *International Stratigraphic Guide*, New York, 200 p.
- JAMAGNE M., LAUTRIDOU J.P. & SOMMÉ J. (1981). — Préliminaire à une synthèse sur les variations sédimentologiques des loess de la France du Nord-Ouest dans leur cadre stratigraphique et paléogéographique, *Bulletin de la Société Géologique de France*, (7), 23, p. 143-147.
- HOUTHUYS R., DE MOOR G. & SOMMÉ J. (1993). — The shaping of the French-Belgian North Sea Coast throughout Recent Geology and History, in Hillen, R. & Verhagen, H.J. (ed.), *Coastlines of the southern North Sea*, New York, p. 27-40.
- LADRIÈRE J. (1879). — Le terrain quaternaire du Nord, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 7, p. 11-32.
- LADRIÈRE J. (1890). — Etude stratigraphique du terrain quaternaire du Nord de la France, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 18, p. 93-149 et 205-234.
- LADRIÈRE J. (1900). — Les limons du Nord de la France, in Gosselet, J. & Ladrière, J. (dir.), *Livret-guide Excursion Picardie*, 16, 8<sup>e</sup> Congrès Géologique International, Paris, p. 1-10.
- LEFÈVRE D. & SOMMÉ J. (2001). — Données nouvelles sur les formations quaternaires du Bas-Bouloonnais et leur représentation cartographique (Marquise, 1/50000, éd. 2000), *Annales de la Société Géologique du Nord*, 9, p. 39-58.
- LEPLAT J., COLBEAUX J.P., SOMMÉ J. & PAEPE R. (1984). — *Carte géologique à 1/50 000, Hazebrouck*, B.R.G.M., Orléans.
- LEPLAT J. & SOMMÉ J. (1989). — *Carte géologique à 1/50 000 : Calais*, B.R.G.M., Orléans.
- LEPLAT J., SOMMÉ J., PAEPE R. & BAETEMAN C. (1989). — *Carte géologique à 1/50 000 : Dunkerque-Hondschoote*, B.R.G.M., Orléans.
- MANSY J.L., AUFFRET J.P., GUENNOG P., LAMARCHE J., VIDIER J.P., ROBASZYNSKI F., AMEDRO F., LEFÈVRE D., SOMMÉ J., MAHIEUX G., AUGRIS C. & CROSBY A. (2002). — *Carte géologique à 1/50 000 : Marquise*, 2<sup>e</sup> édition, B.R.G.M., Orléans.
- PAEPE R. (1960). — La plaine maritime entre Dunkerque et la frontière belge, *Bulletin de la Société belge d'Etudes géographiques*, 29, p. 47-66.

- PAEPE R. (1964). — Les dépôts quaternaires de la plaine de la Lys, *Bulletin de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, 73, p. 327-365.
- PAEPE R. & SOMMÉ J. (1970). — Les loess et la stratigraphie du Pléistocène récent dans le Nord de la France et en Belgique, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 90, p. 191-201.
- PONTIER G. (1914). — Etude sur l'*Elephas primigenius* de la vallée de l'Aa, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 43, p. 30-89.
- RUTOT A. & VAN DEN BROEK E. (1878). — Quelques mots sur le Quaternaire, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 6, p. 215-225.
- SANGNIER P. (1969). — *Carte géologique à 1/50 000, Steenvoorde XXIV-3*, B.R.G.M., Orléans.
- SOMMÉ J. (1969a). — Introduction à la géomorphologie du Nord de la France, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 89, p. 103-110.
- SOMMÉ J. (1969b). — La plaine maritime, *Annales de la Société Géologique du Nord*, 89, p. 117-126.
- SOMMÉ J. (1975). — *Les plaines du Nord de la France et leur bordure. Etude géomorphologique*. Thèse Doctorat d'Etat, Université de Paris I, éd. 1977, Lille, 2 vol., 810 p. et 184 fig.
- SOMMÉ J. (1978). — Formations suoperficielles, Quaternaire et géomorphologie. Les données de la région du Nord de la France, *Hommes et Terres du Nord*, 2, p. 5-18.
- SOMMÉ J. (1979). — Quaternary coastlines in northern France, in Oele, E., Schüttenhelm, R.T.E., Wiggers, A. J. (ed.), *The Quaternary History of the North Sea*, Acta Universitatis Upsaliensis, Symposia Universitatis Upsaliensis Annum Quingentesimum Celebrantis, 2, Uppsala, p. 147-158.
- SOMMÉ J. (1980). — *Carte à 1/200 000 : Nord de la France. Géomorphologie, Formations superficielles, Quaternaire*. C.N.R.S., Paris.
- SOMMÉ J. (1998). — A propos du terme stratigraphique « Flandrien » et de son usage, *Cahiers de Géographie physique*, Université des Sciences et Technologies de Lille, 12, p. 20-25.
- SOMMÉ J. (2001). — L'origine du Pas de Calais : le jeu des hypothèses, in Curveiller, S., Clauzel, D., Leduc, C. (dir.), *Le détroit : zone de rencontres ou zone de conflits*. Bulletin historique et artistique du Calaisis, 173, p. 7-24.
- SOMMÉ J., ANTOINE, P., CUNAT-BOGE, N., LEFÈVRE, D. & MUNAUT, A.V., (1999). — Le Pléistocène moyen marin de la mer du Nord en France : Falaise de Sangatte et Formation d'Herzele, *Quaternaire*, 10 (2-3), p. 151-160.
- SOMMÉ J., MUNAUT A.V., EMONTSPOHL A.F., LIMONDIN N., LEFÈVRE D., CUNAT N., MOUTHON J. & GILOT E. (1992). — Weichselien ancien et Holocène marin à Watten (Plaine maritime, Nord, France), *Quaternaire*, 3 (2), p. 87-89.
- SOMMÉ J., MUNAUT A.V., EMONTSPOHL A.F., LIMONDIN N., LEFÈVRE D., CUNAT N., MOUTHON J. & GILOT E. (1994). — The Watten boring - an Early Weichselian and Holocene climatic and palaeoecological record from the French North Sea coastal plain, *Boreas*, 23, p. 231-243.
- SOMMÉ J., MUNAUT A.V., PUISSEGUR J.J., CUNAT-BOGE N., HEYVAERT F. & LEPLAT J. (1996). — L'Eemien sous les formations weichseliennes et holocènes du sondage d'Erquinghem (Nord de la France) dans la Plaine de la Lys, *Quaternaire*, 7 (1), p. 15-28.
- SOMMÉ J., PAEPE R., BAETEMAN C., BEYENS L., CUNAT N., GEERAERTS R., HARDY A.F., HUS J., JUVIGNE E., MATHIEU L., THOREZ J. & VANHOORNE R. (1978). — La Formation d'Herzele : un nouveau stratotype du Pléistocène moyen marin de la mer du Nord, *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, 1-3, p. 81-149.
- SOMMÉ J., PAEPE R. & LAUTRIDOU J.P. (1980). — Principes, méthodes et système de la stratigraphie du Quaternaire dans le Nord-Ouest de la France et en Belgique, in : *Problèmes de stratigraphie quaternaire en France et dans les pays limitrophes*, Suppl. Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire, nouvelle série, 1, p. 148-162.
- SOMMÉ J. & TUFFREAU A., (1978). — Historique des recherches sur le Quaternaire de la région du Nord de la France, *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, 1-3, p. 5-13.
- TAVERNIER R. (1954). — Le Quaternaire, in *Prodrome d'une description géologique de la Belgique*, Liège, p. 555-589.
- TAVERNIER R. & DE MOOR G. (1974). — L'évolution du bassin de l'Escaut, in Macar, P. (dir.), *L'évolution quaternaire des bassins fluviaux de la mer du Nord méridionale*, Centenaire de la Société géologique de Belgique, Liège, p. 159-231.
- TUFFREAU A. & SOMME J. (dir.), (1988). — *Le gisement paléolithique moyen de Biache-Saint-Vaast (Pas-de-Calais). Vol. I. Stratigraphie, environnement. Etudes archéologiques (1<sup>ère</sup> partie)*, Mémoires de la Société Préhistorique Française, 21, 338 p.
- VANHOORNE R. & DENYS L. (1987). — Further paleobotanical data on the Herzele Formation (Northern France), *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, 1, p. 7-18.
- VAN VLET-LANOÉ B., MANSY J.L., MARGEREL J.P., VIDIER J.P., LAMARCHE J. & EVERAERTS M., (1998). — Le Pas de Calais, un détroit cénozoïque à ouverture multiples, *Compte-Rendu Académie des Sciences*, Paris, 326, p. 729-736.
- WATERLOT B. (1971). — *Carte géologique à 1/50 000 : Le Quesnoy XXVII-6*, B.R.G.M., Orléans.
- WATERLOT G. (1957). — *Carte géologique à 1/80 000 : Saint-Omer*, 3<sup>e</sup> édition.
- WATERLOT G. (1968). — *Carte géologique à 1/50 000 : Cassel XXIII-3*, B.R.G.M., Orléans.

## CHANGEMENTS CLIMATIQUES ACTUELS : EVOLUTION NORMALE OU PERTURBATION ANTHROPIQUE ?

### Present-day climatic changes : Natural trend or anthropogenic perturbation

par Brigitte VAN VLIET-LANOË (\*)

*Résumé.* — Les modifications climatiques actuelles et leurs implications pour le milieu terrestre peuvent intervenir sur la dynamique des glaciers, l'érosion des sols ou le niveau marin et avoir des conséquences importantes à long terme. Dans l'histoire de l'homme, beaucoup de crises économique-culturelles sont la conséquence directe ou indirecte de modifications climatiques. L'érosion des sols et la réduction des réserves en eau terrestre, sont des problèmes majeurs pour les communautés du monde entier. Or ces phénomènes s'accroissent à l'heure actuelle. Le réchauffement actuel du climat est évident. Mais si les médias clament à tout crin que l'effet de serre menace notre planète, rien n'est moins sûr à notre échelle de temps et surtout à plus long terme. La teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère augmente certes, mais elle n'a jamais été aussi basse depuis le début de l'histoire de la Terre. La production par l'homme des gaz à effets de serre est faible par rapport à celui des volcans ou les hydrates gazeux des bassins sédimentaires et l'apport d'énergie dans notre écosystème terrestre est en définitive dépendant du soleil. Le réchauffement actuel est surtout lié à l'activité du soleil, avec des éruptions et des taches solaires de plus en plus fréquentes depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle. Et si notre action, en augmentant le contraste thermique sur l'Atlantique et les tempêtes favorisait en fait l'englaciation naturelle de l'Hémisphère nord grâce à l'effet de serre ?

*Abstract.* — *Present climate modifications and their implications at earth surface interfere for a long time span with important consequences for the dynamic of glaciers, for soil erosion or the mean sea level. During mankind history, many socio-economic crisis are both the direct and indirect consequences of climate shifts. Soil erosion and the lowering of water resources are two major problems for world communities. Today, these processes are enhanced. Global warming is evident. But if media are claiming guiltiness of the green house gases, nothing is fully demonstrated at our time span or at a longer one. The carbon dioxide content of the atmosphere is increasing, but from one of the lowest concentration since the start of the earth story. The production of greenhouse gases by mankind remains at a low level compared other sources such as volcanoes or the gas hydrates from sedimentary basins. The main source of energy input in the earth ecosystem is definitively the sun. The present-day warming seems mostly to be linked to the increase of solar activity, with more frequent flares and sun spots since the early XX century. We may wonder if our activity, by enhancing the thermal gradient on the Atlantic ocean and the storminess, should not by a stronger green house effect enhance the natural cooling trend of the Northern Hemisphere.*

#### AVANT-PROPOS

Le présent article est une vulgarisation non-conventionnelle à partir des données disponibles dans la littérature et sur les sites web, dont celui du *Earth Observatory*. Il présente une relecture objective des faits récents à partir de données géologiques plus anciennes, à la différence de ce que les médias et les politiques nous imposent, comme dans d'autres pays du G7. Pour cette raison, les références bibliographiques sont limitées dans ce texte afin d'en faciliter la lecture pour des non-spécialistes. Elles sont reprises en fin d'article.

#### I. — INTRODUCTION

Aujourd'hui, du point de vue de la géologie, nous sommes en fin de période chaude, peut-être déjà en début de période

glaciaire et pourtant beaucoup s'attendent à un réchauffement brutal. L'effet de serre fait la une des journaux alors que, toujours à l'échelle géologique, la pression partielle de CO<sub>2</sub> n'a jamais été aussi basse. Normalement sans l'activité de l'homme nous devons très rapidement entrer en glaciation, étant donné que nous sommes actuellement dans une ère glaciaire. Dans l'esprit de beaucoup de gens, l'ère glaciaire dans laquelle nous vivons, le Cénozoïque s'est limitée au « Quaternaire » avec quatre grandes glaciations, alors que ce dernier ne représente en réalité qu'un petit épisode de cette ère. Cette ère glaciaire est loin d'être unique au cours de l'histoire de notre planète. Une glaciation est un monde instable, régi par de nombreuses interactions entre océan-terre, relief-vent, couverture végétale, glaciers et niveau marin. En fait, l'évolution est complexe et nous commençons seulement à comprendre comment toutes ces interactions simples interagissent entre elles. Le stockage de glace dans les calottes a pour effet principal d'abaisser le niveau marin ou

(\*) UMR 8110 CNRS –PBDS, Sciences de la Terre, Université Sciences et Techniques de Lille. Brigitte.Van-Vliet-Lanoe@univ-lille1.fr

niveau eustatique : les masses continentales affleurent donc sur une plus grande superficie, mais la surface océanique qui permet l'évaporation diminue : le climat s'aridifie et l'albédo des surfaces émergées augmente, à fortiori s'il y a de la neige. La formation de banquise en surface des océans a pour effet, de concentrer une saumure lourde et froide à sa base : cette eau plonge et s'écoule sous forme de courant marin sur les fonds océaniques pour former un pendentif froid, notamment au Gulf Stream. La circulation thermohaline qui en découle constitue au niveau de la masse océanique un immense système convectif d'échange thermique interzonal et interhémisphérique. Nous pouvons, pour cette raison, assimiler le système Terre-Soleil à une habitation avec un chauffage central, dont la chaudière serait notre étoile, le Soleil. Les radiateurs-accumulateurs sont constitués par l'océan. Cependant, la maison ne sera pas bien chauffée s'il n'y a pas d'accélérateur au chauffage : c'est la circulation thermohaline des océans ou « *conveyor belt* » (fig. 1). Cette dernière apporte la douceur du Gulf Stream, le long de nos côtes. Enfin la tectonique, notamment la formation des chaînes alpines, accentue l'érosion par création de relief, permet l'interception des précipitations sous forme de neige en altitude et également de déformer les jets streams et le cheminement des perturbations cycloniques. Elle interfère donc avec plusieurs facteurs qui régissent notre climat.

## II — LE CONTEXTE GEOLOGIQUE GENERAL

L'englaciation cénozoïque débute autour du pôle Sud, après un épisode important d'activité tectonique la formation des montagnes alpines et, d'élargissement majeur du fond des océans, surtout Atlantique par rifting à partir du Crétacé moyen. Ce phénomène fait suite à un effet de serre attesté par un niveau marin à +250m au-dessus de l'actuel au Crétacé supérieur et à une bioproduktivité très importante (craies, boues organiques) contrecarrant progressivement l'effet de serre. L'épisode de l'impact météorique du Yucatan est le nucléus qui va faire cristalliser notre ère glaciaire dans un contexte qui se refroidit déjà. Au Cénozoïque (fig. 2), on assiste à la poursuite du rifting et de l'orogénèse alpine. A l'Eocène, les forêts de feuillus existaient au Spitzberg et dans le Nord du Canada. A partir de 38 Ma d'années, l'Antarctique est isolé en position polaire et son englaciation s'aggrave. A cette époque également, la propagation du rift atlantique au nord de l'Islande permet une ouverture progressive de l'Océan Arctique sur l'Océan Atlantique : le refroidissement de l'hémisphère Nord s'amorce avec également l'apparition de la circulation thermohaline (fig. 1). Mais en plus, grâce au stockage d'eau dans des calottes et à l'expansion océanique, on assiste aussi à un abaissement par palier du niveau marin depuis la fin de l'Oligocène, il y a 35 millions d'années : 150m à 0 m aujourd'hui. Ceci veut dire que nous assistons au Cénozoïque à une aridification et un refroidissement naturel croissant de la terre, qui perdure encore. A une période glaciaire correspond une extension des déserts aux basses latitudes et une réduction de la forêt équatoriale. A une période interglaciaire, correspond un maximum de précipitations et une extension maximale de la couverture végétale (biostasie). La mousson, un phénomène caractéristique des climats tropicaux depuis 2,6 Ma, remonte alors vers le Nord, arrosant le centre du continent asiatique, aujourd'hui aride. De même, la biodiversité qui s'était accrue après la disparition des dinosaures, avec l'essor des mammifères, a recommencé à décroître avec l'apparition

des premières glaciations dans l'hémisphère nord, il y a quelques 20 millions d'années. Depuis environ 3 Ma nous sommes entrés dans un système d'alternances glaciaire-interglaciaire de plus en plus contrastées avec des glaciations de plus en plus importantes : le yoyo du niveau marin s'accroît.

## Situation actuelle

Par rapport aux interglaciaires précédents, nous sommes à la fin d'un interglaciaire banal, nettement moins chaud que les interglaciaires à 130 et 340 ka, les stades isotopiques océaniques 9 ou 5e. Lorsqu'on regarde l'évolution du climat au cours des derniers dix mille ans qui correspondent à l'interglaciaire actuel, l'Holocène (B, fig. 3), le climat terrestre a été éminemment variable quelque soit le mode d'enregistrement étudié. Les données météorologiques disponibles montrent aussi des fluctuations thermiques importantes pendant le Petit Age Glaciaire, entre 1450 et 1880 (c, fig.3) et pour la période de réchauffement qui l'a suivi au début du XXe siècle. La très grande sensibilité de l'environnement naturel des régions subpolaires à de petites modifications du climat est donc très importante d'un point de vue géoprospectif.

## III. — HISTOIRE DE L'HOLOCENE

Pour comprendre ce qui se passe actuellement, nous remontons d'abord à la dernière période froide. L'étude de la dynamique actuelle de ces écosystèmes permet de comprendre beaucoup mieux ce qui s'est passé chez nous lors du Dernier Interglaciaire de 125000 à 105 000 ans. Elle permet d'essayer de prévoir les réactions à long terme du milieu actuel aux perturbations naturelles ou anthropiques qui apparaissent depuis quelques années. Les résultats de la modélisation MOBIDIC menée sur cet interglaciaire par Crucifix et Loutre a permis de démontrer 1) la sensibilité du milieu au rôle joué, par la végétation boréale et la couverture neigeuse d'une part, par la banquise et la circulation océanique d'autre part et 2) pour les paramètres climatiques gérés les caractéristiques de l'orbite terrestre, par les rôles respectifs de l'obliquité et de la surtout de la précession. La précession contrôle en fait la dynamique des glaciers boréaux comme l'a énoncé notamment Mangerud, pour la dynamique de la végétation et nous l'avons montré pour les modalités de l'érosion en plus de l'extension du pergélisol. Nous allons donc considérer la fin de l'Holocène au travers de ces forçages, après avoir retracé les grandes lignes de l'évolution du climat depuis la Dernière Glaciation.

### 1) Fin du Dernier Glaciaire et transition Holocène

Lors du Pléniglaciaire, il y a 25000 ans, le milieu était très aride et très froid en Europe : c'est la période d'extension maximale du pergélisol (sol gelé en permanence) et le niveau marin le plus bas (-130m). Les glaciers ont tous régressé en raison de l'aridité engendrée par l'extension maximale de la banquise et la modification de la circulation atmosphérique, surtout en hautes latitudes, mais aussi dans les Alpes et les Pyrénées, ou au Nord pour les grandes calottes américaines et scandinaves. En Afrique l'aridité prévaut avec la mise en place de grandes formations dunaires, notamment dans le Sahara et dans le Namib ; la direction des vents reste

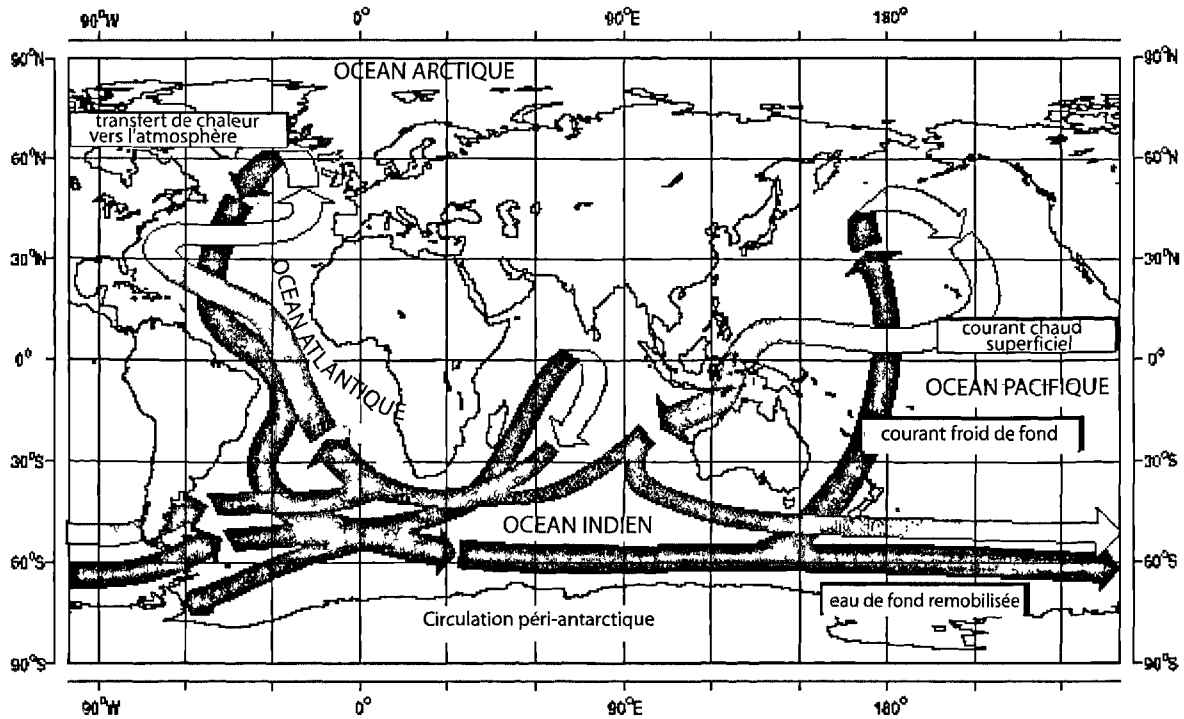


Fig. 1. — La circulation thermohaline, l’océan arctique et la circulation péri-antarctique. L’Antarctique est isolé. L’eau de fond froide se forme dans l’océan arctique sous la banquise et circule sur le fond des océans. Le retour chaud, le Gulf Stream, vient réchauffer l’Europe du NW. D’après W. Broecker, 1994, modifié.

Fig. 1. — The conveyor belt, the Arctic ocean and the peri-Antarctic circulation. The Antarctic is isolated. Cold water appears below the sea ice in the Arctic ocean and streams along the ocean floor. The flow-back or Gulf Stream heats NW Europe. (form Broecker, 1994, modified).

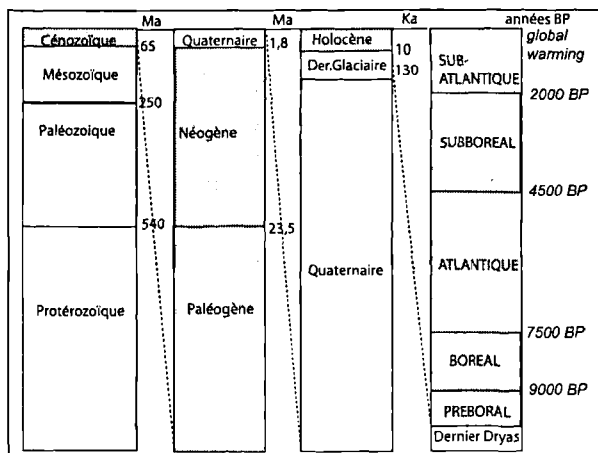


Fig. 2. — Tableau géchronologique simplifié.

Fig. 2. — Simplified stratigraphical timetable.

est surtout le siège de grands dépôts de loess (voir cartes CLIMEX)

Ensuite, l’humidité relative remonte par palier sur les continents jusque vers 15000 ans, favorisant une emprise croissante de la végétation (fig. 4) qui évolue progressivement d’une toundra prostrée à une steppe buissonnante. La pédogenèse débute avec un lessivage modeste des carbonates et un stockage de la matière organique. Les fleuves passent progressivement d’un système en tresse à un système anastomosé. La morphologie en équilibre avec des précipitations très faibles (<200 mm/an, voir moins en Russie) est figée par cette reprise de la colonisation végétale. L’homme est un prédateur rare dans les régions sableuses ou loessiques. Il est présent surtout pendant les interstadias, remontant l’été à la poursuite des troupeaux de rennes et d’aurochs, préférant les vallées abritées du sud de l’Eurasie, des oasis dans un monde aride. A partir de 20 ka BP les précipitations reprennent progressivement, favorisant une extension de la toundra boisée en Europe (fig. 4), de la savane à xérophytes en Afrique du Nord.

Vers 15000 ans BP, l’augmentation des précipitations entraîne une avancée tardive majeure et rapide des glaciers, presque aussi étendue que celle atteinte en début de glaciation. Le pergélisol suit. L’insolation estivale est pourtant croissante, malgré quelques petits épisodes froids dénommés Dryas comme la fleur blanche caractéristique de la

néanmoins quasi-identique. En Amérique du Sud, la pampa se transforme en désert venteux tandis que des formations dunaires apparaissent en Guyane. En Asie, l’aridité et le froid descendent jusqu’au Népal, tandis que la côte est, très aride

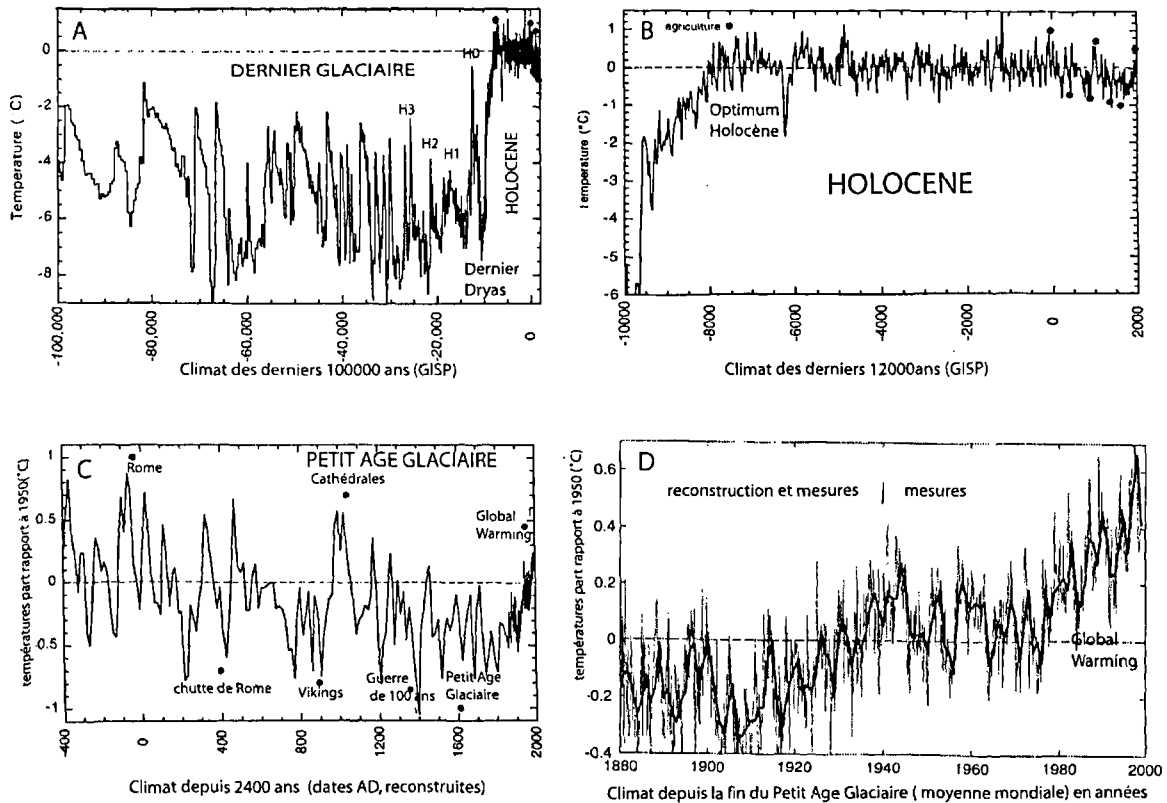


Fig.3. — Evolution des températures mondiales à différents pas de temps depuis 100000 ans. GIEC d'après Sources diverses (GISP, dendrochronologie, archives lacustres, et stations météorologiques).

Fig.3. — Evolution of the mean world temperature at various time spans, since 10000 years. GIEC from various sources (GISP, Dendrochronology, lacustrine proxies and meteorological record).

tundra. Cet épisode induit aux latitudes moyenne une reprise généralisée de l'érosion en région littorale et la mise en place de loess et de sables de couverture et de dunes en région continentale ; cependant la morphologie évolue peu.

Après vers 13,5 ka BP, le climat s'améliore brusquement, après une débâcle glaciaire majeure (a, fig 3, H1), et un petit refroidissement temporaire, le Dryas Moyen (vers 12000 ans). C'est l'amélioration climatique du Tardiglaciaire qui amène un retrait majeur de tous les inlandsis, excepté celui du Québec, et un retrait majeur du pergélisol qui régresse de 45°N vers 55°N en Eurasie, amenant la formation de lacs thermokarstiques en Yakoutie ou dans le delta du Mackenzie au Canada. Les étés sont chauds et les hivers très froids. Le bouleau envahit l'Europe de l'Ouest, suivit de près par les pins, tandis qu'en Europe centrale la steppe se densifie. Les pins qui ne perdent pas leur aiguilles stabilisent la couverture neigeuse, amenant un réchauffement et un lessivage important du sol au printemps ; les sols lessivés se forment dans la région loessique, en même temps que se développe la culture magdalénienne (fig. 4). Les podzols « arctiques » colonisent les dunes et les sables de couverture. Les tourbes s'étendent dans les vallées avec la remontée des précipitations et les fleuves sont chenalisés.

Vers 11 ka BP, le climat se refroidit brusquement : c'est le Dryas récent. La calotte est-canadienne vient de s'effondrer amenant des quantités importantes d'icebergs dans

l'Atlantique nord, ce qui refroidit l'océan comme les glaçons dans le verre d'eau. Le niveau marin est voisin de -40m. Le pergélisol progresse à nouveau, surtout en altitude, permettant la formation de glaciers rocheux ou de champs de palses (battes cryogènes décamétriques) en Europe de l'Ouest. Les glaciers de montagne et les névés permanents s'installent en altitude, particulièrement sur les façades ouest des continents. Comme la végétation est bien installée, elle se prostre, protégeant le sol de l'érosion à basse altitude mais ne produisant pas de pollens. La morphologie n'est pratiquement pas retouchée depuis 20 ka.

Vers 10000 ans le climat se réchauffe en moins de 50 ans, le niveau marin remonte très rapidement ce qui amène une augmentation très rapide des précipitations. La végétation prostrée reprend rapidement, d'abord sous forme de taïga puis de forêt décidue, ce malgré quelques épisodes froids liés à des vidanges de lacs glaciaires, analogues aux Dryas du Tardiglaciaire, comme celui de l'Abitibi ou à de très grosses éruptions volcaniques. Cette fois, les zones déglacées ou en cours d'émergence se couvrent progressivement par la tundra boisée et la taïga. Le chasseur magdalénien remonte vers le nord en suivant la reconquête de la forêt.

## 2) L'Optimum Holocène

Lors de l'Optimum Holocène, vers 8-7 ka, la température moyenne de la planète était en moyenne de 2°C supérieure à

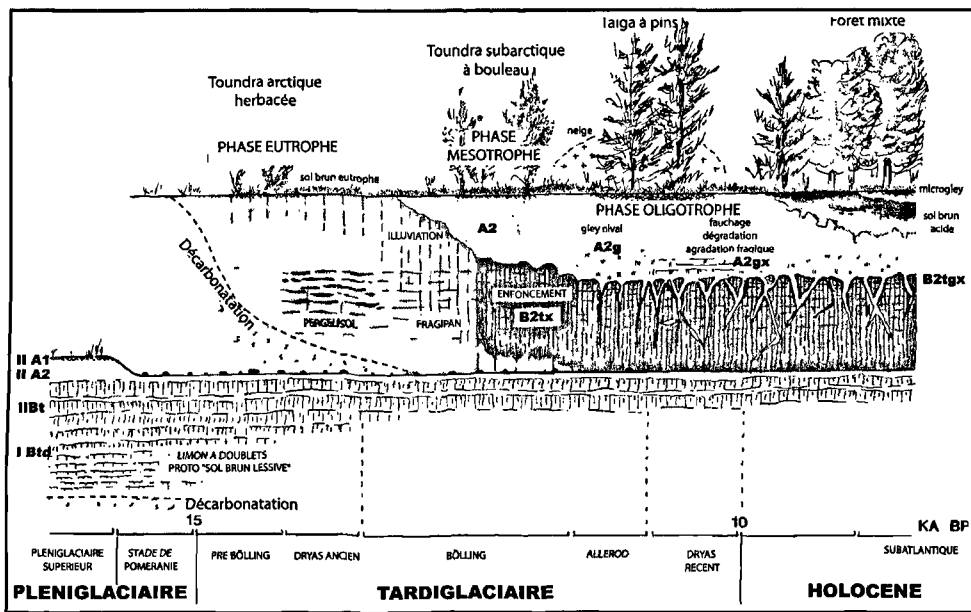


Fig. 4. — Evolution écologique et pédologique du sol de surface dans le Nord de la France : la topographie est stabilisée depuis 15000 ans BP en conditions arides. L'homme en défrichant expose le sol à une pluviosité de rang interglaciaire (van Vliet-Lanoë *et al.*, 1993). Les sigles en gras correspondent aux différents horizons du sol

Fig. 4. — Ecological evolution of the surface soil in Northern France: the landscape is stabilized since 15000 years BP, under rather arid conditions. Man by forest cutting has exposed the ground surface to rainfall of interglacial rank (van Vliet-Lanoë *et al.*, 1993). Bold symbols represent soil horizons.

celle de 1960. L'insolation estivale est à son maximum, et le déficit hivernal réduit. Pratiquement tous les glaciers ont disparu, sauf au NE du Québec et au Groenland où le courant froid du Labrador (fig. 1) entretient une poche froide. La taïga est remontée l'océan Arctique en Eurasie, le chêne atteint la Laponie, le pergélisol s'est réduit à l'intérieur du cercle polaire arctique, amenant la formation de grands lac thermokarstiques jusque dans la zone côtière (grands deltas de la Lena, de l'Ob, de l'Iéniseï, du Mackensie). En Scandinavie et dans les régions polaires, le réchauffement est encore plus marqué et atteint environ 4°C de plus qu'actuellement et le pin envahit les fjells déglacés, comme l'a montré Kullman. Dans les Alpes, la forêt atteint 2.500m contre 2.200m aujourd'hui. En Afrique du Nord, le Sahara verdit avec apparition de nombreux lacs ; le Tibet est un plateau couvert de lacs et de steppes, alimentés par la fonte des glaces ; la mousson d'été remontait à cette époque jusqu'au lac Baïkal dans le Sud de la Sibérie. Nombre de lacs et mers intérieures présentaient de très haut niveaux, avec une flore et une faune particulièrement riches. Les hommes du Mésolithique sont des chasseurs-cueilleurs.

Ceci veut dire que depuis 20 ka, le relief, qui s'est vu protégé par une ré-extension progressive de la végétation, est en équilibre avec un milieu sec aux pentes relativement fortes. Son défrichement à l'Holocène va exposer cette surface à une pluviosité de rang interglaciaire. Il est donc normal que l'érosion se déclenche aujourd'hui avec le développement des activités agricoles.

### 3) Situation actuelle : la fin de l'interglaciaire et l'homme

Actuellement, nous sommes en fin d'interglaciaire. La terre, de part sa position orbitale est actuellement, en déficit

énergétique pendant le printemps et l'été comme lors du démarrage de la dernière glaciation. Pour cette raison l'énergie disponible pour la croissance des végétaux est limitée. Ce déficit amène également un déficit de fonte estivale des sols et une ré-extension du pergélisol en Arctique. D'autre part, les formations superficielles et les sols interglaciaires sont acides et pauvres. La végétation est donc fragilisée et particulièrement sensible aux événements brutaux que constituent les feux de forêt et les tempêtes. Les précipitations baissent par étapes, favorisant une aridification du milieu, le développement des prairies ou de la steppe au détriment des forêts. La pression de CO2 reste encore relativement élevée après l'optimum thermique, de même que celle du méthane. Le niveau marin est 2 à 3 m en deçà de sa position la plus élevée atteinte lors de la fin de l'Atlantique (5000 a BP), comme le montre la côte est de l'Argentine ou du Brésil (fig. 5)

#### a) Un refroidissement progressif, interrompu tous les mille ans : aléas historiques et crises climatiques

Le refroidissement du climat a débuté il y a environ 6000 ans, avec l'apparition d'un déficit croissant en insolation pendant la période estivale. Ce refroidissement sous contrôle orbital, devrait selon A. Berger se poursuivre 5000 ans pour évoluer ensuite vers des conditions glaciaires. Dans l'histoire de l'homme, beaucoup de crises économique-culturelles sont la conséquence directe ou indirecte de modifications climatiques.

Depuis 4500 a BP, l'Arctique s'est refroidi progressivement comme le montre l'abaissement significatif de la limite des pins en Scandinavie et dans le Nord du Québec, malgré quelques fluctuations chaudes comme les

optimum Romains vers l'an 0, du Moyen Age vers l'an 1100 ou froides comme le Petit Age Glaciaire entre 1450 et 1850 AC (C, fig. 3). Ce refroidissement est surtout contrôlé par l'apparition progressive d'un déficit estival de l'insolation gérée par la précession mais, également, par quelques facteurs non orbitaux.

La baisse de la production végétale associée ainsi qu'une aridification bien enregistrée en palynologie a incité les hommes du Néolithique à produire par agriculture ce que la nature ne leur pourvoyait plus qu'avec parcimonie. Les premiers défrichements, souvent catastrophiques d'un point de vue érosif apparaissent en Asie et au Proche-Orient. Les premiers aménagements anti-érosif sont édifiés, sous la forme de culture en terrasse ; un de leur avantages : ils stockent aussi les précipitations. La période des premières invasions historiques, l'exode de la Bible, l'arrivée des barbares maîtrisant le fer, sont toutes liées à des périodes de refroidissement. Par contre les périodes de stabilité politique comme celles qui permettent le développement de Sumer ou de la Palestine et la Pax Romana sont toutes associées à des périodes plus chaudes et plus humides (B, C, fig. 3).

A l'époque romaine et au Moyen Age, la vigne remontait très au Nord de l'Europe, comme l'a analysé Leroy-Ladurie ; les cols alpins étaient déglacés, permettant le passage des éléphants d'Hannibal pour attaquer Rome et les échanges commerciaux florissants de l'époque des cathédrales. Le Sud du Groenland était vert, permettant à la population Viking en cours de croissance d'aller chercher de nouvelles terres vers l'Ouest. L'Afrique du Nord était un jardin fertile où les réserves hydriques alimentaient des aqueducs, des villes et de grosses villas agricoles. La Route de la Soie était praticable au travers du Taklamakan grâce à l'abondance d'oasis aujourd'hui ensablées.

Le niveau marin était plus haut que l'actuel (fig. 5), correspondant aux transgressions du Dunkerquien II et III. Ces épisodes chauds présentent une récurrence de l'ordre de 1000-1500 ans, comme les Evénements Dansgaard-Oeschger (réchauffements brutaux) du Dernier Glaciaire. Ces épisodes heureux ont été séparés par des crises socio-économiques : les invasions germaniques au Nord, via les plaines dès le III<sup>ème</sup> siècle, l'extension de l'Islam au VII<sup>ème</sup> et des Vikings au IX<sup>ème</sup> siècle dans le bassin méditerranéen ont été guidées par une aridification et la famine liée à un refroidissement du climat. De même, nous pouvons relire l'Ancien Testament avec cette optique. Les conquêtes dans le secteur du Croissant Fertile ont été guidées par « la guerre de l'eau ». Plus près de nous, la guerre de Cent Ans (fig. 3C), la révolution française et la révolution russe sont les contreparties, mieux connues, d'épisodes de famine, contrôlés notamment par le climat. Quand les glaciers avancent en Arctique et dans les Alpes, le désert s'étend au Nord et au Sud du Sahara, mais les neiges des chaînes du Liban font remonter le niveau de la Mer Morte !

**b) « L'Optimum climatique des gratte-ciel » : un patchwork climatique et l'annonce de la glaciation prochaine.**

Après la fin du Petit Age Glaciaire, le climat s'est réchauffé. D'une manière générale, tous les enregistrements climatiques montrent un réchauffement important à partir de 1910 jusqu'en 1947. Son amplitude est beaucoup plus importante aux hautes latitudes qu'aux nôtres: le réchauffement qui a immédiatement suivi le Petit Age

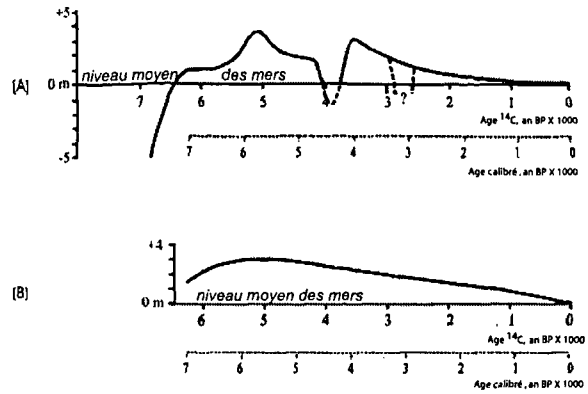


Fig.5. — Evolution du niveau marin au Brésil (hors effet glacio-isostatique marqué) au cours de l'holocène d'après Ybert *et al.* (2003) ; A) au niveau local ; B) au niveau mondial.

Fig.5. — Holocene sea level evolution along the Brazilian coast (aways from glacio-isostatic influence), from Ybert *et al.*, (2003). A: local; B: world.

Glaciaire a été de 4°C au Spitzberg (79°N), 3°C en Bas Arctique canadien (57°N) et 1°C dans les Alpes...

Ensuite, dans les zones arctiques et boréales européennes, la tendance s'inverse, avec de brèves périodes plus chaudes (vers 1980), aboutissant depuis 1947 à un abaissement des températures allant d'environ 0.5°C au Nord de l'Ecosse à >1.5°C sur le Groenland. Une zone en refroidissement s'est installée de 1947 à 1970 sur l'ensemble de l'Arctique et les médias annoncent à l'époque, une prochaine glaciation. Depuis cette période et jusque 1985, la zone en refroidissement est restreinte à l'Arctique atlantique et descend plus particulièrement sur l'Est Canadien; elle a un pendant plus froid et exclusivement marin au Sud du Détroit de Béring. Les analyses faites par P.D.Jones (fig. 6) sur différentes décades pendant cette période montrent que la "goutte" froide atlantique oscille et n'affecte pas toujours de manière homogène les mêmes régions. Les relevés thermiques atmosphériques effectués dans cette région montrent que les températures automnales et hivernales ont tendance à baisser à basse altitude.

L'enregistrement de ce refroidissement sur la végétation et dans les sols est très lisible avec une ré-extension actuelle du pergélisol, la réactivation de bon nombre de formes périglaciaires, une reprise de l'érosion éolienne. Curieusement, cette tendance apparaît beaucoup plus marquée sur le NE du Canada et au Groenland. Il est important de noter que les effets observés jusqu'en 1985 dans toutes ces régions sont très semblables, quoique d'intensité moindre, aux grosses modifications de l'environnement apparues lors du Petit Age Glaciaire. Une situation équivalente existe pour la zone centre-nord du Pacifique. Les observations russes récentes, effectuées dans l'est sibérien et au Kamchatka le confirme. Les effets cartographiés dans cette dernière région sont très voisins de ce qui est observé dans l'est canadien: érosion des sols, déflation en été, recul de la forêt.

Ce refroidissement, modéré certes, est suffisamment marqué pour induire une instabilité croissante de la végétation et des sols dans les secteurs peu anthropisés. Depuis 40 ans, aux latitudes moyennes nord-atlantiques, la fréquence et la



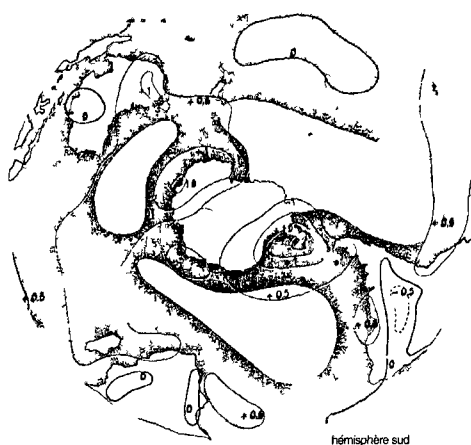


Fig. 6. — Evolution des températures moyennes annuelles entre 1946 et 1986, d'après P.D.Jones, 1990.

Fig. 6. — Mean annual temperature evolution, 1946-1986, from P.D.Jones, 1990.

violence des tempêtes semblent augmenter. Les problèmes d'érosion des sols se sont accentués depuis l'après guerre, liés principalement aux modifications effectives des pratiques agricoles et du parcellaire. En fait les deux changements climatiques et agricoles ont été à peu près synchrones et leurs effets cumulatifs.

Cette reprise de l'érosion n'est pas sans rappeler une situation pédosédimentaire de fin d'interglaciaire et nous pouvons nous demander si l'homme, par son action sur les masses continentales, ne va pas accélérer un refroidissement plutôt qu'un réchauffement. Ce refroidissement récent est situé là où la dernière glaciation s'est initiée et dans une région à déficit thermique chronique comme le montre l'extension du pergélisol. L'extension des calottes polaires s'effectue normalement en période de refroidissement. Les modélisations effectuées par A.Berger montrent que la dernière glaciation a dû s'initier sur le Groenland; les observations de terrain du Service Géologique du Canada ont montré qu'elle s'est initiée sur le bassin de Foxe, à l'Ouest de Baffin (NW du Groenland) en même temps que sur la Scandinavie. Il est un fait que les masses continentales et

glaciaires évoluent thermiquement beaucoup plus rapidement que les océans. Les petits glaciers du NE canadien et du Groenland sont actuellement en expansion.

Cet épisode de péjoration du climat n'est pas sensible partout en Arctique : les régions plus continentales comme celles du delta du Mackensie ou du Yukon ont tendance à se réchauffer modérément depuis 1970, avec un contraste saisonnier plus marqué associé à des étés très chauds. Les profils thermiques de pergélisol effectué en 1970 à Point Barrow (Alaska) et à Yakoutsk, montrent un réchauffement de 2 à 3 °C depuis 25 ans sans que cela soit catastrophique : les températures restent négatives. Ces régions, malgré le refroidissement enregistré entre 1947 et 1970 réagissent donc dans la continuité du réchauffement du début du siècle.

### c) *Le « Global Warming » depuis 1985 : des fait.*

Depuis 1985, le réchauffement qui a suivi le Petit Age Glaciaire s'emballe. La plupart des instances et des médias montre du doigt la surconsommation des combustibles fossiles liée à l'industrialisation. Cette dernière ainsi que l'extension du cheptel et des rizières, productrice de méthane en conséquence de la démographie galopante du Tiers Monde, sont les responsables désignés d'un effet de serre aux effets dévastateurs annoncés. Cependant, l'homme induit par son action bien d'autres phénomènes qui interagissent à l'opposé de l'effet de serre, notamment en défrichant et permettant une accentuation de l'érosion des sols. Enfin, il est curieux de constater, que la pression de CO<sub>2</sub>, si elle augmenté régulièrement ces dernières décennies pour atteindre actuellement 380 ppm, reste de loin largement inférieure à ce qu'elle était au Paléozoïque ou au Crétacé. Le réchauffement actuel et son cortège d'effets catastrophiques annoncés arrive presque mille ans après l'Optimum climatique des Cathédrales, quasiment dans la continuité des réchauffement brutaux des événements Dansgaard-Oeschger.

### - La hausse des températures

Les relevés climatiques des stations de nos régions atlantiques ou de l'hémisphère sud attestent plutôt d'un statu quo thermique à long terme voire d'un refroidissement, malgré les étés temporairement torrides de ces dernières années (fig. 7). C'est moins le cas des stations continentales. En outre, beaucoup de stations présentent un réchauffement, simplement parce qu'elles sont localisées dans des zones urbanisées depuis la création de la station : Paris-Monstoursis a vu sa température croître de 3°C en moyenne grâce à la cloche de pollution parisienne ! On peut donc se poser des questions sur la représentativité de la courbe des températures de l'hémisphère nord produite par le Groupe International d'Etudes du Climat ou GIEC.

Cependant, depuis 1993, il semble pour différentes raisons que l'irradiation solaire soit plus importante, malgré des températures qui évoluent peu. Les contrastes thermiques semblent plus abruptes et rapides entre les masses d'air tropicales et les masses d'air polaires, comme le montrent nos chauds-froids estivaux actuels et la recrudescence des tempêtes et des précipitations élevées (fig. 8); ces contrastes se marquent également plus au sud et sont corrélés avec la sécheresse sahélienne, le changement d'orientation des vents et la migration du Sahara vers le sud et vers l'Europe méridionale.

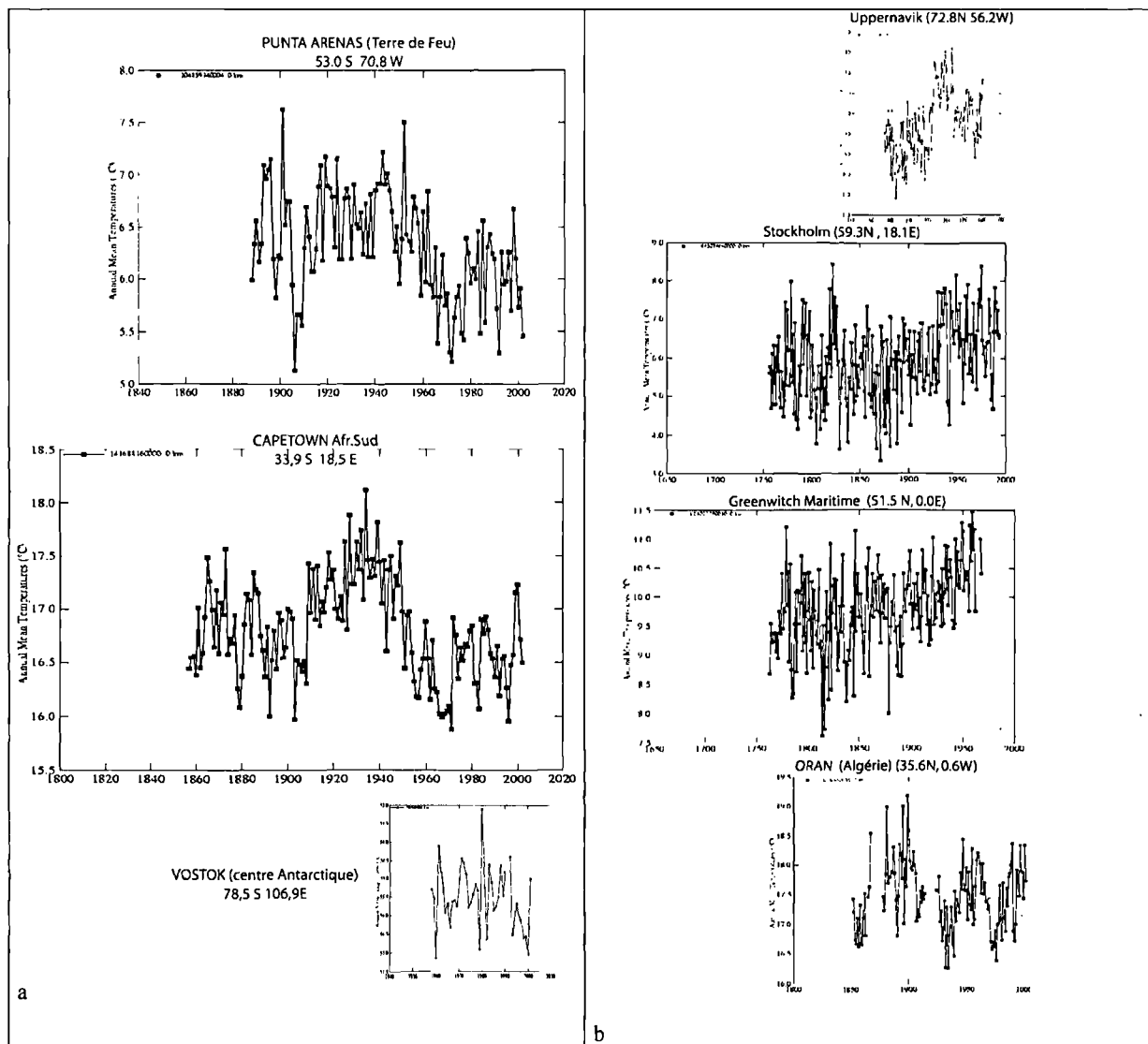


Fig. 7. — a : évolution des températures en Antarctique et dans l'hémisphère Sud ; b : le long de l'Atlantique (minuscules). D'après les données de la base de données climatiques de la NASA (Earth Observatory).

Fig. 7. — a : Thermal trend of the Antarctic and southern hemisphere ; b : along the Northern Atlantic . NASA data base(Earth Observatory).

- La remontée du niveau marin

Les changements thermiques affectent généralement les 400 premiers mètres de l'océan. Les relevés satellitaires TOPEX-POSEIDON mettent en évidence une irrégularité de relèvement du niveau marin, très fluctuante d'une année sur l'autre. En Europe de l'Ouest, ce relèvement, lié au Gulf Stream, est en moyenne de 3mm/an et pour les 2 ans qui viennent de s'écouler de 4,2 mm/an . Dans l'hémisphère sud, la convergence des eaux polaires et tropicales remonte actuellement vers le pôle, avec pour résultante un réchauffement climatique, une déglaciation importante, sensible depuis une vingtaine d'années au niveau des glaciers des Kerguelen et surtout de la Péninsule Ouest Antarctique, amenant des vêlages gigantesques. Les relevés satellitaires montrent également une réduction de la banquise en Arctique et sur la péninsule sud-antarctique. Par contre la banquise antarctique, elle, s'étend notamment depuis 10 ans (fig. 9).

- La fonte de la banquise et des glaciers

D'une manière globale les surfaces englacées et enneigées (hors calottes) se réduisent actuellement (fig 9 et 10). Mais les données concernant les calottes groenlandaises et antarctiques sont contradictoires. Les études glaciologiques menées au Spitzberg et plus récemment sur la Norvège montrent qu'après une période de recul marqué lié au réchauffement des années 1920-45, l'accumulation glaciaire redevient actuellement positive, en association avec une ablation réduite consécutive au léger refroidissement des années 1970-85. La fonte catastrophique annoncée pour relever de plus de 5 m le niveau des océans est loin d'être effective.

- La « désertification », ou l'aridification

La désertification est un terme à la mode, mais dont l'usage est inapproprié. En fait, l'aridification ou avancée du

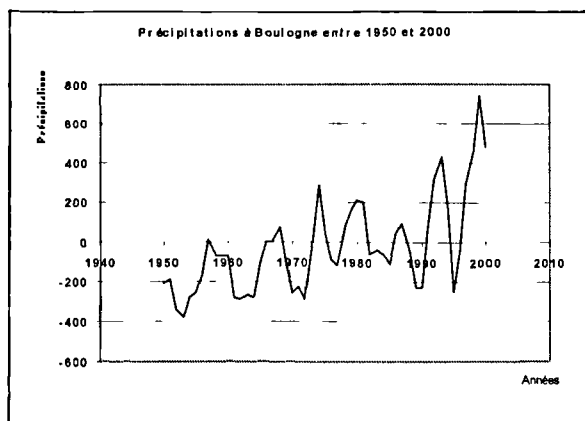


Fig. 8. — Evolution récente des précipitations à Boulogne (données Météofrance), à comparer avec la courbe de l'évolution récente de la température (GIEC, fig. 2). La recrudescence des inondations est flagrante pour les deux derniers pics (à comparer à l'évolution de l'activité solaire) (fig. 13).

Fig. 8. — Recent trend in precipitation at Boulogne (NW France), Météofrance data. This has to be compared with the recent trend in world mean temperature (GIEC, fig. 2). Flood frequency increase is clearly linked with the last two pics (to be compared with solar irradiance, fig. 13)

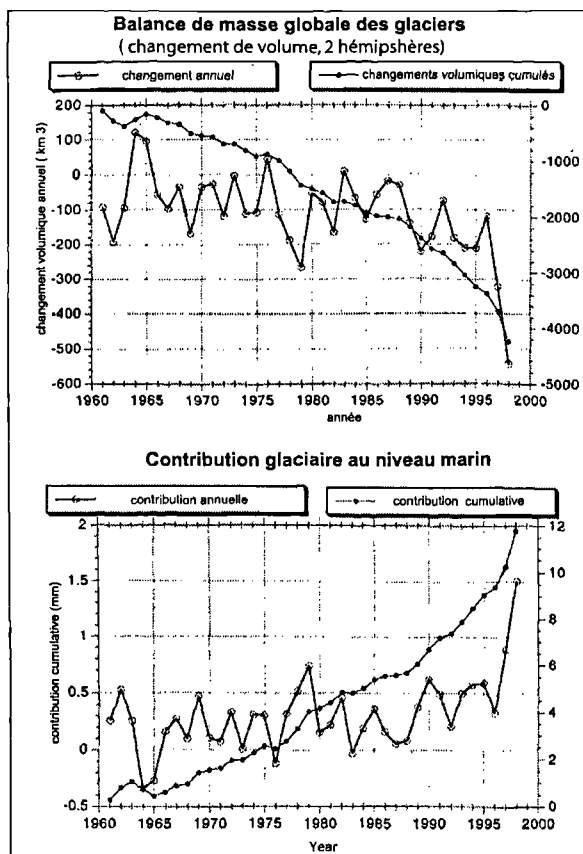
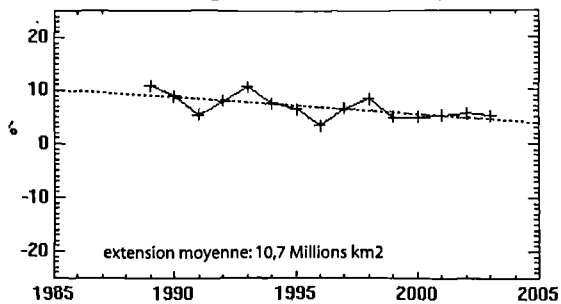


Fig. 10. — Evolution récente des glaciers et du niveau marin (toutes sources confondues). Site Web Earth Observatory NASA: d'après Dyurgerov, INSTAAR, Boulder, USA 2002.

Fig. 10. — Recent trend of glaciers and sea level (all sources) Web site Earth Observatory NASA.

Extension de la glace de mer /Hémisphère Nord



Extension de la glace de mer /Hémisphère Sud

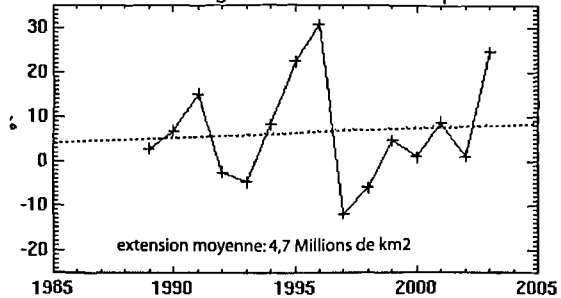


Fig 9. — Evolution récente de la couverture de glace de mer dans les 2 hémisphères: la glace régresse en Arctique, alors qu'elle a tendance à progresser en Antarctique (hors péninsule occidentale). D'après Dyurgerov, INSTAAR, Boulder, USA. 2003 Site Web Earth Observatory NASA.

Fig 9. — Recent trend of sea ice on both hemispheres: ice cover retracts on Arctic but trends to extent on the Antarctic shores, excepted the western Peninsula. Web site Earth Observatory NASA.

désert recouvre deux termes différents: l'aridification des sols et l'aridification du climat, liée, elle à la sécheresse atmosphérique. L'aridification des sols est liée à la dénudation: des croûtes de battance de la pluie, des croûtes salines se forment après destruction du couvert végétal. Ceci a pour conséquence une augmentation de l'albédo, une augmentation du ruissellement et une diminution du stockage thermique en profondeur dans le sol sec. Le corollaire est une pénétration rapide du gel en hiver. Cette aridification est favorisée par l'action de l'homme. Une étude de la Food and Agriculture Organisation (FAO) en Iran a montré que l'abaissement des nappes phréatiques de plus de 10m n'était pas lié à une diminution des précipitations, mais bien à une surexploitation et à une mauvaise gestion des ressources en eau pour l'agriculture. La même chose peut être dite pour l'Asie centrale où les détournements de fleuves ont asséché la Mer d'Aral ou, pour le Sud de la Libye où l'exploitation effrénée et médiatisée des nappes fossiles va mener à la salinisation des sols et à un assèchement définitif d'oasis.

Cependant, en dehors des exemples de mauvaise gestion de l'eau, la sécheresse climatique, alias l'absence de précipitation est liée à des problèmes de répartition de masses atmosphériques. Le refroidissement de l'Égire est corrélé avec des eaux marines plus froides dans l'Est de la Méditerranée et le synchronisme entre refroidissement

arctique, érosion hydrique dans le Sud de la France et sécheresse saharienne est flagrant. Ceci dénote un déplacement des dépressions cycloniques vers le Sud de l'Europe ainsi que la migration de la zone de mousson africaine vers le Sud, comme en période glaciaire. Les hautes pressions règnent sur le Sahara, expliquant depuis 1967 la Grande Sécheresse de ce secteur.

#### IV. — L'ÉVOLUTION RECENTE DU CLIMAT ET L'INTEGRATION DES DIFFÉRENTS FORÇAGES

Nous sommes en fin d'interglaciaire, les masses continentales arctiques terminent leur remontée glacio-isostatiques et augmentent la surface émergée aux alentours de l'océan Arctique. La banquise s'étend normalement vers le Sud dans l'hémisphère nord et autour de l'Antarctique. Par conséquent, les zones polaires, et particulièrement l'Arctique voient leur surface et leur albédo augmenter avant la baisse du niveau marin, ce qui en période à déficit estival de l'insolation – précession des équinoxes et obliquité croissante - entraîne un refroidissement notoire. L'effet de serre est un facteur secondaire. La masse océanique, son inertie thermique et la lenteur de ses mouvements ne permettent pas de grandes variations climatiques à l'échelle du siècle. Ce n'est pas le cas des courants marins. Tout au plus, la chaleur qui n'est pas accumulée dans les sols en raison de l'augmentation de l'albédo croissant des masses continentales, sera absorbée par l'océan dans la zone recevant le plus d'énergie, la zone intertropicale. Ce phénomène accentue les gradients thermiques interzonaux et est probablement un des éléments de contrôle du phénomène El Niño dont la fréquence augmente.

##### 1) Les paramètres non-anthropiques

###### a) *Les effets tampons*

- *La circulation thermohaline* : L'extension vers le sud de la banquise arctique en début de refroidissement accentue la production d'eau froide et salée, ce qui permet l'entretien de la circulation thermohaline et tamponne donc le refroidissement qui s'installe très progressivement. Au contraire, si le climat se réchauffe et que la banquise régresse, comme c'est le cas depuis 1995 ou en 1968, la production d'eau froide et lourde est limitée et la circulation thermohaline (fig. 1) va se ralentir et se tarir. C'est un ralentissement qui est observé depuis plusieurs années par les chercheurs du LODYC / CNRS, au niveau de la côte Est du Groenland. Ceci va entraîner une diminution d'efficacité du Gulf Stream et par conséquent un refroidissement de toute la zone NE de l'Atlantique, de l'Europe tempérée jusqu'au Groenland, donc une ré-extension de la banquise.

- *L'instabilité des calottes* : Si le climat se réchauffe, les précipitations deviennent plus abondantes, les fleuves qui se jettent en Arctique déversent des eaux douces et froides, donc plus légères à la surface de l'océan. Ce phénomène permet une extension rapide de la banquise mais ralentit la circulation thermohaline. D'autre part, cette augmentation globale des précipitations induit des précipitations neigeuses abondantes en altitude sur les calottes pérennes comme celle du Groenland, amenant leur épaissement, même si leur zone bordières tendent à fondre. La surcharge en glace entraîne un abaissement du point de fusion à la base de la

calotte et une lubrification basale de la zone d'alimentation, alors qu'à basse altitude, la plasticité de la glace augmente avec la température. La fusion de la neige en été et l'augmentation globale des précipitations toujours à basse altitude entraînent aussi une lubrification et une pression hydrostatique soutenues à la base du glacier. Une dynamique de « surge », une accélération des fleuves de glace et un vêlage abondant des langues glaciaires flottantes apparaissent, comme celle de Disko au Groenland occidental. Ceci va potentiellement induire un vêlage particulièrement intense vers 2050 au NE du Groenland, donc un refroidissement.

Les résultantes de ces différentes composantes sont 1) un apport d'eau douce et froide en surface de l'océan, 2) un ralentissement de la circulation thermohaline et 3) une augmentation du gradient thermique atmosphérique interzonal, ce qui favorise la migration vers le Sud des anticyclones mobiles polaires décrits par Leroux et augmente la fréquence des tempêtes. Le cumul de ces paramètres montre qu'un réchauffement peut mener progressivement par rétroaction simple à un refroidissement.

###### b) *Les effets rétroactifs complexes*

###### - *Les gaz à effet de serre*

Les gaz à effets de serre sont essentiellement le CO<sub>2</sub>, le méthane, la vapeur d'eau, l'oxyde nitreux et l'ozone, ces deux derniers étant nettement moins abondants que les autres. Le CO<sub>2</sub> est naturellement en augmentation au cours d'un interglaciaire en raison de l'augmentation de l'altération des roches carbonatées et de la respiration végétale et animale. Il en est de même pour le méthane produit par la biodégradation anaérobie de la matière organique ainsi que la panse des ruminants et pour la vapeur d'eau, produite par l'évapotranspiration végétale en période de haut niveau marin. Elle atteint 280- 300 ppm peu après le début des interglaciaires.

Les puits biologiques de carbone du milieu continental sont nombreux et si les réactions de la biomasse évoluée (végétation) sont pratiquement comprises, il n'en est rien pour la biomasse microbienne. En milieu océanique, les modalités du puit biologique varient selon les peuplements de phytoplancton et leur biogéochimie. Il est curieux de constater qu'en Atlantique Nord, la biomasse est particulièrement élevée comparée à celle du Pacifique Sud. Ceci est essentiellement dû aux apports de nutriments continentaux des sols apportés par les fleuves ou le vent, notamment le fer et le phosphate.

En cours d'interglaciaire, la production de méthane est décalée par rapport à celle du CO<sub>2</sub>. Une partie est produite tardivement dans les estuaires qui reçoivent la matière organique érodée des horizons humifères des sols. Une autre est produite en très grande quantité par la putréfaction des tourbes et lacs subarctiques, production hivernale qui est généralement décalée par rapport à l'autre, estivale. Si la pression de CO<sub>2</sub> et l'humidité augmentent, les zones subarctiques constituent par extension des tourbières, un puit de CO<sub>2</sub> efficace mais une source importante de méthane. Si on en juge par les enregistrements du forage de Vostok, la disparition du méthane est quasi-synchrone de la baisse des températures, à la différence du CO<sub>2</sub>.

Deux autres sources de CO<sub>2</sub> et de méthane sont peu évoquées quoique loin d'être négligeables : les volcans et les

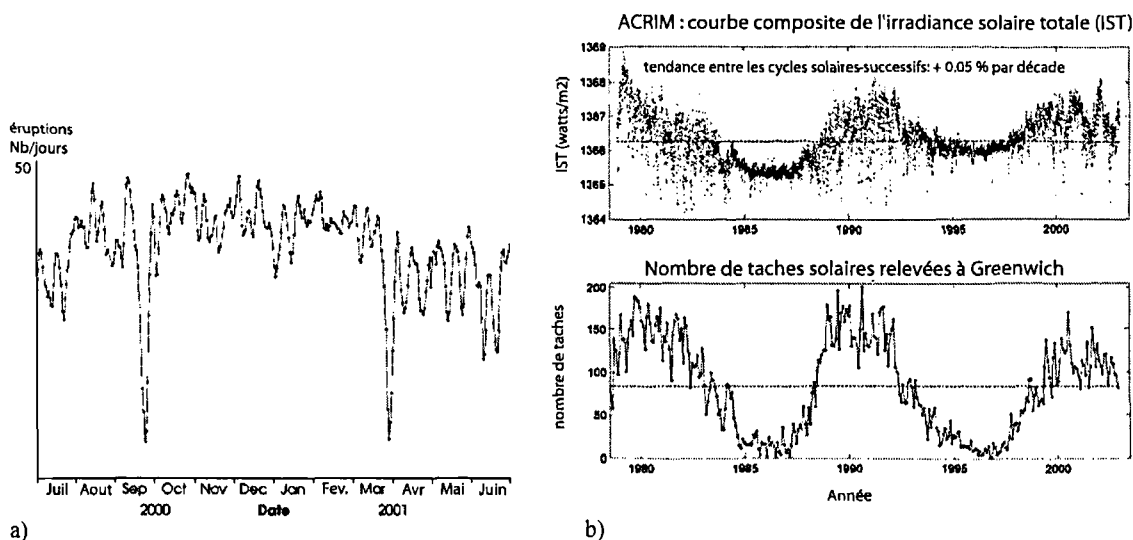


Fig. 11. — a) Evolution récente de l'activité solaire et de l'irradiance solaire (cycles de Schwabe 22 et 23).

Fig. 11. — Recent trend in solar activity and solar irradiance. Programme SORCE, Site Web Earth Observatory NASA

émissions de bassins sédimentaires. Leur activité peut être exacerbée selon les contextes géologiques : événements compressifs ou volcanisme. Lorsque cette émission se fait en mer, elle peut former, en raison de la pression et de la température de l'eau, une couche ou des accumulations d'hydrates gazeux. Lorsque la température de l'eau profonde augmente, ces hydrates se subliment et rejoignent l'atmosphère, contribuant ainsi à l'effet de serre interglaciaire. Le changement de pression est probablement aussi sensible pour les très grandes régressions : habituellement, la baisse eustatique lors du Dernier Maximum Glaciaire est estimée à  $-130\text{m}$ .

Pour conclure, la teneur actuelle en gaz à effet de serre est effectivement en augmentation, mais si en se référant par exemple au Dernier Interglaciaire (125 ka BP), cette teneur se maintient un certain temps après le maximum thermique. Pour notre interglaciaire, le maximum thermique a eu lieu il y a environ 7000 ans (B, fig.3 ; fig. 5). Les puits pour le CO<sub>2</sub> et le méthane sont encore insuffisamment connus pour que les modélisations soient entièrement valides. L'augmentation actuelle des précipitations en relation avec la température moyenne planétaire peut très bien amener une séquestration croissante dans la biomasse continentale comme semble le montrer les images produites par le nouveau satellite ENVISAT. Par contre, nous verrons que l'érosion des sols est fortement pressentie pour accroître l'efficacité du puit océanique.

#### - Les aérosols

Le rôle des aérosols est important, qu'ils soient primaires, comme les cendres volcaniques, les poussières éoliennes et les suies, ou secondaires, comme les gouttelettes d'acide sulfurique provenant des DMS algues : en moyenne, les aérosols ont un effet parasol s'opposant à l'effet de serre. En plus, ils favorisent la nucléation des précipitations. Le forçage radiatif des gaz à effet de serre est estimé à  $2,4 \pm 0,2 \text{ W/M}^2$ . L'effet du forçage par les aérosols est du même ordre mais de signe inverse. Une part importante des aérosols primaires

provient des feux de forêt ou de brousse utilisés pour le défrichement à toutes latitudes, parfois non maîtrisés lors des grandes périodes de sécheresse. Une étude des incendies de forêt (boréale et taïga) en Scandinavie et au Canada est assez révélatrice de changements, même si 60% des feux sont d'origine anthropique. Une autre part provient de la déflation des surfaces continentales arides, défrichées salinisées ou surpâturées.

Une source majeure d'aérosols sulfurique est l'oxydation des DMS (sulfures et iodure de diméthyle) produit par les algues planctoniques, particulièrement productives dans les eaux froides, et notamment, sous la banquise. D'autre part, l'apport croissant de nutriments continentaux riches en fer, arrachés par l'érosion des sols via le ruissellement ou le vent, favorise également leur explosion. Ceci aboutit à une eutrophisation des plate-formes épicontinentales. Elle vient d'être mise en évidence dans le cas de la Méditerranée dans le cadre des programmes de recherche internationaux.

#### - L'activité solaire

Le soleil est la principale source d'énergie que reçoit notre atmosphère. En raison de la complexité des échanges, la terre met environ 2 ans à répercuter thermiquement tout changement de régime. Le soleil présente plusieurs cyclicités reconnues : 11 ans, 27, 78 et 181 ans. Cette activité lors des cycles à 11 ans ou cycle de Schwabe et 78 ans ou cycle de Gleissberg, est responsable de la variation de la température enregistrée depuis le 19<sup>ème</sup> siècle à la surface de Terre. Lors des très grosses éruptions, comme en 1859, 1972 et en 1999, le soleil voit son émission lumineuse augmenter avec la fréquence des taches solaires augmente. Pendant les périodes de calme, elles disparaissent, comme entre 1645 et 1715, le Minimum de Maunder. Pendant le Petit Age Glaciaire, le soleil est passé par plusieurs phases de minima d'activité : Wolf au 13<sup>ème</sup> siècle, Spörer au 15<sup>ème</sup> siècle, Maunder, le plus célèbre, et Dalton à la fin du 19<sup>ème</sup>. Lors du Minimum de Maunder, la température terrestre moyenne a baissé de

0,46°C. Le réchauffement qui a immédiatement suivi a été de l'ordre de 4°C au Spitzberg (79°N), 3°C en Bas Arctique canadien (57°N) et 1°C dans les Alpes.

Les températures de 2002 ont été les plus chaudes enregistrées au niveau mondial, malgré un été maussade sur la côte ouest de l'Europe, suivant de peu le maximum solaire. Pour conforter ceci, les données par la sonde Mars Global Surveyor ont permis de mesurer les variations de la calotte de glace de l'hémisphère sud de la planète Mars : cette glace a nettement diminué depuis 1999. Le rayonnement cosmique parvient à la terre lorsque notre champ magnétique faiblit, sous le contrôle réduit du vent solaire. Des chercheurs danois ont montré qu'il existe une très bonne corrélation entre l'extension de la banquise, la nébulosité et le flux des rayons cosmiques. Pour que la variation d'irradiance contribue réellement au changement climatique, il faut qu'elle atteigne de l'ordre de 0,5 watt/m<sup>2</sup>/siècle (Willson 2003). Depuis le début des mesures (1978), l'augmentation de l'irradiance solaire moyenne est de 0,05 watt/m<sup>2</sup> par décennie, valeur qui s'approche

#### - Bilan

L'efficacité des processus décrits ici n'a pas encore été indubitablement validée, notamment en ce qui concerne le rôle des aérosols. Nesme-Ribes & Thuillier résumant ainsi la situation :

Lorsque l'activité solaire augmente, l'effet thermique le plus important se situe aux basses latitudes, avec une augmentation de l'humidité, ainsi qu'une extension vers les latitudes subtropicales de la cellule de Hadley (zone aride). Aux moyennes latitudes, une augmentation des précipitations caractérise les mois d'hiver et un déficit les mois d'été.

Une augmentation de l'activité solaire ou de la concentration des gaz à effet de serre ont des effets thermiques comparables dans la troposphère. Cependant, l'échauffement est plus uniforme en latitude dans le second cas. L'hétérogénéité du réchauffement observée plaide en faveur du soleil, tout comme la fonte de la calotte martienne.

Pour la période 1880-1993, l'activité solaire (estimée à l'aide des taches solaires) et la concentration en CO<sub>2</sub> expliquent 90% de la variation de température observée, dont 2/3 à l'activité solaire seule. Les aérosols expliquent le reste (fig. 12).

Pour la période 1700-1993, la périodicité dominante des variations de températures est le cycle de Gleissberg (78 ans) lié aux taches solaires (fig. 12).

En raison des résultats mettant en évidence les variations de l'activité solaire concomitantes avec celles du climat, il ressort que le soleil est pour 60 % à l'origine des changements climatiques à l'échelle du siècle, 30 % pour l'effet de serre actuel et 10% pour les autres phénomènes soutenus (érosion, aérosols) ou accidentels (volcans, feux). Comme le souligne Nesme-Ribes, l'introduction de la variabilité solaire en climatologie se heurte à une objection principale : les variations de l'activité solaire semblent trop petites pour expliquer les effets observés. Cependant, plusieurs mécanismes amplificateurs existent, bien qu'il ne soit pas possible, dans l'état actuel de nos connaissances, de démontrer leur totale efficacité.

## 2) Les paramètres anthropiques

### a) L'érosion et ses conséquences.

Actuellement, les facteurs favorisant l'érosion en milieu agricole à l'échelle mondiale sont à la fois mécaniques et biologiques. D'abord, le paysage sur lequel s'exerce cette érosion est, comme nous l'avons vu, un héritage des périodes glaciaires et, de ce fait, est en équilibre avec des précipitations beaucoup plus faibles que celles qui règnent actuellement. Cette érosion a évolué au cours des temps historiques en fonctions du climat, et des pratiques agricoles et démographiques (fig. 13).

En régions tempérées, les modifications des rotations de cultures laissent le plus souvent les sols dénudés en hiver comme le souligne Auzet. Depuis 1950, le remplacement des engrais organiques par des engrais chimiques abaisse la teneur en matières organiques des sols, limite leur activité biologique et affaiblit leur stabilité. Le drainage des eaux de pluie vers la profondeur du sol et les nappes est réduit en faveur du ruissellement de surface, vecteur de l'érosion. Les autres facteurs d'aggravation sont : 1) le tassement des sols par les engins agricoles avec la formation de la semelle de labour, 2) l'accroissement de la taille des parcelles cultivées et la destruction des haies (réservoir hydrologique, source de matières organique) à la suite des remembrements.

Dans une telle situation, une augmentation du volume des précipitations comme celle qui est observé depuis 1950 a un impact beaucoup plus important sur l'état de surface des sols que par le passé. La déforestation assez généralisée, sauf en France, agit plus brutalement encore en milieu intertropical. En milieu aride, comme en Australie ou en Afrique du Nord, le défrichement et l'augmentation des coefficients de ruissellement induisent des crues brutales et dévastatrices comme celle d'Alger en 2001. L'irrigation utilise une eau rare, souvent très légèrement saline comme dans les oasis ou au Niger et en Egypte, aboutissant à la longue à la stérilisation des sols par salinisation et à leur érosion éolienne, et à une exportation énorme de sédiments via les fleuves vers l'océan.

Donc, d'une manière générale, l'agriculture, telle qu'elle est pratiquée actuellement au niveau mondiale interfère directement sur le climat via une augmentation notable de l'albédo terrestre en diminuant la teneur en matière organique de la surface des sols, en diminuant leur humidité, en chargeant les cours d'eau, les lacs et les zones côtières en particules en suspension. L'inertie thermique des surfaces continentales diminue et en zone tempérée et intertropicale, l'évapotranspiration diminue également.

### b) L'industrialisation et l'urbanisation

En plus de la perturbation thermique liée au développement des villes, l'augmentation des surfaces imperméabilisées par les infrastructures urbaines, industrielles et routières accroissent considérablement le ruissellement. Ceci aboutit au paradoxe que bien que la population ait besoin de plus d'eau pour son industrie et son agriculture, son accroissement induit une diminution importante de la recharge des nappes. L'homme s'est mis à construire des barrages pour ses besoins en eau et en énergie. Il a abaissé les niveaux de nappes en les pompant excessivement comme en Iran ou en Lybie. Il s'est pris également à détourner des

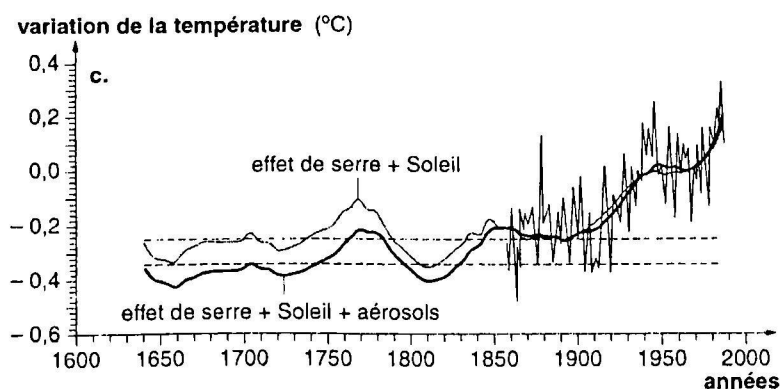


Fig. 12. — Comparaison entre l'évolution des températures moyennes terrestres mesurées avec la superposition des différents forçages (Nesme-Ribes & Thuillier, 2000).

Fig. 12. — Comparison between the mean annual temperature trend on earth and the various forcing (green house, aerosols and sun irradiance). (Nesme-Ribes & Thuillier, 2000).

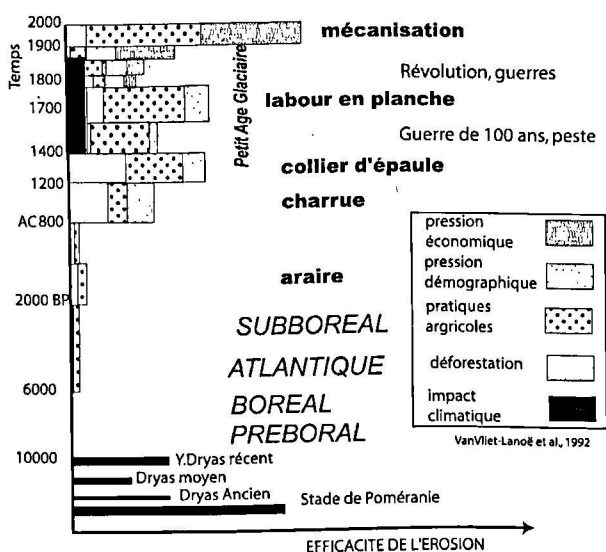


Fig. 13. — Evolution semi-quantitative de l'érosion dans le nord de la France au cours de l'Holocène (d'après Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1993). Développement de ravine dans l'Audemarois (photo van Vliet-Lanoë).

Fig. 13. — Semi-quantitative evolution of soil erosion in northern France during the Holocene (from Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1993). Gullying by rill wash in the region of St Omer (photo van Vliet-Lanoë).

fleuves pour irriguer par ennoïement son agriculture industrielle, asséchant la Mer d'Aral et aridifiant en contre-coup les régions environnantes. Du côté Canada, les plans hydroélectriques géants (Rivière la Grande, Grande Baleine) ne sont pas sans conséquences : ils entraînent régionalement un bilan énergétique négatif en raison de la disparition tardive de la glace de lac (albédo élevé) associé à une fonte de neige retardée en mai – juin, ce en pleine période d'apport calorifique solaire maximum.

Le monde actuel, depuis le 19<sup>ème</sup> siècle présente une augmentation progressive des gaz à effet de serre, liée notamment à la consommation à des fins énergétiques du carbone fossile et à un accroissement du cheptel et des rizières. Depuis les mesures effectuées au Mauna Loa, cette augmentation est une certitude, mais son origine n'est pas connue à 100%. En 2002 la PCO<sub>2</sub> est de l'ordre de 380 ppm contre 280-300 environ pour un interglaciaire. Cette augmentation est encore modeste par rapport à l'effet de serre

du Crétacé où la PCO2 atteignait entre 600 et 3000 ppm selon les modes d'évaluations. Or la PCO2 augmente aussi normalement avec l'intensification de l'activité biologique liée à une température plus élevée et des précipitations plus élevées, mais également avec un dégradation accélérée de la matière organique des sols exposée à l'oxydation par la pratique du labour. Si la consommation de carburants fossiles se stabilise, la PCO2 devrait redescendre assez rapidement (fig. 15).

La pollution sulfurique de l'hémisphère nord est très importante. Elle provient des secteurs industrialisés comme l'Europe plus particulièrement des Pays d'Europe Centrale (exploitation de la lignite), de la cote est des EU, de l'Inde et de la Chine. D'une manière générale, en Europe, la teneur en aérosols sulfuriques de la troposphère a augmenté d'un facteur 4 entre 1920 et 1980 : une partie importante pourrait dans les années récentes résulter de l'accroissement des feux naturels et des incinérateurs.

## V. — LES MODELISATIONS

Les modélisations géologiques avec des données simples donnent souvent des réponses avec une marge d'erreur supérieur à 50%. Les modélisations climatiques ont le mérite d'exister, et d'essayer d'estimer à partir de scénarii extrêmes comment notre système va fonctionner. Néanmoins, un modèle est simplificateur par essence et dépend à la fois des paramètres et des bases de données sciemment choisis. L'essentiel des modèles fonctionnent avec des bilans radiatifs et non la circulation générale. Il est cependant intéressant de constater que certains modèles, comme celui développé par Le Treut, approche à 60% les observations de Jones (1990) en prenant en compte l'effet des aérosols. La modélisation possède un certain degré de validité mais il ne faut pas lui faire dire plus qu'elle ne le peut, notamment en prenant en compte les marges d'erreurs ! Aujourd'hui, étant donné les enjeux économiques, la politique, voire la religion s'en mêlent et sont soutenus par des scénarii médiatiques sur le modèle du film catastrophe. Nous sommes en présence d'un système manipulé, alors que la prudence scientifique devrait être de rigueur.

## VI. — CONCLUSION : VERS UNE ENGLACIATION CROISSANTE A LONG TERME

Nous avons vu qu'au cours des temps géologiques et à plus court terme à l'échelle du Cénozoïque, nous sommes en raison de la tectonique des plaques, dans un contexte d'englaciation de plus en plus marqué. Dans ce contexte global, nous sommes en raison du forçage orbital à la fin d'un interglaciaire banal, dans un épisode de réchauffement millénaire faisant suite au Petit Age Glaciaire. En 1970, les médias nous annonçaient l'éminence d'une Glaciation. Aujourd'hui, alors que le soleil vient de passer par un maximum d'activité, c'est un réchauffement cataclysmique qui est toujours évoqué.

Les hautes latitudes enregistrent comme le désert la moindre modification du milieu. Selon les observations présentées plus haut, il semble que les perturbations industrielles et agricoles induisent, dans les régions côtières de l'Arctique Atlantique, une rétroaction accentuant

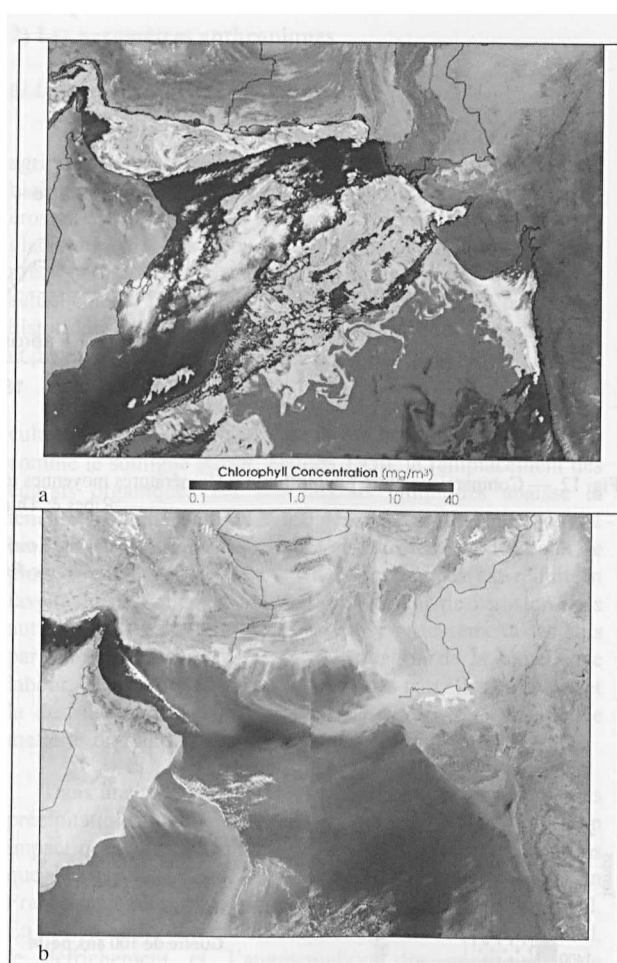


Fig. 14. — « Bloom » algair (a) en grisé et apport éolien (b), golfe du Bengale, Images Jacques Descloitres, MODIS Rapid Response Team, NASA GSFC, 2 mars 2003. Site web Earth Observatory, NASA.

Fig. 14. — *Algae bloom (a, in gray) linked to an aeolian spray (b), Bengale gulf. Images Jacques Descloitres, MODIS Rapid Response Team, NASA GSFC, 2 march 2003. site web Earth Observatory, NASA.*

régionalement le refroidissement progressif du système naturel, enregistré depuis 4500 BP dans l'hémisphère Nord, alors que le reste de l'Arctique se réchaufferait modérément puis un peu plus rapidement depuis 20 ans. L'Antarctique, péninsule occidentale excepté, reste de glace dans son isolement, et se refroidit. Il est inquiétant de constater à la lumière des résultats des carottes antarctiques que pour la grande majorité des évènements quaternaires, l'Antarctique reste le chef d'orchestre du climat comme le souligne Jouzel.

Pour le moment, les zones subtropicales et méditerranéennes s'aridifient. Le bilan global de l'action indirecte et directe de l'homme à l'échelle terrestre est une érosion mécanique continentale importante, entraînant un retour précoce de la rhexistase, à un régime de début glaciaire, après la période de stabilité biogénique de l'interglaciaire actuel. L'anomalie actuelle, probablement transitoire, se produit avec une élévation modeste du niveau marin. Dans cette situation, il est difficile de nommer avec



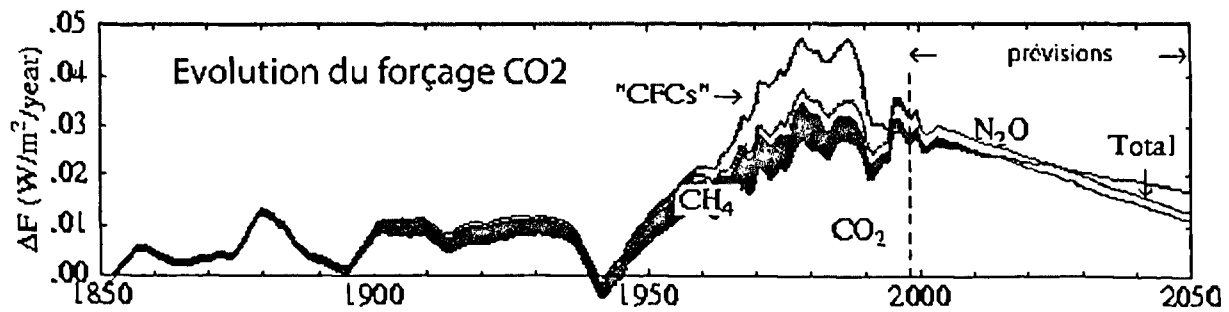


Fig. 15. — Evolution du forçage CO<sub>2</sub> au cours du temps, en prenant en compte les accords de Tokyo et l'évolution de la population mondiale. Source : site web Earth Observatory, NASA.

Fig. 15. — Prediction of the CO<sub>2</sub> forcing for the coming century with respect of the Tokyo agreements and the world population trend. Web site Earth Observatory, NASA.

certitude le coupable étant donné la chaîne des effets rétroactifs. Ce qui est certain, c'est que vers 1947, quand l'épisode de refroidissement temporaire des années 1970 s'est amorcé, la pollution atmosphérique était beaucoup faible qu'à l'heure actuelle; la zone péri-Atlantique Nord où le phénomène s'est maintenu le plus longtemps est en fait une des plus polluées du monde, notamment depuis les années 1970.

L'hétérogénéité du réchauffement actuel ne plaide pas en faveur de la dominance de l'effet de serre : l'Antarctique, notre chef d'orchestre, se refroidit malgré un apport énergétique temporairement accru jusqu'en 2000. Dès que l'irradiance solaire reviendra à un niveau normal, il en sera de nouveau de même pour l'Arctique, dès que le Gulf Stream se ralentira et se refroidira. Le coup de semonce constitué par le refroidissement complexe du Petit Age Glaciaire (1450-1880) a déjà fait basculer les régions arctiques péri-atlantiques en dehors du monde interglaciaire holocène, comme le montrent les enregistrements pédo-sédimentaires identiques à ceux du début de la Dernière Glaciation.

Dans le contexte actuel, l'activité solaire vient de signer un réchauffement du même ordre que celui qui s'est produit au Moyen Age, soit environ 1°C de plus qu'en 1880. Nous sommes loin de l'Optimum Holocène ! La transgression marine associée sera probablement de même grandeur que celle du Dunkerquien III. Ce qui est beaucoup plus vraisemblable, c'est que l'accroissement actuel du gradient thermique interzonal sur l'Atlantique accroît la fréquence et la violence des tempêtes aux 40<sup>èmes</sup> rugissants de l'hémisphère Sud. Mais ceci est également valable pour les 50<sup>èmes</sup> rugissants de l'hémisphère nord, via la migration des anticyclone mobiles polaires, plus puissants et mobiles lorsque le déficit énergétique se creuse sur l'Arctique. Ce réchauffement sera plus ou moins rapidement tamponné par la disparition de la banquise et un ralentissement notoire de la circulation thermohaline, refroidissant par la l'Europe et le surtout le NE de l'Atlantique : l'augmentation actuelle de l'effet de serre doit probablement accélérer cette procédure.

Dans le cas du doublement du CO<sub>2</sub>, il faut s'attendre à un contraste thermique encore plus marqué, au moins pendant quelques dizaines d'années, avec toutes ses conséquences.

Comme les tempêtes sont accompagnées par des précipitations plus abondantes comme en témoignent l'augmentation catastrophique des inondations ces dernières années, les facteur aérosols et albédo (les 10% d'effets non contrôlés par l'effet de serre et l'activité solaire) vont probablement augmenter. Si le réchauffement climatique continue à être dopé par l'effet de serre, le vélage des calottes groenlandaises et antarctiques sera plus précoce, amenant un *Nouveau Dryas*, d'ici une cinquantaine d'années. Si la calotte groenlandaise largue ses icebergs, nous n'aurons plus besoin de mettre des glaçons dans notre whisky !

Comme les précipitations augmentent également en zone arctique atlantique en conformité avec quelques modélisations, il est vraisemblable que cette suite d'événements fera basculer brutalement le contexte de fin d'interglaciaire dans lequel nous sommes actuellement dans un contexte stadiaire, avec formation d'une calotte dans le bassin de Foxe à l'ouest de la Terre de Baffin et sur la Scandinavie déjà refroidie. Ce scénario a été évoqué dès 1993: une issue glaciaire à un scénario chaud. De plus, lorsque le pic d'activité solaire aura été dépassé, le refroidissement de l'Arctique Atlantique masqué temporairement par ce dernier, pourra à nouveau accentuer *le Néoglaciation de l'Atlantique nord* comme le suggère la croissance observée des petits glaciers d'Ellesmere, du Groenland et de Scandinavie pendant la période 1950-1995. La *Grande Sécheresse saharienne* qui s'accroît depuis 1967 va atteindre un niveau de période glaciaire.

## VII. — EPILOGUE

Attention, un Petit Age Glaciaire peut en cacher un autre: après un pic de réchauffement millénaire, va-t-on vers un nouvel épisode du Petit Age Glaciaire ou vers une vraie glaciation ? La calotte Antarctique semble aujourd'hui avoir des velléités de croissance. Les nations développées de l'hémisphère nord sont de grosses consommatrices d'énergie et d'eau : qu'advient-il de leur consommation si le climat se refroidit et s'aridifie : la probabilité est loin d'être nulle, comme nous venons de le voir, de part et d'autre de l'Atlantique ? Qu'advient-il des pays en cours de

développement économique très énergivore et polluant comme la Chine et l'Inde : il serait injuste de leur interdire d'évoluer.

Notre planète a des capacités d'autorégulation remarquables. L'homme, ce grand perturbateur, est un peu présomptueux de croire qu'il va tout modifier. Même si notre interglaciaire joue la prolongation pour un siècle ou deux, c'est en fait, à notre humble échelle, l'érosion des sols, devenue chronique, et la réduction de la recharge des aquifères qui restent et resteront, quoiqu'il advienne du climat, le facteur préoccupant pour le devenir de l'humanité. Quand à la réduction des terres cultivables et à la pollution, conséquences des modifications anthropiques du milieu et du

climat, elles peuvent, à brève échéance, poser plus de problèmes économiques et politiques que le réchauffement potentiel censé faire fondre les calottes polaires et créer un déluge d'origine anthropique. La guerre de l'eau est un phénomène sociétaire cyclique au cours de l'Holocène. La dernière est commencée depuis plus de cinquante ans et si le prochain glaciaire s'annonce, elle risque de durer longtemps.

Cependant, qu'il fasse chaud ou qu'il fasse froid, il est important d'optimiser notre consommation énergétique et de limiter la pollution pour que les générations futures puissent continuer à se développer équitablement. Quant à voir fleurir le maïs en Laponie, il existe d'autres facteurs limitant que la température.

## BIBLIOGRAPHIE

- ABBOT C.G. (1929). — The sun and the welfare of Man. Smithsonian Institution series.
- ARE F.E. (2001). — The problem of the emission of deep-buried gases to the Atmosphere. , in "Permafrost response on economic development, Environmental security and natural Resources" edit.R.Paepe & Melnikov eds, Kluwer. 497-510
- AUZET A.V., BOIFFIN J.,PAPY F.,MAUCORPS J.& OUVRY J.F. (1990). — An approach to the assesment of erosion forms and erosion risk on agricultural land in the northern Paris Basin, France. IN" *Soil erosion on agricultural land*", J.Boardman , D.L.Foster and J.A.Dearing editors, John Wiley & Sons, 383-400.
- BALLIN R.C. (1991). — Impact of desertification on regional and global warming. *Bull.Am.Met.Soc.*, 72, 232-234
- BERGER A. (1991). — Natural factors and/or human effects on climate. Proc.Eurisy Symp.Earth Environ., Vence, 10-11 avril 1991.19-29.
- BERGER A. (1992). — Le climat de la terre. Un passé pour quel avenir? De Boeck Université,
- BROECKER W. (1994). — Massive iceberg discharges as triggers for global climate change. *Nature*, 372, 421-424.
- BURN C. (1992). — Recent ground warming inferred from the temperature in permafrost near Mayo, Yukon, territory. In *Periglacial geomorphology*, J.C. Dixon & D.Abrahams edits., J.Wiley & Sons, Ltd.,327-350.
- COTTON W.R. & PIELKE R.A. (1995). — *Human impacts on weather and climate*. Cambridge University Press, 288p.
- CRUCIFIX M. & LOUÏRE M.F. (2002). — Transient simulations over the last interglacial period (126-115 kyr BP) : feedback and forcing analysis. *Climate Dynamics* (accepted)
- DUPLESSY J.C. & MOREL P. (1990). — Gros temps sur la planète. Odile Jacobs
- FAIRBRIDGE R.W. & SHIRLEY R. (1987). — Prolonged minima and the 179 yr cycle of the solar inertial motion. *Solar Physics*.
- FLOHN H. (1968). — Le temps et le climat. Hachette.253p.
- FRENOT Y., GLOAGUEN J.C., PICOT G., BOUGERES J., BENJAMIN D. (1993). — *Azorella selago* Hook. used to estimate glacier fluctuations and climatic history in the Kerguelen Islands over the last two centuries. *Oecologia* 95:140-144.
- GIEC (1996). — Second rapport d'évaluation du GIEC, Changement climatiques, 1995 OMM-PNUÉ.
- GROUSSET F.E., BISCAYE P.E., REVEL M., PETIT J.R., PYE K., JOUSSAUME S. & JOUZEL J. (1992). — Antarctic (Dome C) ice-core dust at 18 k.y. B.P. : Isotopic constraints on origins. *Earth and Planetary Science Letters*, 111, 1: 175-182
- HOUGHTON J.T., CALLANDER B.A. & VARNEY S.K. (édit) . (1992). — Climate Change 1992. The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment. Cambridge Univ.Press.
- HOUGHTON J.T., JENKINS G.J. & EPHRAUMS J.J. (edit) . (1990). — Climate Change. The IPCC Scientific Assesment. Cambridge Univ.Press.
- JACOBS S.S. (1992). — Is the Antarctic Ice Sheet growing? *Nature*, 360: 29-33.
- JONES P.D. (1990). — Le climat des mille dernières années. *La Recherche*, 21, 219: 304-312
- JOUSSAUME S. (1993). — *Climat d'hier et de demain*, CNRS édit., 141p.
- JOUZEL, J. & LORIEUX C.(1999). — Evolution du climat : du passé récent vers le futur. Comptes Rendus de l' Académie des Sciences, Paris, série IIa., 328,229-239,
- KULLMAN L. (1992). — Orbital forcing and tree-limit history: hypothesis and preliminary interpretation of evidence from Swedish Lapland. *The Holocene* 2, 131-137. .
- KUSTENTSOV A.F. & NESTROV A.N. (2001). — Gas Hydrates in permafrost , in "Permafrost response on economic development, Environmental security and natural Resources" edit.R.Paepe & Melnikov eds, Kluwer. 463-486
- LAMB R. (1984). — Climate and history in northern Europe an elsewhere. IN " *Climatic changes on a yearly to millenial basis*". N.A.Mörner & K.W.Karlen edit., D.Riedel Publ.Comp.Dordrecht, 225-240.
- LE ROY LADURIE E., 1983. *Histoire du climat depuis l'an Mil.* Flammarion éd., Paris, Vol. 1 : 287 p., vol. 2 : 254 p.
- LE TREUT H. , FORICHON M., BOUCHER O. & Z.X. LI . (1998). — Sulfate aerosol indirect effect and CO<sub>2</sub> greenhouse forcing: equilibrium response of the LMD GCM and associated feedback effects. *Journal of Climate* 11, 1673-1684.
- LEFAUCONNIER B. & HAGEN J.O. (1990). — Glaciers and climate in Svalbard: statistical analysis and reconstruction of the Broggerbreen mass balance for the last 77 years. *Annals of Glaciology*, 14: 148-152.
- LENOIR Y. (1992). — *La vérité sur l'effet de serre. Le dossier d'une manipulation planétaire*.Sc. et Soc. Ed. La Découverte, Paris, 173p.

- LEROUX M. (2000). — La dynamique du temps et du climat. Dunod-Masson Sciences.366p.
- MASSON V., VIMEUX F., JOUZEL J., MORGAN V., DELMOTTE M., CIAIS P., HAMMER C., JOHNSEN S., LIPENKOV V.Y., MOSLEY-THOMPSON E. *et al.* (2000). — Holocene Climate Variability in Antarctica Based on 11 Ice-Core Isotopic Records. *Quaternary Research*, 54, 3:348-358
- MAZAUD, F. VIMEUX & JOUZEL J. (2000). — Short fluctuations in Antarctic isotope records: a link with cold events in the North Atlantic? *Earth and Planetary Science Letters*, 177, 3-4: 219-225
- NESJE A. & JOHANNESSEN T. (1992). — What were the primary forcing mechanisms of high frequency Holocene climate and glacier variations? *The Holocene*, 2: 79-84
- NESMES-RIBES E. & THUILLIER G. (2000). — Histoire solaire et climatique. *Ed. Belin-Pour la Science*, 238 p.
- PETIT-MAIRE N., BOUYSSSE P. & 17 COLLAB. (dont Van Vliet-Lanoë B.), (1999). — Cartes CLIMEX 1/33000000 et notice bilingue; CCGM-CGWM et ANDRA edit. , 4 cartes, 1 notice, 55p.
- PETIT-MAIRE N., BOUYSSSE P., DE BEAULIEU J.L., BOULTON G., KERSHAW P., LITSITSYNA O., PARTRIGE T., PFLAUMANN U., SCHULTZ H., SOONS J., VAN VLIET-LANOË B., ZHENG TANG G. (2000). — Geological records of the recent past, a key to the near future world environments. *Episodes*, 23, 4: 230-246
- PIMENTEL D. (editor) (1993). — *World soil erosion and conservation*. Cambridge Univ.Press
- RAPP A. & NYBERG R., (1988). — Mass movements, nivation processes and climatic fluctuations in northern Scandinavian mountains. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 42: 245-253.
- READ J.F. & GOULD W.J. (1992). — Cooling and freshening of the subpolar N. Atlantic Ocean since 1960. *Nature*, 360: 55-57
- SADOURNY R. (1994). — *Le climat de la Terre*. Dominos n°28, Flammarion, 126p.
- SMITH S. J., PITCHER H. AND WIGLEY T. M. L. (2001). — Global and regional anthropogenic sulfur dioxide emissions. *Global and Planetary Change*, 29, 1-2: 99-119 .
- SUFFLING R. (1992). — Climate change and boreal forest fires in Fennoscandia and central Canada. *Catena Suppl* 22: 111-132
- SUGDEN D. (1982). — *Arctic and Antarctic*. Blackwell.
- VAN VLIET-LANOË B. & GUILLOCHEAU F. (1995). — Evolution de l'enregistrement pédosédimentaire depuis 150 ka en France du NO et en Belgique: biorhexistatie et bilans sédimentaires. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, série II a* 320 : 419-426
- VAN VLIET-LANOË B. (1991). — Late glacial and Holocene pedogenesis: the response to the human activities. *Palaeoklimatforschung*, Stuttgart, Spécial ESF, 36: 226-240.
- VAN VLIET-LANOË B. (1992). — Solifluction activity in N-Atlantic Arctic and Subarctic: the microstratigraphical record of changing climate during the second half of the Holocene. *Palaeoklimatforschung*, Stuttgart, Spécial ESF , 6: 279-294.
- VAN VLIET-LANOË B. (1995). — Refroidissement nord-atlantique, érosion des sols et changements climatiques de la fin de l'Holocène. Géoprospective. Unesco. Paris, 17-18 avril 1994, ANDRA,BRGM, Ecole des Mines, UNESCO, 97-106.
- VAN VLIET-LANOË B., FAGNART J.P. , LANGOHR R. & MUNAUT A. (1992). — Evolution écopédologique et morphopédologique du sol lessivé de surface dans les loess d'Europe Occidentale: argumentation stratigraphique et archéologique. *Science du Sol* 30, (2), 75-93.
- VAN VLIET-LANOË B., HELLUIN M., PELLERIN J. & VALADAS B. (1992). — Soil erosion in Western Europe: from the Last Interglacial to the Present. IN "*Past and Present Erosion*", M.Bates & J.Boardman editors., Oxbow. Publ. 101-114.
- WHALEN S.C. & REEDURGH W.S. (1992). — Interannual variations in tundra methane emission: a 4 years time series at fixed sites. *Global biogeochemical cycles*, 6 : 139-159.
- WILLSON, R.C., MORDVINOV A.V. (2003). — , Secular total solar irradiance trend during solar cycles 21–23, *Geophysical Research Letters*, Vol. 30, No. 5, 1199
- YBERT J.P., MARESCHI BISSA W., CATHARINO E.L.M., KUTNER M. (2003). — Environmental and sea-level variations on the southeastern brazilian coast during the Late Holocene with comments on prehistoric human occupation. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989 : 11-24



## LES MARBRES DU NORD DE LA FRANCE ET DU BOULONNAIS

par Eric GROESSENS (\*)

*Résumé.* — L'industrie de la pierre dans l'Avesnois remonte à l'occupation romaine, par contre, le début de l'industrie marbrière et de bimbelerie est contemporain du tracé définitif des frontières entre la France et la Belgique et de l'instauration d'une politique protectionniste. Les marbres du Nord et du Boulonnais sont des calcaires durs dévono-carbonifère de teinte généralement foncée, noirs ou parfois rouges. Les pierres et marbres du Nord étaient d'usage généralement local. Les produits fins, comme les cheminées, ont cependant été commercialisés dans toute la France. Les produits de bimbelerie, et surtout les pendules ont, par contre été largement exportés dans les colonies anglaises et jusqu'aux Etats Unis. L'apogée de cette industrie se situe au cours de la seconde moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle. L'industrie pendulière a pratiquement disparu avant la Grande Guerre alors que la pierre de taille se maintient pendant quelques décennies. Un inventaire des principales variétés de marbres est réalisé. L'industrie marbrière dans le Boulonnais s'est développée parallèlement à la construction de la Colonne de la Grande Armée. Cette industrie est toujours fort prospère et ses débouchés sont universels.

*Abstract.* — *The origin of the stone industry in Northern France goes back as far as the Roman occupation. The marble industry started after the Belgian independance when the protection laws hindered the trade of manufactured marble pieces. The marbles works were now located mainly on the Belgian side (Rance, Barbançon etc) whereas the main costummers were in Paris. Many marble works moved to the other side of the frontier. All the limestones polished as marble are generally black or red in color. The stone industry was mainly a local business whereas the marble furniture, as the chimneys, were sold all over the country and the marble-clock industry was international, selling mainly in Britain and its Empire and in the States. The marble industry in the Boulonnais started with the erection of the Napoleon column at Boulogne-sur-Mer and is still very active nowadays.*

### I. — INTRODUCTION

Lorsque l'on examine la Carte géologique de France on constate que dans la partie septentrionale de celle-ci, entre le Bassin de Paris et la frontière belge affleurent un certain nombre de formations qui sur la carte tranchent par leur coloration plus foncée. Ce sont les roches du Paléozoïque. D'ouest en est, nous voyons d'abord la boutonnière du Boulonnais où affleurent, essentiellement dans des carrières, des formations dont l'âge va du Givétien au Westphalien. Puis au nord de Bavais, le Dévonien apparaît dans les vallées de l'Hogneau et des Honnelles. Plus au sud, l'Avesnois avec sa succession d'anticlinaux et de synclinaux dévono-carbonifères qui ont engendré la diversité des paysages caractéristiques de cette région. Viennent ensuite les massifs de Rocroi et de Givonne, avec leur cortège de formation du Paléozoïque inférieur, interrompu par le synclinal de Neufchâteau qu'occupent des formations terrigènes du Dévonien inférieur. De plus, il faut y ajouter une incursion dans la botte de Givet.

Notre propos se limite géographiquement aux régions marbrières et se déroule également dans le temps. Les temps géologiques évidemment; les marbres traités concernent tous

le Dévono-Carbonifère, c'est à dire l'intervalle de 50 millions d'années qui se situe entre 380 et 330 millions d'années. Temps historiques aussi, puisque nous nous attachons à une région frontalière, avec une frontière éminemment variée et par conséquent des industriels qui en quelques années changent de nationalité et de régime fiscal. La défaite de Waterloo a rompu certains courants commerciaux ce qui a eut des répercussions funestes sur l'activité industrielle dans la région. Les écrits de la période post-napoléonienne sont d'un lyrisme désuet et témoignent des difficultés économiques de l'époque: « L'unique voeu du Chevalier Quivy, maître-marbrier à Maubeuge, est que la France, par vos soins (la Société d'Encouragement ) soit promptement délivrée du tribut étranger auquel elle est asservie, convaincu que notre belle patrie saura, comme Athènes, imprimer sur ses marbres le génie de ces habitants, et transmettre aux siècles futurs les témoignages de sa gloire » ou encore on décerne en 1823, une médaille d'argent au baron Morel « ce brave et digne militaire, qui après avoir honorablement servi sa patrie, emploie aujourd'hui les débris de sa fortune et les loisirs de sa retraite, a nous affranchir du tribut auquel nous avait asservis envers l'étranger notre indifférence à profiter de nos richesses minérales. ». Ce coté anecdotique ne doit cependant pas nous

faire oublier que lors de la crise économique de 1847-48, il y eut dans le Nord, comme le rapporte Heuclin(1980), de nombreuses manifestations anti-belges et des émeutes ont éclaté en Avesnois, faisant entre autre 12 morts à Trélon, sans que l'auteur ne sache si cela avait un rapport avec l'industrie marbrière.

Rappelons que le terme « marbre » employé dans ce texte, désigne, non pas des calcaires ou dolomies métamorphiques, mais uniquement des calcaires durs, d'origine sédimentaire et plus précisément marine, qui allient un aspect agréable à la possibilité de prendre un beau poli et d'être utilisé en décoration.

## II. — L'AVESNOIS

A la fin du XVIIIème siècle, la région de Rance, Barbençon, Cousolre et Etroeungt était un centre marbrier important. J'ai traité ailleurs de l'importance de l'industrie marbrière de Rance et de ses apports, entre autre à l'agrandissement du Château de Versailles.(Groessens, 1992). Mais Rance, bien qu'étant probablement la plus ancienne et la plus importante localité marbrière, n'était pas unique dans la région.

Au XVIIème siècle Guicciardin précisait qu'on trouvait en Hainaut « de très belles carrières de pierres très propres à bastir et à mettre en besogne et toute sorte d'ouvrage : voire y trouve t-on jusqu'à la *Pierre de touche* et de *paragon* que les anciens ont nommé *Index*. L'Encyclopédie de De Felice (1773) nous livre une liste des marbres exploités à cette époque. Pour la «Flandre», il cite les marbres noir de *Dinant* et *Namur*, les rouges de *Charlemont*, de *Rance*, *Gochenet* (=Gochenée), le *Givet*, le *Brabançon* (=Barbençon), le *Groschou* (?), le *Gravelle* (il existe des lieux-dit Gravelle(s) dans le Département du Nord) et «celui que l'on nomme *Caisle* » (?).

Il cite également le *Florence* «en Hainaut» (?), *Loff* (=Leffe), *Solre-Saint-Géry*, ou *Pacagne*, *Renlies*, *Clermont*, *Strée*, *Franchimont*, *S.Remy* (=Rochefort), de *Dourlers* (=Dourlers), de *Liessies*, de *Trefon* (=Trélon) de *Fontaine-l'Evêque*, de *Cerfontaine*, de *Graudrieux* (=Grandrieu) de *Fil-Baudouin* (Thy-le-Bauduin) et de *Ogimont* (= Agimont). Pour les régions qui nous intéressent, il ne cite que *Dourlers*, *Liessies* et *Trélon*. Par contre, aucune mention de *Boulogne*.

Heuclin (1980) rapporte que quelques années plus tard, en 1787, le chapitre de Maubeuge accorde à Maximilien Lecat, pour 3 ans, l'exploitation d'une carrière à Cousolre et quelques mois plus tard, il concède l'exploitation d'une autre carrière aux sieurs Durieux et Boise «le long de la pied sente de Coulmie».

En 1798, le citoyen Friand, maître de carrière à Renlies, acheta un bâtiment de Cousolre, qui servait à la fabrication du genièvre, et le transforma en scierie de marbre. Mais les temps sont difficiles. Ainsi, le préfet Dieudonné (1804) écrit dans un rapport : « Chaque ménage à son occupation. Les chefs de familles et les jeunes gens travaillaient à diverses sortes d'ouvrages et y excellaient. Les vieillards sciaient et les femmes polissaient. Malheureusement les ravages de la guerre, les saccages de la Révolution qui ont fait disparaître les objets de luxe, ont plongé ce pays dans la plus profonde

misère. A peine y compte-t-on une centaine d'ouvriers marbriers. Des jeunes gens qui s'étaient adonnés au dessin, à la sculpture, ont été forcés d'abandonner leur premier état et de travailler dans les forêts pour alimenter leur triste existence. S'il en est un petit nombre qui aient continué l'exercice de la profession, ils trouvent difficilement à se défaire de leurs ouvrages, rarement on leur en commande, le désœuvrement et la crainte de perdre leurs talents sont les principaux motifs qui les déterminent à en confectionner... »

On comprend aisément qu'au début du XIXème siècle, la plupart des établissements de la région étaient ruinés.

En 1793, le Hainaut avait été intégré en France et les barrières douanières abolies avec la République. A la chute de l'Empire, des cantons entiers changeront régulièrement de nationalité. Rance, par exemple, rattaché à la France lors du premier traité de Paris (1814), est récupéré par le Royaume de Pays-Bas après les Cents-Jours. Les limites définitives ne seront fixées que le 28 mars 1820 par le Traité de Courtrai. Pour rappel, Napoléon III essayera, dès 1868, de récupérer l'ensemble ou une partie de la Belgique pour l'inclure dans son empire. Pour calmer l'empereur, le gouvernement de Vienne lança l'idée d'une cession du Grand-duché de Luxembourg à la Belgique moyennant l'abandon par celle-ci à la France des cantons de Philippeville et de Mariembourg.

Après ce détour par la grande Histoire, revenons en aux conséquences sur l'industrie marbrière déjà mise à mal par la Révolution et l'Empire. Les frontières étant rétablies, les douanes françaises imposèrent des droits d'entrée de respectivement 3 fr./100 Kg de marbres bruts en blocs; de 5 fr. pour les marbres sciés et de 44 fr. pour 100 Kg de marbres ouvrés. Cette augmentation de 41 fr./Kg entre la matière brute et la matière ouvrée représentait la fermeture de la frontière à la marbrerie belge travaillée. La doctrine du directeur de la douane était « d'acheter aux autres le moins possible et de leur vendre le plus possible ». Il faut ajouter que le commerce du marbre se fait à cette époque, à partir de Paris. C'est suite à ces conditions que la plupart des marbriers de la frontière belge vinrent s'établir en Avesnois. Le choix de cette région était dicté par la proximité des carrières, de la route Philippeville-Valenciennes et de cours d'eau qui permettaient d'établir des usines à scier le marbre. Ainsi s'établirent à Cousolre, les Rochez et Boucneau de Rance, Bien-Aimé de Barbençon, et d'autres marbriers, parmi lesquels, Wallerand, Herbecq, Maton, les Beaugrand de Solre-Saint-Géry, etc. Notons qu'au départ, ils installent uniquement des scieries et non des ateliers. On peut supposer que les carrières de Sainte-Anne de Cousolre avaient repris leur activité.

Que trouve t'on comme marbre dans la région au début du XIXème siècle ?

Brard (1808) cite pour le département du Nord : les *Marbres de Rancé* (rouge-brun), *Barbançon* (noir veiné de blanc), *Clermont* (gris cendré-clair, joint à une légère nuance de violet et mêlé de taches noires, de veines blanches et aurores), de *Trélon* (rouge et jaunâtre), *Grandrieux* (gris, noir, et présente des veines blanches), et les marbres brèches de *Dourlers* et de *Etroeungt-la-Rouillie* (morceaux de marbre verdâtres et cendrés). Sous la dernière rubrique, il ajoute qu'il s'en trouve encore beaucoup d'autres dans le département du Nord, tels que celui de *Estrées*, qui ressemble beaucoup à celui de Clermont et un autre à *Liessies* qui ressemble un peu au *marbre de Rance*). Dans son édition de 1821, il ajoute

bizarrement que le Marbre de Rance « est connu dans le pays sous le nom de *Pierre d'Avesnes*. » et il orthographie « *Trolong* » (note : la célèbre Pierre d'Avesnes(-le-Sec) est une craie dure, blanc grisâtre, d'âge Turonien, et exploitée depuis des siècles dans le Cambrasis)

Pour le département des Ardennes, il cite le marbre noir, veiné de blanc de *Givet* et deux marbres rouges (*Givet* et *Charlemont*, qui sont peut-être les mêmes). Il cite aussi les rouges de *Franchimont* et de *Cerfontaine*, et enfin celui de Charleville, ce qui ne peut être qu'une erreur.

Héricart de Thury (1823) dans son rapport sur l'état actuel (sic) des carrières de marbre de France, et qui pour certains chapitres pourrait être qualifié de pamphlet anti-marbres belges, donne une liste de 12 variétés de marbres dans le département du Nord. Outre qu'il reprend l'assimilation de la *Pierre d'Avesnes* avec le *marbre de Rance*, la moitié des marbres repris dans sa liste proviennent de carrières situées dans le Royaume des Pays-Bas (version 1815-1830). Ainsi, outre *Rance*, nous trouvons *Barbançon*, *Clermont* (La Pacagne), *Grandrieux* (2X), et *Fontaine-l'Evêque* (*Rouge de Fontaine*). Parmi ceux localisés dans le département à la date de publication, nous trouvons le *marbre de Trélong*, les *brèches de Dourlers* et *d'Etroeungt*, et le *Sainte-Anne*, qui n'avait pas été mentionné par Brard. Il cite trois localités pour le *Sainte-Anne* : Honhergie, Ferrière-la-Petite et Maubeuge et le définit, comme le *Grandrieux* (*gris, noir et blanc*).

En ce qui concerne le département des Ardennes, il cite les mêmes que Brard mais en oubliant que *Franchimont* et *Cerfontaine* sont maintenant en Belgique. Par contre, il cite le *marbre de la Folie Cassan*, exploité à Montcy-Notre-Dames-Bois près de Mézières. Dans le texte, il parle de la découverte récente de marbres « très variés et de la plus grande beauté » à Moncy et à la Folie-Cassan (?) Cette information pousse à la curiosité car la région est située dans les formations essentiellement terrigènes du Dévonien inférieur (Praguien). Héricart nous livre une longue description dont nous retiendrons, qu'ils sont noir ou noirâtre à veines blanches plus ou moins régulières. « Ces marbres, qui ont une certaine analogie avec le *tigre-chou de Flandre* (?) ou avec ceux de la *Mayenne*, et même parfois avec le *grand antique* à fond noir, se rapprochent dans quelques parties au *Sainte-Anne* à grandes veines, et dans quelques autres, du *Peschagnard* de l'Isère ou du Bourbonnais à fond noirâtre ; mais ils sont distingués de ces différents marbres par de beaux fossiles (n.d.l.r. des orthocères) (...) ». Voyons si nous trouvons d'autres références au sujet de ces marbres. Dumont (1848) écrit que « Le calcaire est rarement en masse considérable (dans le Praguien). Dans l'Ardenne et le Condros, ces masses n'ont jamais plus de 12 mètres d'épaisseur (Montcy-Notre-Dame)... On l'exploite pour faire de la chaux ; on a voulu employer comme marbre celui de Montcy-Notre-Dame. Gosselet (1888) signale, plus au Nord, du côté de Mouzon, le long du ruisseau de Maidimont, « des traces d'un four à chaux établi près d'un banc de calcaire encrinétique un peu plus épais que les autres ». Il ne fait aucune mention de marbre à Montcy.

Après cette digression, revenons en à la politique protectionniste, pour constater qu'elle se maintiendra longtemps. Le Duc de Castries (1972) écrit en effet : « La vie économique sous la monarchie de juillet est en grande partie conditionnée par le régime douanier ; le blocus continental de

l'Empire a habitué les Français au protectionnisme ; malgré les critiques, la Restauration l'a maintenu dans les grandes lignes et, à l'étonnement des économistes, Louis-Philippe et ses divers gouvernements y resteront fidèles. Dans cette attitude se révèle une constante due à des préjugés, survivances d'ancien régime, mais adaptées à la mutation sociale. »

Les différentes tentatives de changement se révéleront sans lendemain. En 1828, suite à l'enquête économique menée par le comte d'Argout « les méfaits du protectionnisme avaient été dénoncés : stagnation des activités économiques, immobilité des capitaux, insuffisance des moyens de communications, vie rétrécie par les représailles exercées par les Etats voisins contre les garanties douanières. »

Le succès du « Zollverein », union douanière tentée en 1835 dans une partie des Etats allemands donna à réfléchir. Quelques années plus tard, l'idée d'une union douanière franco-belge fut proposée, mais devant l'émoi provoqué dans le monde français des affaires, l'idée fut abandonnée. Elle fut reprise d'une manière plus restreinte en 1842 sous la forme d'une convention douanière ; mais on renonça aussi à ce projet.

Comme conclut le Duc de Castries « On peut donc juger qu'en dépit de quelques atténuations de détail, le protectionnisme fut maintenu pendant toute la durée du règne (de Louis-Philippe), mais fut corrigé par une contrebande discrètement tolérée » et comme l'écrit J. Heuclin (1980) : « la succession de ces lois protectionnistes par leur nombre même, prouve leur inefficacité, et pour la période 1815-1830 la balance commerciale de la France fut le plus souvent déficitaire. En 1825, nous constatons que les Pays-Bas sont les 3<sup>ème</sup> clients de la France et les premiers de nos fournisseurs. »

Parler de l'industrie marbrière au début du XIX<sup>ème</sup> siècle c'est essayer de comprendre une réalité très différente de la nôtre. Comme l'écrit Heuclin (1980), « dans les villages, l'activité agricole et industrielle sont étroitement imbriquées. Le menuisier, le charron, le marbrier est en même temps cultivateur pour son compte. Le système de la « fabrique » encourage d'ailleurs cette industrie à domicile. Le « fabricant » est un gros négociant qui distribue la matière première à des centaines d'ouvriers paysans et recueille ensuite les produits qu'ils ont façonnés suivant les spécifications qu'on leur a données. Parfois d'ailleurs le fabricant vend ou loue à l'ouvrier la machine ou les instruments nécessaires. »

En 1830, on comptait à Cousolre 3 grands ateliers, fondés par des Belges, et près d'une dizaine de petits. On confectionne surtout des cheminées, essentiellement en marbres belges : *marbres noirs de Dinant*, *rouges de Franchimont*, « *Brayelle* » de Barbançon etc. Ils emploient 300 ouvriers dont la moitié sont des Belges qui viennent travailler à la journée ou à la semaine. A partir de 1840, Cousolre de centre d'extraction et de sciage va devenir un centre où le marbre est travaillé. A la fabrication de cheminées simples, va s'ajouter celles à *colonnes* et même en style Louis XV. Parallèlement, comme à Rance, l'industrie pendulière se développe et est orientée vers Paris. En 1850, il y avait à Cousolre 6 carrières actives et plus de mille ouvriers marbriers. L'industrie marbrière est cependant contrôlée à

80% par des fabricants parisiens qui imposent leurs modèles, passent les commandes et se chargent de l'écoulement de la production. (J. Heuclin, 1980).

Avec le Second Empire, Cousolre connaît sa dernière phase de croissance : de nouvelles carrières sont mises en activités, de nouveaux ateliers s'implantent, de nouvelles variétés de marbre sont importées ( le *Petit granit de Soignies* à partir de 1869) et les effectifs ouvriers marbriers progressent de 25% environ. Cousolre s'est entre-temps transformé d'un village de 600 habitants en 1825, en une agglomération de 2300 âmes. A partir de 1860, quelques marbres de couleurs (entre autres, l'onyx d'Algérie) et des formes de pendules nouvelles apparaissent, séduisant les commissionnaires qui viennent acheter pour l'exportation vers l'Angleterre (Napoléon III vient de signer un traité de commerce avec ce pays).

Avant 1914, les artisans de la pendule et de la bimbeloterie expédiaient les 3/5ème de la production vers l'Angleterre et son Empire, 1/5 vers les Amériques et le reste sur Paris. La prospérité a une fin et vers 1910, Cousolre voit disparaître les dernières carrières – épuisement, absence de débouché, trop faible rentabilité. Rien n'est certain écrit J. Heuclin, mais la population a déjà diminué de 50 personnes. Par ailleurs certains ateliers se trouvent dans une situation financière difficile. La Belle Epoque s'achevait, prélude à l'effroyable guerre de 4 ans. Les marbreries ferment leurs portes, les mobilisés prennent le chemin de la gare quant aux civils, ils prennent la route de Paris. Certains y trouvèrent du travail et y demeurèrent.

### III. — LES MARBRES DES VALLÉES DE L'HOGNEAU ET DES HONNELLES.

Comme toujours, il est difficile de situer dans le temps les premières carrières. Les Romains ont certainement exploité de la pierre dans ces vallées, en vue de construire la ville romaine de Bavai. J'ai personnellement rencontré à plusieurs reprises des fragments de pavement et des mosaïques en Rouge belge et en « Noir français » de cette région.

La Cour-Le-Roi, à Compiègne, qui date de l'époque carolingienne, recèle un certain nombre de marbres de qualité et de coloris variés (Petitjean, 1994) « Le marbre blanc provient de l'Apennin, des Cyclades et de la haute vallée de la Garonne. Le marbre coloré est extrait de *Chemtou* (Tunisie), de *Laconie* (Grèce – pour le *porphyre vert*), de *Philippeville*, d'*Eubée* (Grèce –pour le cipolin) et des Pyrénées pour la *griotte*. Le *marbre noir* est tiré des carrières proches de *Bavai*, puis vraisemblablement de la vallée de l'Escaut.) Les zones de production des roches nobles, exploitées au Haut Moyen-Age sont peu connues. Il n'est pas possible de déterminer si les marbres issus de la fouille de Compiègne furent extraits dans des carrières contemporaines, ou si ils furent récupérés dans des bâtiments gallo-romains ». Si l'exploitation était contemporaine, se serait la première trace de ce type d'activité depuis la chute de l'empire romain, dans nos régions.

Pour le Moyen-âge, Salamagne (1992) localise, outre les carrières locales situées autour des différentes villes de Valenciennes, Cambrai, le Quesnoy et Avesnes, deux centres producteurs de pierre pour le sud du Hainaut, celui de

l'Ostrevant (pierre blanche et grès), et celui de l'Avesnois dans l'est du comté (pierre bleue). « L'ouest du Hainaut comme le Douaisis, bénéficiaient encore de l'apport d'autres bassins carriers, celui de Tournai-Antoing au XII-XIVème siècle, celui d'Ecaussinnes à partir du XIVème siècle. Cet apport de pierres de bassins carriers distants de plus de 40 km. fut en fait permis par l'utilisation des voies d'eau, l'Escaut et la Scarpe pour l'exportation de la *pierre de Tournai* à Valenciennes et Douai, la Haine et l'Escaut pour l'exportation de la *pierre d'Ecaussinnes* à Valenciennes où elle était déchargée pour être convoyée par voie de terre jusqu'au Quesnoy. »

Ce sont surtout les applications qui nous permettent de connaître l'ancienneté de certaines carrières. Bettignies, l'ancien presbytère, de style Renaissance, porte une pierre décorée d'un ciboire et qui est datée de 1559.

Les registres communaux de Bellignies de l'époque révolutionnaire, mentionnent l'état-civil et la profession dès 1780. Des « chauffourier » et des tailleurs de pierres se retrouvent dans ces listes alors qu'il faut attendre 1823 pour voir apparaître la profession de « marbrier ». De même, sous la Révolution les registres de l'Avesnois font état de 34 carrières de pierre de taille (Hon-Hergies, Gussignies, Houdain etc) et de 82 carrières de moellons. « Progressivement de 1815 à 1848 l'industrie marbrière va s'implanter solidement dans la vallée de l'Hogneau. Ce sera d'abord de petites scieries à bras ou avec des chassis à 4 lames, elles s'installent souvent à l'emplacement des moulins et plus tard de forges abandonnées. La force motrice s'imposant, les armures comptent d'avantage de lames métalliques parallèles.(...) Une scierie s'installe en 1820 à Saint-Waast-la-Vallée ; une autre en 1822 à Gussignies et vers 1830 à Houdain. Bellignies va bénéficier du développement de l'industrie et dès 1835 les actes d'état-civil indiquent de plus en plus de professions se rattachant au travail du marbre : Scieur, marbrier, polisseur... Ils sont en général nés en Belgique. A cette époque où le machinisme en est à ses balbutiements va se créer dans toute la vallée un artisanat familial à domicile qui se prolongera pendant plus de cinquante ans. Les hommes pratiquent le découpage à l'épave, taillent et usent le marbre avec des moyens encore primitifs : burins, gravelots, percent les pièces à l'aide de l'archet. Ils fabriquent eux-même les instruments nécessaires pour travailler et adoucir. Les femmes, les enfants polissent, à la main ce qui demande beaucoup de temps, de patience, d'esprit d'initiative et d'observation. Le polissage nécessite de nombreuses opérations : emploi de quatre sortes de pierres de plus en plus tendres, du bouchon de bois, d'acide oxalique, démeri à adoucir, de produits divers, dont chacun gardait un peu le secret, appliqués en frottant avec énergie pour faire disparaître la petite aspérité, venait enfin la cire d'abeille imbibée d'essence de térébenthine pour obtenir un brillant durable. Les marbres noirs extraits des carrières de Hon-Hergies sont particulièrement difficiles à polir et demandent une grande expérience.»(Duronsoy, 1979)

En 1836, on compte à Hon-Hergies, 7 carrières de pierre bleue, 5 carrières de marbre, 5 fours à chaux et une scierie. La production est semblable à celle que nous avons mentionnée à Cousolre. A partir de l'arrivée de la voie ferrée dans la 3ème quart du XIXème siècle, les variétés de marbres aux teintes plus chaudes vont se décupler et la production sera écoulée plus aisément, mais toujours via Paris et sans atteindre celle de Cousolre. Ici, aussi l'industrie connaîtra sa période faste



sous la 3<sup>ème</sup> république. Au tournant du siècle, toutes les communes de la région ne travaillent plus que pour le marbre. En consultant les registres d'état-civil, il apparaît nettement que la profession avec ses scieurs, marbriers, polisseurs, ciseleurs, graveurs, sculpteur forme plus des 9/10<sup>èmes</sup> de la population.

Au cours de la Première Guerre Mondiale, toute activité cesse, mais elles reprendront très rapidement à la fin des hostilités. Dès 1927, la reconstruction s'achève et déjà pointe la Grande Crise des années 30. Les exportations vers les Etats-Unis et l'Angleterre cessent brusquement et chômage réapparaît. Contrairement à la fin de la guerre précédente il n'y aura pas de reprise importante et les ouvriers vont s'orienter vers la métallurgie. Quelques entreprises vont essayer de relancer la marbrerie...

Quant aux variétés de marbres ou pierres de tailles exploitées, la description détaillée des affleurements des terrains dévoniens dans les environs de Bavais par Ladière (1905) est un outil incontournable. On peut en extraire les informations concernant les bancs marbriers essentiellement datés du Givétien.

A la bas nous avons les « couches de Hon-Hergies » dans lesquelles ont distingué particulièrement le *Sainte-Anne d'Hergies* ou de *Hon* appelé aussi parfois *Sainte-Anne français* (Ce qui porte à confusion avec le *Cousolre*, le *Sainte-Anne de Trélon*, de *Rancennes* etc), calcaire grisâtre compact, d'une dizaine de mètres d'épaisseur, pétri de stromatopores et de coraux disposés pèle-mêle et traversé en tous sens de veinules de calcite. Au-dessus, il y a d'autres bancs de calcaire bleuâtre avec veines et noyaux de calcite et de fossiles. Le *Sainte-Anne* repose sur des schistes et calcaires argileux à calcéoles. D'après Dumon (1959), il aurait été exploité jusqu'en 1955.

Au-dessus, nous avons les couches d'Hergies, d'Autrepepe, de Gussignies formées d'un certain nombre de bancs, généralement noirâtre et qui portent parfois des noms qui les individualisent : le *Radoga* à géodes de calcite ; le *poil d'herbes* (bleuâtre) et le *Coquiller de Gussignies* (noir) à bellerophons et stringocéphales ; le *Saint-Vincent*, gris à polypiers et stromatopores ; les *Noirs à Amandes* (lucines) ; le *banc à Fontaines* (noyaux de pyrite) ; la *litée de Huit pieds* à géodes de calcite (*boules-de-neige*), à murchisonies (le *Fleuri* ou *Blondeau*). La carrière *Blondeau*, ou Grande carrière d'Hergies, était déjà exploitée depuis longtemps. Guéttard et Monnet (1780) en font grand cas : « Cette vaste exploitation, l'emporte sur toutes les autres par la grandeur et la solidité des bancs et la bonté des pierres qu'on en tire. Les ouvriers peuvent tailler toutes celles qu'ils rencontrent, ils en font tout ce qu'ils veulent, surtout des chambranles de cheminées, des bancs, des marches d'escaliers. Cette carrière est une des plus grandes et des plus vastes que j'ai vues dans ma vie, ajoute M. Monet. J'y ai compté plus de vingt bancs, tous de bonne qualité. »

Un autre marbre, riche en murchisonies, stringocéphales et bellerophons est cité comme *Marbre de Bousois*.

Ces marbres sont désignés sous l'appellation plus générale de *Marbre noir français* ou *Bavay*. Rappelons que les marbriers continuent à importer des marbres noirs de Belgique, dont la granulométrie est nettement plus fine (Dinant, Denée, Golzinne) pour la confection des pendules et

la bimbeloterie en général. Il s'ensuit une certaine confusion dans la nomenclature, d'autant que la détermination de la provenance d'un marbre noir pur est des plus difficile, surtout sur base du seul examen visuel.

Le *marbre de Glageon*, est décrit par Sancholle(1850) comme présentant une grande analogie avec le *Sainte-Anne français* de la région de Bavay, mais il a le fond plus noir, et le mélange plus petit. Il renferme beaucoup de parties terreuses qui nuisent considérablement au poli. Il ajoute « La consommation des marbres du département du Nord est assez forte à Paris, parce qu'elle est provoquée par la modicité de son prix ; mais son emploi ne repose que sur les objets les plus ordinaires. »

La coupe du Givétien de la carrière de Glageon a fait récemment l'objet d'une étude détaillée (Boulvain *et al*, 1995) De nombreux autres marbres noirâtres plus ou moins semblables aux précédents ont été exploités dans de petites carrières, mais leur énumération serait fastidieuse. Revenons cependant, sur deux variétés déjà mentionnées : le *Sainte-Anne de Trélon* et celui de *Rancennes* au Sud de Givet, qui sont des lumachelles de stringocéphales.

Le Frasnien était exploité dans la Carrière Lucq à Saint-Waast. On y trouvait du *Noir veiné*, du *Noirs moucheté*, du *Noirs uni*, du *Noir rubanné* etc., du *Poil d'herbe*, du *Saint-Waast* à petites veines de calcite et grands gastéropodes, l'*Oeil de Perdrix* à petits points blancs, un *Grand Antique* avec ses grandes veines de calcite etc.

#### IV. — D'AUTRES MARBRES FRASNIENS

Nous avons déjà longuement parlé de l'histoire de *Cousolre*.

Le *Marbre Sainte-Anne* était exploité depuis longtemps à Solre-Saint-Géry, Gerpennes, Gougnies, Biesme et Labuissière, près de Merbes-le-Château. Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, plusieurs de ces communes possèdent une industrie de transformation du marbre basée sur la force hydraulique des moulins. Les carrières Puissant de Labuissière sont le point de départ de ce qui deviendra un véritable empire marbrier à l'échelle mondiale, car « Merbes-Sprimont » étendra ses activités en Belgique, en France (Jeumont, Gussignies, Fresnes sur Escaut, Glandieu, Marseille, Vitrolles, Sain-Maximin, Brignoles, etc) en Italie, au Portugal et même en Algérie (*l'Onyx d'Ain-Smara*). Elle avait en outre, pris le contrôle de la S.A. des Marbres Français et des Marbres du Boulonnais. Le *marbre Sainte-Anne* provient de biostromes frasnien d'épaisseur variable, avec un maximum d'une cinquantaine de mètres (Barbençon et Renlies). C'est un calcaire gris-noir à larges efflorescences blanches et jaunes de calcite. Ce fleurage si particulier résulte de sections diversement orientées des organismes constructeurs qui le composent et où prédominent les stromatopores, des polypiers et des algues. De magnifiques exemples d'autels en marbre *Sainte-Anne* sont visible dans l'église de Glageon.

Stratigraphiquement, après l'envasement des biostromes de *Sainte-Anne*, s'établit une nouvelle frange récifale (*Marbre de Cousolre* ou *d'Hestrud*). Celle-ci est constituée d'un calcaire gris, généralement plus clair à taches rouille et quelques taches et veinules blanches de calcite plus ou moins

riche en stromatopores lamellaires et polypiers. L'ensemble dont l'épaisseur n'est que de 6 à 7 m. à Cousolre, est nettement rubané et plus terrasseux que le Sainte-Anne.

Localement, le biostrome est couronné par des formations lenticulaires constituées soit de marbre rouge à *Phillipsastrea*, soit de calcaire à stromatopores (Beugnies *et al*, 1963)

Au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, le m<sup>3</sup> de Sainte-Anne se vendait à Paris, 640 à 700 Frs alors que le Cousolre se négociait de 440 à 460 Fr. (Sancholle, 1850)

En ce qui concerne l'exploitation du marbre rouge du Frasnien, nous avons déjà signalé que *Givet*, *Charlemont* étaient régulièrement cités depuis le XVIII<sup>ème</sup> siècle. Nous pouvons y ajouter *Fromelennes*. Rappelons également que durant son exil, le Comte de Paris occupait le château d'Agimont, construit sur un monticule de marbre rouge. Ces gisements, font partie des dizaines de récifs distribués régulièrement au sein des schistes du Frasnien terminal de la bordure méridionale du synclinorium de Dinant.

Jennepin (1900) cite l'exploitation du mud-mound de *Jeumont*, au compte personnel du Prince de Ligne, en 1790-1791, mais abandonné depuis. Plus près de Maubeuge, à Recquignies, Beugnies *et al*, (1963) signale un autre récif de marbre rouge, mais il n'aurait que 6,5 m d'épaisseur.

Un marbre rouge a été exploité à Surmont, près de la gare de Trélon ; trois autres récifs, à peu de distance l'un de l'autre sont connu à Château-Gaillard, au N.-E. de Trélon et dont Lecompte (1936) écrit que deux ont été exploités. Le troisième, de quelques mètres seulement de diamètre, est décrit par Lecompte à quelque 200 m au sud des deux autres et dénommé « petit récif du bois du Terne Godeau. A Wallers, une très ancienne carrière a entamé un petit mamelon, dénommé « Récif des Roliveaux » (Lecompte, 1936). Le même auteur, signale divers affleurements et deux excavations dans des calcaires crinoïdiques rosé et rouge très fossilifère dans les « monts de Wallers-Baives ». Aucune indication n'est connue quant à des usages en marbrerie de ces calcaires rouges. On trouve également dans la littérature la mention de *marbre de Liessie*. Il ne semble pas y avoir de mud-mound de marbre rouge dans cette localité, mais il est possible que comme dans le cas de Waulsort, par exemple, l'abbaye exploite un gisement. Rappelons à ce sujet l'anecdote rapportée par Ducarme (1957) : Des colonnes de marbre de Rance, extraites et préparées dans le pays pour la chapelle de Versailles, ne purent y être transportées et les religieux de l'Abbaye de Liessie les firent servir à la décoration de leur église. C'est des débris de cet édifice que les tira Talleyrand à l'époque où il transforma l'ancien château de Pont de Sains en maison de campagne. Ducarme nous apprend que ces magnifiques colonnes ont été acquises après 1914, par des antiquaires et ont pris le chemin de l'Amérique pour décorer le domaine d'un milliardaire.

Ici aussi, il faut rappeler que les gisements de marbre rouge « belges », célèbre depuis des lustres sont très proche et approvisionnaient les ateliers en marbre brut. Le gisement de la Haie des Saules, bien que situé à Leugnies, en Belgique, n'était qu'un hameau de Cousolre. Il en est de même pour Solre-Saint-Géry, Grandrieu, Renlies, Barbençon et Rance qui ne sont qu'à quelques kilomètres à l'intérieur des frontières belges.

## V. — LES MARBRES DU DINANTIEN

Au sud du beau village de Marbaix, « on trouve des carrières considérables, ou plutôt une longue série de carrières ouvertes sur l'affleurement des couches du calcaire carbonifère, et qui sont célèbre depuis longtemps comme fournissant des pierres de taille qu'on transporte jusqu'à une grande distance... Le calcaire a généralement la teinte d'un noir bleuâtre qui le fait désigner sous le nom de *calcaire bleu* » Dufrenoy et Elie de Beaumont (1841) ajoutent que certains bancs contiennent des cherts et « d'autres sont remplis d'entroques, au point de prendre la structure connue sous la dénomination de *petit granite*, et de ressembler complètement au petit granite des Ecaussinnes et à celui de Ferrière-la-Petite.»

Ce calcaire encrinétique qui est l'équivalent, non pas du niveau des Ecaussinnes, mais du *Calcaire de Landelies* (Tournaisien moyen), est encore exploité à Yvoir, en Belgique, sous le nom de *Petit granit du Bocq*.

Ce calcaire, qui est un excellent matériau de construction, était exploité dans de nombreuses carrières en Avesnois. A Ferrière-la-Petite, Dufrenoy et Elie de Beaumont mentionnent « deux grandes carrières, qui donnent un beau marbre, lumachelle noir, analogue au *petit granite des Ecaussinnes*, et parsemé, comme lui, d'une infinité de petites taches blanches ou grisâtre dues à des entroques. Ces carrières présentent plusieurs autres variétés de marbres. ». Il ne semble pas que ce matériau ait été poli ailleurs.

Parmi les localités de l'Avesnois dont le nom est bien connu des géologues européens figure celui de Bachant. Cette célébrité est due à la présence d'un niveau de paléosol, nommé « *Banc d'or de Bachant* » (Gosset, 1888) et d'un calcaire bleu-noirâtre ou noir, de grain fin et chargé de matière organique et qui semble avoir fait l'objet de tentatives d'exploitation comme « *Marbre noir de Bachant* » Ce facies spécial est caractéristique de la bande viséenne de Ferrière-la-Petite. Derville (1952), a étudié ce calcaire du point de vue sédimentologique, notamment dans la carrière Adam (abandonnée et en voie de disparition), dans la carrière Lebrun sur la rive droite du ruisseau Glimour, dans la carrière Cuisset à Eclaiibes et, derrière la gare de Ferrière-la-Petite, dans la carrière Mercier. Une étude semblable a été menée par Mamet (1964) qui nous livre quelques informations complémentaires : les carrières Adam et de Tripette (ou Lhoripette) n'offrent plus aucune coupe. La carrière Lebrun était exploitée par Lequeux jusqu'en 1962. Les carrières Cuisset et Mercier, étaient abandonnées mais offraient de bonnes coupes géologiques.

Ce marbre est cité par Dufrenoy et Elie de Beaumont (1841) qui se réfèrent à Poirier de Saint-Brice : « Les carrières de Saint-Remi-mal-Bâti et Bachant fournissent un marbre d'un beau noir foncé, analogue à celui de Dinant ».

Par contre Wirzing (1775) cite à Bachant un marbre « *ex stramineo et cinereo diluto partitum* » (jaune-paille à gris clair) qui me laisse perplexe.

Le plus abondamment cité des marbres de l'Avesnois et peut-être le seul à avoir été utilisé lors de la décoration du Château de Versailles est la *Brèche de Dourlers*,

Le *Marbre-brèche de Dourlers*, est une brèche calcaire formée de fragments de diverses couleurs baignant dans un ciment généralement rougeâtre. A son sujet, on peut citer l'Oryctologie des Sociétés royales des Sciences de Londres et de Montpellier qui en 1755 la décrit comme « une brèche formée de taches cendrées, blanches, rougeâtre et autres »; Brard (1808) reprend cette définition et ajoute « on en trouve un à-peu-près semblable à Ogimont, dans le pays d'Avesnes en Hainaut »; d'Omalius d'Hallooy la cite en 1828; de Chesnel (1849) reprend la description de l'oryctologie et Dufrenoy et Elie de Beaumont (1841) écrivent « qu'il existe aussi des carrières de marbre à Dourlers. on y trouve une brèche compacte... ». En 1853, la Session extraordinaire de la Société géologique de France, pressée par le temps, n'a pu s'arrêter qu'à Dourlers, où elle devait trouver une exploitation de la brèche qu'elle avait déjà observée à Berlaimont. Le fond de la carrière étant rempli d'eau, il a été impossible de voir le contact de la brèche et du calcaire sous-jacent.

Gosselet (1888) dans sa description de l'Ardenne, se contente de « Le centre du pli synclinal passe au sud du village; il est jalonné par des bancs de brèche, qui forment les rochers à l'angle du parc et qui ont été exploités comme marbre dans une carrière aujourd'hui abandonnée. ». Jennepin, en 1901, écrit qu'on exploitait à Dourlers un marbre nommé *brèche de Hainaut*, à cause d'une vague ressemblance avec la *brèche d'Alep*. A Dourlers même, il ne subsiste pas de témoignage de cette industrie, par contre, des carrières en activité dans la région montrent que le Calcaire *bréchiforme de Limont*, présente les mêmes caractéristiques que la *Grande brèche viséenne*, exploitée dans le passé comme *Marbre de Waulsort*, *d'Onhaye* ou *Herculanum* ou encore comme *Marbre de Fontaine-l'Évêque*. Brard (1921) nous indique que dans cette dernière localité, « l'on distingue quatre autres variétés de ce marbre. Le premier s'appelle le *prêcheur*; le second, le *marqueté*; le troisième, le *blanc et rouge* et le quatrième, l'*arlequin*.

Le *Marbre de Leffe*, près de Dinant, parfois orthographié *Loff* ou *Leff* et parfois dénommé « *brocatelle* » est également de la Grande Brèche.

Dumon (1959) considère également que ce que de Felice (1773) décrit comme *Marbre d'Ogimont* (?) dans le pays d'Avesnes est une brèche pareille à celle de Dourlers. Par contre, ce qui est décrit par divers auteurs, dont Brard (1808) comme le *Marbre brèche d'Estroeng-la-Rouillie* « composé de morceaux de marbre verdâtres et cendrés » me laisse perplexe. Il existe un village dénommé Larouillie au sud d'Étroeungt mais la carte géologique indique des formations crétacées. A Étroeungt même, je ne localise pas de brèche verdâtre. Il en est de même de celui de *Chapelle-en-Thiérache* décrite comme une brèche avec des taches verdâtres, blanches, rouge et cendrées.

## VI. — BOULONNAIS

Les roches les plus anciennement exploitées dans la régions sont la *Pierre de Marquise*, calcaire oolithique ou pseudo-oolithique d'âge bathonien, les grès portlandiens, les craies blanches et les calcaires et grès dévonien du Boulonnais. (Colbeaux, 1992). L'étude réalisée en 1994, par Blanc des matériaux de construction de la cathédrale de Saint-Omer (XII-XV<sup>ème</sup> siècle) est révélatrice à ce sujet

Les *Marbres du Boulonnais*, très activement exploités actuellement, sont d'âge viséen. Ce sont des calcaires clairs, généralement beige, parfois rose ou violacées, homogène ou en mélanges. Certains sont veinés par des stylolites rouge, violets ou noirs et parfois lardés de filonnets calcitiques (Delattre, 1973).

En 1931, H. Derville a décrit les organismes, généralement des algues, responsables des nombreux aspects décoratifs. Il a proposé 4 catégories :

1.- les marbres formés essentiellement d'organismes : *Henriette* constitué de bandes ondulées et chiffonnées; le *Napoléon tigré* dit encore « *Pattes d'alouettes* » à thalle buissonnant à lames déchiquetées et le *Lunel fleuri* composé d'algues en tubes rameux disposés en éventail et à texture zonaire donnant un aspect de volutes de fumées et appelé pour cette raison marbre « *bouffées de pipe* ». Le *Brun fleuri* sera à rattacher à cette catégorie.

2.- Les marbres formés de débris d'organismes noyés dans une pâte constituée de débris. *Caroline*, *Rubané véritable*, *Notre-Dame A* qui appartiennent à cette catégorie ont des texture rubanées et zonaires correspondant à des thalles d'algues alternant avec des débris ou des fragments.

3.- Les marbres formés uniquement de débris de forme et de taille variées, tels que brachiopodes, algues, foraminifères, céphalopodes, ostracodes et échinodermes. Le *Joinville*, le *Lunel uni* et les *Loupinnes* sont en réalité des sédiments calcaires à aspect un peu moins décoratifs.

4.- Le célèbre *Napoléon Grand Mélange* correspond à une brèche formées de blocs anguleux et arrondis de calcaires variés.

Voyons à présent ce que l'on a écrit dans le passé.

Dans son dictionnaire d'Architecture, d'Aviler (1755) cite le *Marbre de Boulogne* : « espèce de brocatelle, mais dont les taches sont plus grandes et mêlées de quelques filet rouge. » Le jubé de la cathédrale de cette ville en est construit. Buffon, dans la partie « Minéralogie » de son Histoire naturelle (1785) reprend à peu près la même phrase : « On tire en Picardie le *marbre de Boulogne* qui est une espèce de *brocatelle*, dont les taches sont fort grandes, et mêlées de quelques filets rouges ». Le célèbre auteur n'est pas plus loquace en ce qui concerne les autres « marbres plus ou moins beaux et plus ou moins variés dans leurs couleurs. On en tire plusieurs sortes aux environs de *Dinant* (...) » et aussi des noirs purs à *Liège* (*Theux* probablement) et de *Namur*. En ce qui concerne le pays de Hainaut, il cite *Barbençon*, *Rance* et *Givet*.

Nous avons livré plus haut, les descriptions de Brard (1808), concernant les marbres du Nord. Voyons à présent ce qu'il écrit à propos de ceux du Département du Pas-de-Calais : 1° Le *marbre noir* qui n'est pas estimé, à cause du peu d'intensité de sa couleur qui est grisâtre par place. 2° Le *Marbre brocatelle de Boulogne* est tacheté et veiné de rouge, de sorte qu'on peu le considérer, jusqu'à un certain point, comme une espèce de brocatelle, mais dont les taches sont plus grandes que dans celle d'Espagne. 3° *Marbre gris, rose et blanc*, disposé par taches ou par veines. Il y a deux variétés qui diffèrent peu l'une de l'autre. 4° Le *Marbre brun*, qui est taché par places d'une couleur moins foncée que la pâte, et varié de veines et de linéaments blancs. 5° Le *Marbre d'un*

rouge foncé, est varié de taches grises, qui sont dues à des madrépores ou à des corps organisés de la même famille.

Sa notice concernant le *Marbre de Boulogne* est plus explicite. En 1808, il ajoute entre parenthèses : vulgairement *marbre Napoléon*.

« On a découvert nouvellement, près de Boulogne-sur-mer, une espèce de marbre couleur de café au lait qui présente des veines blanches, grises et rousses, dont la texture est lamelleuse dans certaines places, et compacte dans d'autres, qui reçoit un assez beau poli et qui est susceptible d'être employé avantageusement, soit en décoration des monuments publics, soit à l'ameublement des maisons particulières. Il offre encore plusieurs autres avantages, tels que de pouvoir fournir des pièces d'un grand volume, et d'être, quoique solide, d'un poids très-moderé ; puisque le pied cube ne pèse que 180 livres terme moyen. Si ce marbre a quelque succès dans l'emploi que l'on commence à en faire dans le département du Pas-de-Calais, il sera aisé de le transporter à Paris ou ailleurs, par voie du Havre, de Rouen, etc. Ce qui a donné l'occasion de découvrir ce marbre, c'est la colonne que les troupes du camp de Saint-Omer, après une grande victoire, votèrent à la gloire de l'Empereur (en 1821, cela devient « leur chef » ce qui était politiquement correct) pour être élevée à Boulogne, sur le bord de la mer ; alors l'on fit des recherches pour trouver des matériaux propres à la construction de ce monument ; et après plusieurs fouilles, M. Piron découvrit ce marbre ; « et il s'empressa (dans l'édition de 1808 seulement) de donner à la carrière et au marbre qu'on en tire, le nom de *Napoléon* »

Le département du Pas-de-Calais renferme encore plusieurs autres marbres : tel est celui de *Stingal*, de *Lingeon*, etc. En 1821, il ajoute d'après les dire d'un officiel « qu'il ne sont propres qu'à la décoration intérieure. »

En 1823, dans son rapport sur l'état actuel des carrières de marbre en France, Héricart de Thury cite 11 variétés dans le Pas-de-Calais.

1° *Le Stinckal de Haut-Banc*, à Ferques (gris sombre ou bleâtre). 2° *Le Petit-Banc*, provenant de la même localité (gris blanc, gris jaspé). Les deux premières variétés sont destinées à la marbrerie d'ameublement et d'architecture civile intérieure.

3° *Le marbre d'Elinguehen* (gris, blanc, rouge) ; 4° *Le marbre de Beaulieu* à Landrethun, présentant les mêmes teintes que le précédent. 5° *Le marbre d'Hardinghen* (rougeâtre, jaspé de blanc). Les variétés 3-11 sont présentés comme de beaux marbres monumentaux, les marbres 6-11 ont été employés pour la colonne de Boulogne. 6° *Brecneques (la Colonne)* de Marquise (gris-blanc très fin, moiré de gris sur gris). 7° *Le Tigré* à Hindrequen (brun, doux, tigré). 8° *Le Sanguin* (fond gris, blanc, veiné de lignes fines sanguines). 9° *Le Ruban bleu* de la même localité, (fond gris blanc, coupé de rubans blancs). 10° *Le Noir de la Rochette* à Hardinghen (noir veiné) et le 11°, dénommé *Le Linghon* à Ambleteuse, (gris-rouge veiné)

Pour information, la Colonne de la Grande Armée ou Colonne Napoléone, haute de 50 m. est l'oeuvre de l'architecte Labarre. La première pierre en fut posée le 18 brumaire de l'an 13 et atteignait 20 mètres en 1814. Les travaux reprurent en 1819 et la plate-forme fut posée en 1821 et l'on couronna la colonne d'un globe royal en 1823.

Napoléon du attendre 1841, pour pouvoir trôner au sommet. La statue actuelle, oeuvre de Stenne fut placée en 1962.

En 1850, dans son Dictionnaire, Sancholle, explique qu'il y a diverses carrières, mais qu'aucune n'a été ouverte avec l'intention d'y extraire du marbre ; « on y tirait des matériaux très propres aux constructions les plus solides ; mais seulement lorsque, dans l'extraction, on rencontrait un bloc d'une nuance assez vive et suffisamment égale, on le réservait pour en faire des chambranles de cheminées.

(...) On distingue quatre variétés principales dans le marbre de Boulogne : le *napoléon*, l'*henriette brune*, l'*henriette blonde* et la *caroline*.

1.- *Napoléon*. Il a le fond d'un gris clair, parsemé de petites taches grises, fleuries, couleur de terre, ressemblant assez à la racine du buis, avec des parties accidentelles de racines cristallisées, d'un blanc de lait.

2.- *Henriette brune*. Le fond est brun très foncé, fouetté ou panaché de taches d'un brun plus clair, presque jaune sur les bords, traversé par de petites veines de calcaire bien cristallisé.

3.- *Henriette blonde*. Cette variété ne diffère de la précédente que parce que le fond est d'un brun très clair, presque gris.

4.- *Caroline*. Le fond est gris clair, rayé de veines et d'ondulations plus ou moins foncées qui dépendent de la manière dont ce marbre est scié. Il a l'aspect du bois pétrifié.

*Le marbre de Boulogne* est généralement assez employé à Paris ; sa couleur triste et sombre l'empêche cependant de servir avec avantage pour l'ameublement. Son prix est de 580 à 730 fr. le mètre. » Pour avoir une échelle de comparaison, le

*Cousolre* se vendait 440 à 460 fr ; le *Glageon*, 460 à 500 fr ; le *Granit de Flandre* ( le *Petit-granit* actuellement), 525 fr ; les *Noirs de Theux, Namur, Dinant...* de 580 à 730 fr ; le *Rouge royal*, 640 fr, le *Sainte-Anne* de Belgique, de 640 à 700 fr ; l'*Incarnat*, de 700 à 875 fr ; le *Griotte*, de 1170 à 1800 fr ; le *Portor*, 1460 à 1800 fr, le *Jaune de Sienne*, 2340 à 3000 fr. et le Blanc statuaire, de 1800 à 3000 fr. le mètre cube, suivant la dimension des blocs.

Remerciements. — L'auteur du présent article tient à remercier les nombreuses personnes qui ont contribué à la rédaction : avant toutes choses, je voudrais rappeler la mémoire d'un ami, le Commandant Bernard Ducarme (1945-2000), répétiteur à la Chaire de Géologie de l'Ecole Royale Militaire de Bruxelles qui m'a fait apprécier la géologie de son village natal de Rance et qui m'a guidé dans les anciennes carrières des vallées des Honnelles et de l'Hogneau.

Mes remerciements vont aussi au personnel du Musée du Marbre à Rance et en particulier à Françoise Gohy et Florence Peltier. Merci aussi à tous ceux qui ont fouillé leurs souvenirs et leurs archives : Mme S. Beckary, Conservatrice au Musée d'Histoire naturelle de Lille ; Mme D. Lebrun de Glageon ; Mlle S. Mouquin, historienne de l'Art ; Mme J. Biadatti, secrétaire du Cercle d'Histoire régionale de la Pointe de Givet.

MM. D. Coupaye, agrégé de l'Université ; J. Danloux, géologue à Trélon ; C. Decavel, Maire de Berlaumont ; J. Henaut, Maire de Cousolre ; P. Heuclin de Cousolre et son fils J. Heuclin, Doyen à la Faculté catholique de Lille ; B. Mistiaen, professeur au département de Géologie de la même Faculté ; R. Ramelot, historien amateur à Etroingt ; E. Simon, éditeur de « Recherches Walhéroises » et F. Tourneur, chargé de missions à Pierres et Marbres de Wallonie.

BIBLIOGRAPHIE

- ANUS F. (1938). — Les Marbres de la France et du Sud de la Belgique (échelle : 1/1.000.000) Carte avec les noms utilisés dans le commerce des pierres marbrières
- BIRON J.P., COEN-AUBERT M., DREESEN R., DUCARME B., GROESSENS E. et TOURNEUR F. (1983) - Le Trou de Versailles ou Carrière à Roc de Rance. Bull.Soc.belge de Géol., t 92, 4, pp 317-336.
- BLANC A., (1994). — Les matériaux de construction de la cathédrale de Saint-Omer. 119<sup>e</sup> Cong. Nat.des Soc.hist.et Scient. Carrières et Constructions III, Amiens, Ed C.T.H.S. Paris, pp, 27-38
- BRARD C.P. (1808). — Traité des Pierres précieuses, des porphyres, granits, marbres et albâtres et autres roches propres à recevoir le poli et à orner les monuments Publics et les édifices particuliers (etc), Ed. Schoell, Paris
- BRARD C.P.(1821). — Minéralogie appliquée aux Arts (etc), Ed F.G. Levrault, Paris
- BRICE D., MILHAU B., MISTIAEN B., ROHART J.Cl. et WEYANT M. (1993). — Précisions stratigraphiques sur le Frasnien de Ferrière-la-Grande. Ann.Soc.Géol.Nord, t.2, (2<sup>ème</sup> série) pp.91-104
- BOULVAIN F., COEN-AUBERT M., MANSY J.L., PROUST J.N. et TOURNEUR F.(1995). — Le Givétien en Avesnois : Paléoenvironnements et implications paléogéographiques. Bull. Soc.belge de Géol, t.103, fasc.1-2, pp.171-203.
- BUFFON GEORGES LECLERC (Comte de) (1785). — Histoire naturelle des Minéraux, t. 3, Ed. A. Devos et Cie (éd 1852), Bruxellès.
- CASTRIES (Duc de) (1972). — Louis-Philippe, Libr. J.Tallandier, Paris, 638 p.
- CAYEUX L.,(1890). — Excursion de la Société géologique du Nord dans les environs d'Avesnes-sur-Helpe, 22 juin 1890, Ann. Soc. Géol. Nord, t. XVII, pp 283- 295.
- COLBEAUX J-P. (1992). — Terroirs et Monuments de Frances. (dir.Ch.Pomerol) « Nord de la France, Boulonnais, Calais, Dunkerquois » Ed. B.R.G.M., pp 224-228.
- D'AVILER A.-Ch. (1755). — Dictionnaire d 'Architecture civile et Hydraulique (...), Ed Ch.A.Jombert, Paris
- DE CHESNEL A., (1849). — Dictionnaire de Géologie (...) Ed. Aux Ateliers catholiques du Petit-Montrouge, Paris « Marbre, Marmor » col. 231-234
- DELATTRE CH., MERIAUX E. et WATERLOT M.(1973). — Guides géologiques régionaux (Région du Nord), Ed. Masson & Cie, Paris
- DELATTRE CH., POLVECHE J, B. et G. WATERLOT (1967). — Aperçu de la structure des terrains carbonifères de l'Avesnois., Ann.Soc.Géol.Nord, t.87, pp.203-209.
- DERVILLE H. (1925). — Les facies du calcaire carbonifère dans le Boulonnais. C.R.Ac.Sc.Paris, t.180, n°16.
- DERVILLE H. (1930). — Le Marbre Lunel, ses variétés. Le Lunel fleuri. C.R.Ac.Sc.Paris, t. 190, n°26.pp. 1572-1575.
- DERVILLE H. (1930). — Le marbre Henriette, banc récifal construit par des algues calcaires. C.R.Ac.Sc.Paris, t. 190, pp 1434-1435.
- DERVILLE H. (1931) - Les Marbres du Calcaire Carbonifère en Bas-Boulonnais. Ed. O. Boehm, Strasbourg, 324 p
- DERVILLE H. (1936).- Facies sédimentaires de la base du Viséen dans la bande d'Avesnes.C.R.sommaire de la Soc.Géol.de France., p. 21,
- DERVILLE H. (1936). — Contribution à l'étude du Calcaire Carbonifère de l'Avesnois. Facies sédimentaires de la base du Viséen dans la bande d'Avesnes. Ann.Soc.Géol.du Nord, t.LXI, pp.27-35.
- DERVILLE H. — Les facies du Calcaire de Bachant, Ann.Soc.Géol.Nord, t. LXXII, pp 15-29.
- D'OMALIUS D'HALLOY J.B.J. (1829). — Mémoire pour servir à la description géologique des Pays-Bas, de la France et de quelques contrées voisines, Ed.D.Gérard, Namur.
- DRUON Ch. (1893) Excursion de la Société géologique du Nord aux environs de Bavay et au Caillou-qui-Bique, le 4 juin 1893, Ann.Soc.Géol.Nord, t.XXI, pp 197-205.
- DUCARME G. (1957) - Le marbre de Rance, son Histoire et celle de l'industrie marbrière dans la localité. Publ.Soc.Hist.rég.Rance, t II, pp 35-76
- DUFRENOY et ELIE DE BEAUMONT (1841). — Explication de la Carte géologique de France, t.1, Imprimerie royale, Paris, (pp.749-755)
- DUMON P. (1959). — Le Marbre dans la Région du Nord. Le Mausolée, N°273, mai 59 pp.627- 637.
- DUMON P. (1982). — Aperçu historique de l'activité marbrière en Wallonie. Ann. Mines de Belgique, 11, pp. 945-1008
- DUMONT A.F. (1956). — « Aux Marbres de Flandre ». Une entreprise industrielle et commerciale sous l'Empire (1807-1817). La Vie Wallonne, XXX, PP 1-47 et 126-167.
- DUPONT Ed. (1864). — Notice sur le marbre noir de Bachant (Hainaut français), Bull.Acad.roy.de Belgique, Bruxelles, 2<sup>ème</sup> série, t.31, pp.181-192.
- DURONSOY A.(1979) - Carriers, Marbriers, Chauffourniers de la Vallée de l'Hogneau. Catalogue de l'Exposition du Marbre de 1979, Com.du Tourisme de Bellignies, 20p.
- GOSSELET J. (1888). — L'Ardenne, Ed Baudry et Cie, Paris, 890 p.
- GUETTARD et MONNET (1780) - Atlas et Description Minéralogiques.
- GROESSENS E. (1981) - L'industrie du marbre en Belgique, *Mém.Inst.Géol.Univ.de Louvain*, t.XXXI, pp 219-253.
- GROESSENS E.. (1992). — La diffusion du Marbre de Rance en France. 117<sup>e</sup> Congr.nat. Soc. Sav., Clermont-Ferrand, 2<sup>e</sup> Coll. Carrières et Constructions, pp 193-211
- GROESSENS E. (2002). — Les matériaux de construction de Belgique et du Nord de la France. *Géologues - Rev.off.de l'Union Fr. des géologues*, N°133
- GUICCIARDIN L. (1613). — Description de tous les Pays-Bas autrement appelé la Basse Allemagne. Amsterdam.
- HEBERT Ed.(1855). — Quelques renseignements nouveaux sur la constitution géologique de l'Ardenne française, *Bull.Soc.Géol.Fr.*, 2<sup>e</sup>s, t.12, pp 1165-1188
- HEUCLIN J. ( 1978) - Monographie de la Marbrerie à Cousolre. *Le Mausolée*, Avril 78, pp. 759- 764, Juillet 78, pp. 1327- 1333
- HEUCLIN J. (1980). — L'industrie du Marbre au XIX<sup>e</sup> siècle à Cousolre. *Mém. Soc. Arch.Hist.Arrond. Avesnes*, t XXVII, pp. 87- 111

- HEUCLIN P (1977). — Le marbre de Cousolre. *Le Mausolée*, Sept.77, pp 1965-1970
- HUYGHE-BUISSART A. et MANZY J.L. (1995). — Sur l'importance de deux événements sédimentaires du Viséen moyen et supérieur de l'Avesnois., *C.R.Acad.Sci.Paris*, t.321, série IIa, pp 967-974.
- JENNEPIN A.(1887). — Notice sur une vasque de fonts baptismaux pédiculés, exécutés au X<sup>e</sup> ou au XI<sup>e</sup> siècle pour l'église Notre-Dame de Cousolre., *Ann. Cercle Arch.Mons*, t XX, pp. 18-23.
- JENNEPIN A.(1901) - Monographie de la Marbrerie dans l'Arrondissement d'Avesnes, ayant figuré à l'Exposition Universelles de 1900, Classe 102. *Union géograph. du Nord de la France*, 44 p.
- KHATIR A et GUILLOT Fr. (1990). — Géologie structurale et exploitation de carrière en Avesnois. *Ann.Soc.Géol.Nord*, t.91, pp.21-24
- LADRIERE J (1888). — Le Givétien à Hon-Hergies-lez-Bavai, son importance, ses limites, son contact avec l'Eifélien. *Ann. Soc.Géol.Nord*. t.XV, pp.162-169.
- LADRIERE J. (1905). — Les Affleurements du Terrain Dévonien dans les environs de Bavai. *Ann.Soc.Géol.Nord*, t.XXXIV, pp 205-264.
- LAGAISSE (1898). — Compte-rendu de l'Excursion Géologique du 1er mai 1898 à Crevecoeur et Cambrai, *Ann. Soc. Géol Nord*, t XXVII, pp 42 – 59
- LECOMPTE M. (1936). — Contribution à la connaissance des « récifs » du Frasnien de l'Ardenne. *Mém.Inst.Géol.Univ.de Louvain*, t.X, pp30-112.
- LEVEQUE R. (1978). — Le « Rouge de Rance ». *Soc. Hist.rég.de Rance*, pp. 1-49
- MALAUQUIN (1888). — Compte-rendu de l'excursion de la Société géologique du Nord à Bachant, Sous-le-Bois, Louvroil, Douzies et Maubeuge., *Ann.Soc.Géol.Nord*, t.XV, pp.169-173
- MAMET B. (1964). — Sédimentologie des facies « Marbres Noirs » du Paléozoïque Franco-belge. *Mém.Inst.royal.des Sc.Nat. de Belgique*, n°150, 131 p.
- MONIEZ M. (1961). — Contribution à l'étude du Frasnien de la région de Trélon. *Ann.Soc.Géol.Nord*, t.LXXXI, pp 105-112.
- MEUGY (secrétaire de la Session) (1853). — Session extraordinaire à Valenciennes – en septembre 1853, *Bull. Soc. Géol. de France*, t. 10, 2ème série, pp 609- 634
- PETITJEAN M. (1994). — La Cour-le-Roi et la place du marché des carolingiens à nos jours (Compiègne), *éd. Musée Antoine Vivenel à Compiègne*, 61 p.
- POIRIER DE SAINT-BRICE, *Annales des Mines*, 1er s.t.XIII,
- ROBASZYNSKI F et LIVIN J. (1976). — L'observation géologique en carrière. Un exemple : Bellignies. Intérêts pour l'exploitant. *Ann.Scient.Dep.Mines-Géol, Mons-B*, pp.39-52.
- SALAMAGNE A. (1990). — L'approvisionnement et la mise en oeuvre de la pierre sur les chantiers du sud des anciens Pays-Bas méridionaux (1350-1550). *C.R. 115ème Congr.nat.soc.savantes, Avignons*, pp. 79-91.
- SALAMAGNE A. (1992) - La fourniture et le mise en oeuvre de la pierre sur les chantiers du Hainaut méridional, du Cambrais au Douaisis (XIIe-XVIe siècle) Etat de la question et problématiques. – *Actes du VIIIe Coll.Intern. de Glyptographie d'Hoepertingen (Euregio)* pp. 363-390
- SALAMAGNE A. (1994). — Production et commercialisation de la pierre dans les Pays-Bas méridionaux (Hainaut-Cambrésis, Douaisis et Tournaisis) au Moyen-âge. 119ème congr. nat. soc.hist.et sc., Amiens, 1994, Colloque « Carrières et Constructions » pp.87-101.
- SANCHOLLE B. (1850). — Dictionnaire du Commerce et des marchandises. « Marbres » *Ed Guillaumin et Co.* Paris, pp 1439-1446.
- TOURNEUR F. (1982). — Conodontes de trois « récifs de marbre rouge F2j » Stratigraphie et Ecologie. *Bull. Soc. belge de Géol.* t.91 –fasc.2, pp 91-102.
- WATERLOT G. et BEUGNIES A. (1973). — Guides géologiques régionaux « Ardenne », *Ed Masson et Cie*, Paris

## AQUIFERES ET RESSOURCES EN EAU SOUTERRAINE DU NORD-PAS-DE-CALAIS

par N. CRAMPON (\*), J. MANIA (\*\*) et J.Y. CAOUS (\*\*\*)

*Résumé.* — Ne disposant pas de ressources très importantes en eau superficielle, la région Nord-Pas-de-Calais est, par contre, riche en eaux souterraines et fit très tôt l'objet d'études hydrogéologiques dont le pionnier fût incontestablement Jules Gosselet avec ses premières études régionales sur la nappe de la Craie puis sur la nappe captive des Calcaires Carbonifères de la région lilloise. La Craie s'étend sur environ 90 % du territoire, même si elle perd son caractère aquifère en s'ennoyant profondément sous la plaine de Flandre. Libre, captive, artésienne, polluée ou non, sa nappe est une donnée incontournable de la vie de la région, produisant près de 90 % de son eau potable d'origine souterraine. Dans l'Avesnois ce sont les calcaires paléozoïques qui prennent la relève, tandis que le Boulonnais fait appel, localement ou en complément, à plusieurs petits aquifères jurassiques. En Flandre, les sables thanetian renferment une nappe importante, majoritairement captive mais peu productive, utilisée plus pour l'agriculture que pour la consommation humaine. Quand elles ne disposent pas de ressources suffisantes à proximité, des villes comme Dunkerque, Hazebrouck et même Lille doivent faire appel à un transfert d'eau de la nappe de la Craie sur plusieurs dizaines de kilomètres.

L'examen des variations du niveau des nappes libres permet de suivre à une échelle inter-annuelle les répercussions des prélèvements intensifs effectués par pompage sur les eaux souterraines mais aussi de montrer l'impact des cycles climatologiques conduisant à des sécheresses (1971 à 1974, 1990 à 1992) ou à des périodes très pluvieuses (1999 à 2001) à l'origine par exemple des inondations du bassin crayeux de la Somme. Les différents états de la recharge des nappes libres comme celle de la craie sont très instructifs comme outil de prévision. Les cartes du niveau des nappes peuvent aussi mettre en évidence des relations étroites avec des rivières (drainage, alimentation) ou avec d'autres aquifères plus profonds. Les vitesses de circulation des eaux souterraines et les directions d'écoulement vont avoir un impact majeur sur le mouvement des fronts de pollution à long terme. Les champs captants, sièges des dépressions piézométriques, constituent les zones d'appel des pollutions agricoles, industrielles ou urbaines. Le suivi de la qualité des eaux souterraines sur la région de l'Artois et de la Picardie sur plusieurs dizaines d'années indique que le phénomène de la dégradation bien que lent se propage inexorablement provoquant parfois l'abandon des zones de production de l'eau potable.

*Abstract.* — *Disposing very few important superficial water resources, the region "Nord -Pas-de-Calais" produces groundwater and was very early the object of hydrologic studies. The pioneer was incontestably Jules Gosselet with first regional studies on the Chalk aquifer then on the confined aquifers as Carbonaceous Limestones of the Lille region. The chalk formation spreads on about 90% of territory, it loses its aquifer character by going down itself deeply north downward the Plain of Flandre. Confined or unconfined, polluted or not, the chalk aquifer is an incontestably element of the activity of the north region of France, producing near 90% of its ground water supply. In the Avesnois region there are the paleozoic limestones which takes raises it, while the Boulonnais region do call, locally or in adjunct, to several little jurassic aquifers. In Flandre, the thanetian sands are an important aquifer, often confined but few productive, used essentially for the agriculture than for the human consumption.*

*When they don't dispose of sufficient resources to vicinity, some towns like Dunkerque, Hazebrouck and Lille have to do a transfer of water of the chalk aquifer on several ten of kilometre. The investigation of variations of level of unconfined water tables allow to follow to a yearly scale the after effect of intensive ouput done through pumping on the groundwater but also to showing the impact of some climatic cycles leading to droughts (1971 to 1974, 1990 to 1992) or to some very rainy periods (1999 to 2002) at the origin for example of floods in the chalky basin of the Somme river. The different states of the refill of unconfined water tables like the one of the chalk are very instructive like tool of forecasting. The maps of level of some water tables can also put in evidence the narrow relationships with of rivers ( drainage, recharge) or with others deeper aquifers. Groundwater flow velocities and the directions of drainage are going to have a major impact on the motion of the foreheads of pollution at long term. The well fields, sieges of some piezometric depressions, constitute the zones of agricultural, industrial or urban pollution. The followed of the quality of the groundwaters for regions of the Artois and of the Picardie on several ten of years indicates than the phenomenon of the deterioration water well than slow propagates inexorably and provokes sometimes the abandonment of the production zones for water supply.*

(\*) Université d'Artois

(\*\*) Université des Sciences & Technologies de Lille, UMR 8107-LML-Polytech' Lille 59655 Villeneuve d'Ascq

(\*\*\*) Service Géologique Régional Nord-Pas-de-Calais (BRGM)

## I. — INTRODUCTION

La région est dépourvue de grands fleuves et de rivières importantes (le module le plus important est celui de la Lys : 12,1 m<sup>3</sup>/s à son entrée en Belgique à Wervicq). Elle fait du reste partie du seul des six bassins administratifs dont le nom ne se réfère pas à un fleuve ou à une rivière. La somme des débits moyens interannuels de ses cours d'eau (75 m<sup>3</sup>/s) est 5 fois plus faible que le débit de la Seine et plus de 10 fois plus faible que celui de la Loire.

Ne disposant donc pas de ressources très importantes en eau superficielle, la région est, par contre, riche en eaux souterraines. Là encore Jules Gosselet s'est révélé être un précurseur dans le domaine de l'Hydrogéologie, avec la publication, en 1886, de ses «Leçons sur les nappes aquifères», suivies en 1904 et 1905 par les premières études hydrogéologiques régionales sur la Craie dans le Douaisis et les Calcaires Carbonifères de la région lilloise.

## II. — AQUIFERES ET RESSOURCES

### 1) Cadre géologique régional des aquifères

La région Nord-Pas-de-Calais (NPC) appartient aux parties nord du Bassin de Paris et sud du Bassin de Bruxelles, séparées par l'anticlinal faillé de l'Artois, d'axe N.O.-S.E. Le Crétacé supérieur, discordant sur des structures paléozoïques complexes affleure sur 60 % du territoire et les formations tertiaires sur 30 %. A l'Est, les formations crétacées s'appuient sur le massif paléozoïque ardennais (l'Avesnois) alors qu'elles s'enfoncent au Nord sous le Tertiaire de Flandre et du bassin d'Orchies, séparés par l'anticlinal du Mélantois. Au N.O., l'anticlinal de l'Artois s'ouvre sur les terrains jurassiques et paléozoïques de la « boutonnière » du Boulonnais.

Les principaux aquifères (fig. 1) correspondent ainsi aux formations litho-stratigraphiques poreuses, fissurées ou fracturées suivantes :

#### a) Calcaires paléozoïques:

- *Avesnois* (extrémité Est de la région): calcaires et dolomies du Dévonien (Givétien et Frasnien principalement) et du Mississipien (ex-Dinantien), fortement plissés et faillés : nappes (majoritairement libres) de fractures localement karstifiées. Seule ressource pour cette région.

- *Région lilloise* (Roubaix-Tourcoing et Belgique) : calcaires mississippiens discordants à faible profondeur, sous une couverture réduite de Crétacé supérieur. La nappe, captive en France et libre dans le Tournaisis, est fortement surexploitée en France comme en Belgique.

- *Boulonnais* (massif de Ferques dans le Nord de la boutonnière) : structure complexe, faillée et chevauchante où seuls les calcaires viséens peuvent présenter un intérêt hydrogéologique local.

b) *Jurassique du Boulonnais* (Bajocien à Tithonien) : discordantes sur le Paléozoïque et sous le Crétacé moyen, ces assises ont une extension qui ne dépasse guère celle de la boutonnière du Boulonnais. Les aquifères, calcaires ou gréseux, sont multiples, mais d'épaisseur modeste.

c) *Craie* : Présente sur 90 % du territoire de la région, la Craie lui fournit aussi près de 89 % de son eau potable d'origine souterraine. Pourtant ses faciès et son épaisseur varient notablement selon les secteurs. Libre, captive, artésienne, productive ou non, polluée ou non, la nappe de la Craie est une donnée incontournable de la vie du Nord-Pas-de-Calais.

d) *Sables thanétiens* (ex-landéniens) : Partie méridionale du vaste bassin éocène franco-belge, cet aquifère s'étend sur environ 3 000 km<sup>2</sup> en Flandre et dans le Bassin d'Orchies,

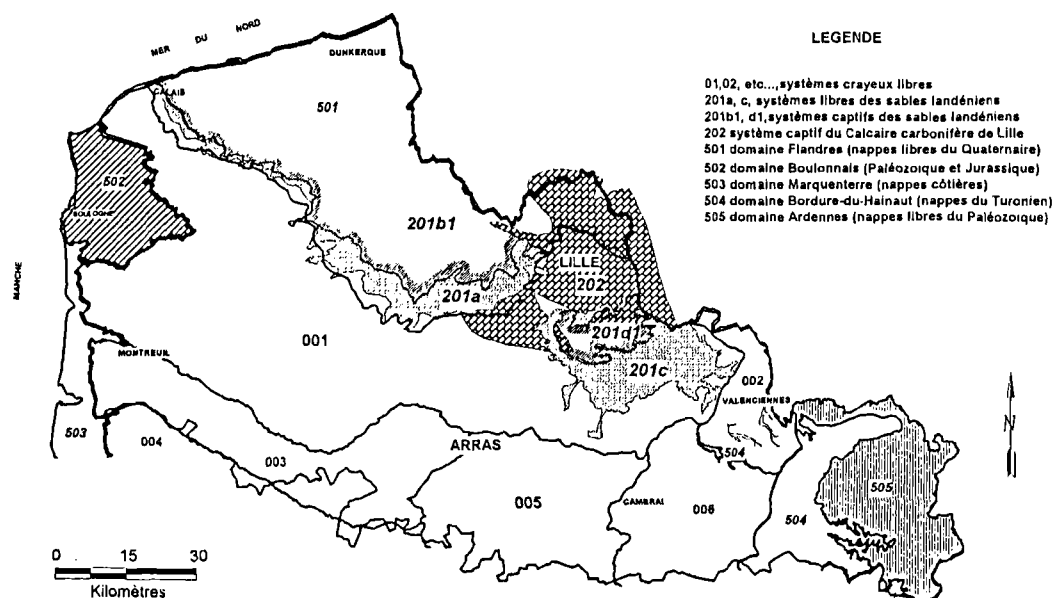


Fig. 1. — Domaines et systèmes aquifères — Région NPC (BRGM)

01,02, etc..., systèmes crayeux libres ; 201a, c, systèmes libres des sables landéniens ; 201b1, d1, systèmes captifs du Calcaire carbonifère de Lille ; 501, domaine Flandres (nappes libres du Quaternaire) ; 502, domaine Boulonnais (Paléozoïque et Jurassique) ; 503, domaine Marquenterre (nappes côtières) ; 504, domaine Bordure-du-Hainaut (nappes du Turonien) ; 505, domaine Ardennes (nappes libres du Paléozoïque).



contenant une nappe libre dans les affleurements périphériques méridionaux, puis captive sous les argiles yprésiennes. Malgré leur réserve considérable, ces sables n'offrent qu'une faible productivité, néanmoins mise à profit par l'agriculture et l'élevage, plus que pour la consommation humaine.

e) *Aquifères quaternaires* : alluvions récentes, dunes littorales, sables «pissarts» sont des aquifères généralement peu productifs et d'intérêt très local. Les alluvions peuvent toutefois présenter une forte productivité sectorielle et avoir un impact qualitatif (contamination) important sur l'aquifère crayeux sous-jacent en raison d'une communication hydraulique plus ou moins accentuée.

## 2) Les aquifères paléozoïques carbonatés de l'Avesnois

L'Avesnois paléozoïque correspond à la terminaison occidentale, avant son ennoyage sous les assises plus récentes du Bassin Parisien, de l'allochtone ardennais (ex-synclinal de Dinant) chevauchant le parautochtone brabançon (ex-synclinal de Namur) par l'intermédiaire de la faille du Midi.

La structuration, liée à la phase asturienne de l'orogénèse hercynienne, a donné lieu à une série de plis plus ou moins complexes d'orientation N 70 à 80 ° E au sein de l'allochtone dont le bord nord, dévonien, affleure à l'Est de Maubeuge et dont le bord sud, également dévonien, s'étend jusqu'à Anor, au Sud de Fourmies (fig. 2). Quatre aires d'ennoyage des plis de la couverture dévono-carbonifère y sont conservées, s'ouvrant vers l'Ouest et se fermant vers l'Est, chaque synforme carbonifère étant séparée de la suivante par les schistes et psammites du Dévonien supérieur (Famennien).

### a) *Aquifères dévoniens*

Les formations grésoschisteuses du Dévonien supérieur (500 à >600 m d'épaisseur) affleurent largement, mais peu aquifères, elles servent de substratum aux synformes aquifères de calcaires mississippiens.

Les schistes calcareux, les calcschistes et surtout les calcaires construits du Dévonien moyen, largement fracturés et localement karstifiés, dont l'épaisseur totale peut dépasser le millier de mètres, affleurent au Sud (Féron, Trélon, Baives) et plus localement au Nord (Jeumont) de l'Avesnois. Ils assurent l'alimentation en eau potable des collectivités locales, mais de plus en plus exploités pour leurs matériaux, ils sont la proie de carrières en plein développement dont l'exhaure atteint près des 2/3 des prélèvements en eau souterraine.

### b) *Aquifères carbonifères*

Les calcaires du Tournaisien-Viséen, compacts à niveaux bréchiques, dolomitiques et plus schisteux à la base peuvent atteindre 400 m d'épaisseur dans le Nord et 200 m dans le Sud de l'Avesnois, quand la série est complète. Disposées en synformes, fissurées et largement fracturées, localement karstifiées, ces formations constituent des unités aquifères distinctes, sauf dans leur coalescence à l'Ouest, car séparées par la remontée du mur schisto-gréseux famennien. Les carrières y sont nombreuses mais les prélèvements pour l'eau potable restent largement prédominants (85 %) sur les autres

usages (industries et exhaures de carrières). L'alimentation en eau potable d'origine souterraine est globalement assurée, dans l'Avesnois, à 80 % par les calcaires carbonifères.

Qu'elles soient *dévoniennes ou carbonifères* les formations carbonatées de l'Avesnois ne sont aquifères que parce que découpées par un large maillage de joints de stratification et de fractures plus ou moins ouvertes par dissolution. Il s'agit plus de réseaux aquifères que de nappes, des compartiments totalement improductifs pouvant avoisiner des zones très aquifères dont l'épaisseur efficace ne dépasse généralement pas 50 à 60 m. Dans un tel contexte de fracturation en grand, les pertes, bien que non spectaculaires, sont fréquentes quand les cours d'eau traversent les affleurements calcaires, même si leurs lits sont plus ou moins colmatés. A l'échelle du bassin de la Sambre, ces pertes sont estimées être de l'ordre de 25 % du débit total des cours d'eau.

L'ensemble des calcaires paléozoïques de l'Avesnois contribue pour 7 % aux prélèvements d'eau souterraine de la région NPC et est utilisé à 60 % pour l'alimentation en eau potable. A part l'unité aquifère de la synforme de Bachant (la plus au Nord, la plus vaste et la plus productive, mais aussi en limite de surexploitation), l'ensemble des autres aquifères dispose encore de ressources potentielles importantes, en raison de l'importance de la recharge dans cette région à pluviosité relativement élevée (850 mm/an) où les précipitations efficaces atteignent 300 à 350 mm/an.

## 3) L'aquifère franco-belge des calcaires carbonifères

L'aquifère est constitué essentiellement par des calcaires dolomitiques viséens faisant suite à des calcaires et calcschistes tournaisiens, disposés en un vaste synclinal qui s'étend du Hainaut occidental belge à l'Ouest de l'agglomération de Lille-Roubaix-Tourcoing (fig. 3). De petits anticlinaux accompagnés de failles apparaissent sur le flanc sud, notamment sous Lesquin et Villeneuve-d'Ascq. Les formations schisto-gréseuses du Dévonien supérieur constituent les limites étanches du système aquifère.

Bien qu'ils soient très proches de la surface dans le Mélantais, les calcaires n'affleurent qu'à l'Est, en Belgique. Les eaux souterraines sont, comme en Avesnois, emmagasinées dans les joints et fractures des calcaires, avec un certain développement karstique sur les structures en extension. Des galeries karstiques ont été repérées jusqu'à 30 m de profondeur dans le Tournaisis où l'aquifère affleure et se recharge. L'épaisseur efficace de l'aquifère est estimée à une cinquantaine de mètres, même si la puissance des calcaires peut atteindre 400 m dans l'axe du synclinal de Roubaix. La nappe, libre en Belgique, est encore partiellement captive ou semi-captive en France.

Trop sollicitée (85 % de la ressource renouvelable) depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, dans le secteur frontalier et fortement urbanisé de Lille-Roubaix-Tourcoing et Tournai (jusqu'à 74 hm<sup>3</sup>/an en 1974), la nappe des calcaires carbonifères franco-belges a nécessité une recherche fine de son bilan en vue d'une gestion coordonnée de la ressource. Les exutoires naturels de la nappe ont disparu depuis longtemps au profit des zones de pompage. Hormis son alimentation par les précipitations sur les affleurements en Belgique, la nappe connaît des recharges liées à des pertes notables de cours

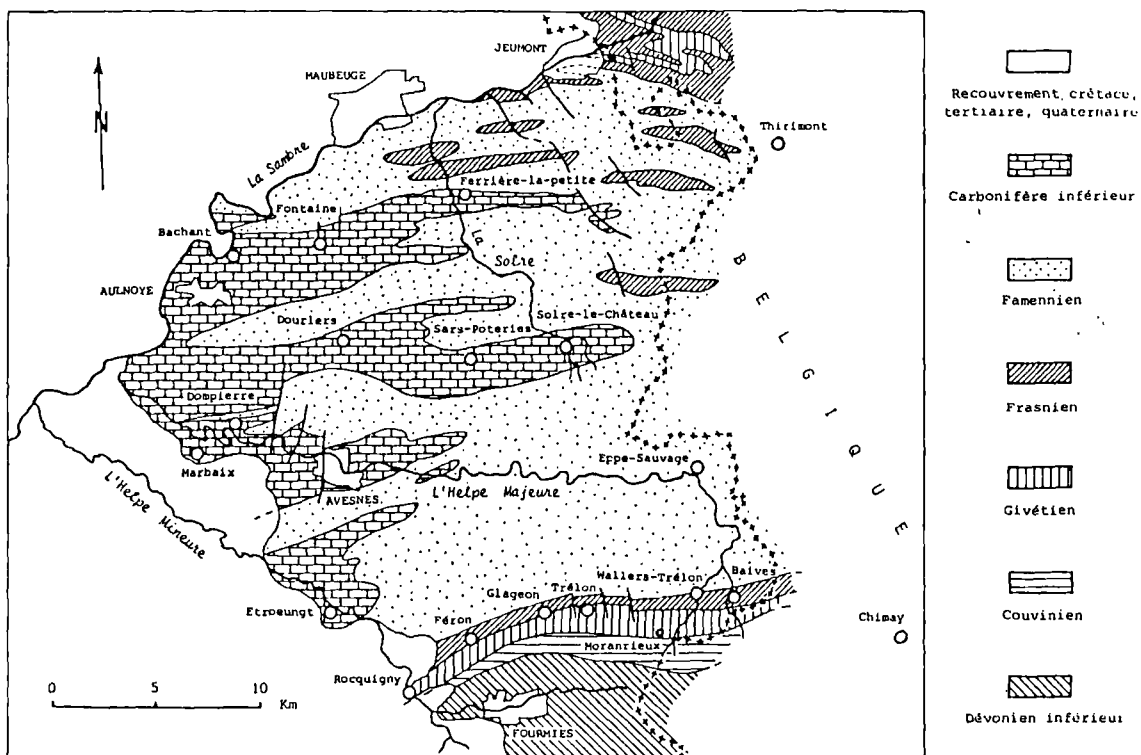


Fig. 2. — Carte géologique simplifiée de l'Avesnois (Crampon *et al.*, 1987).

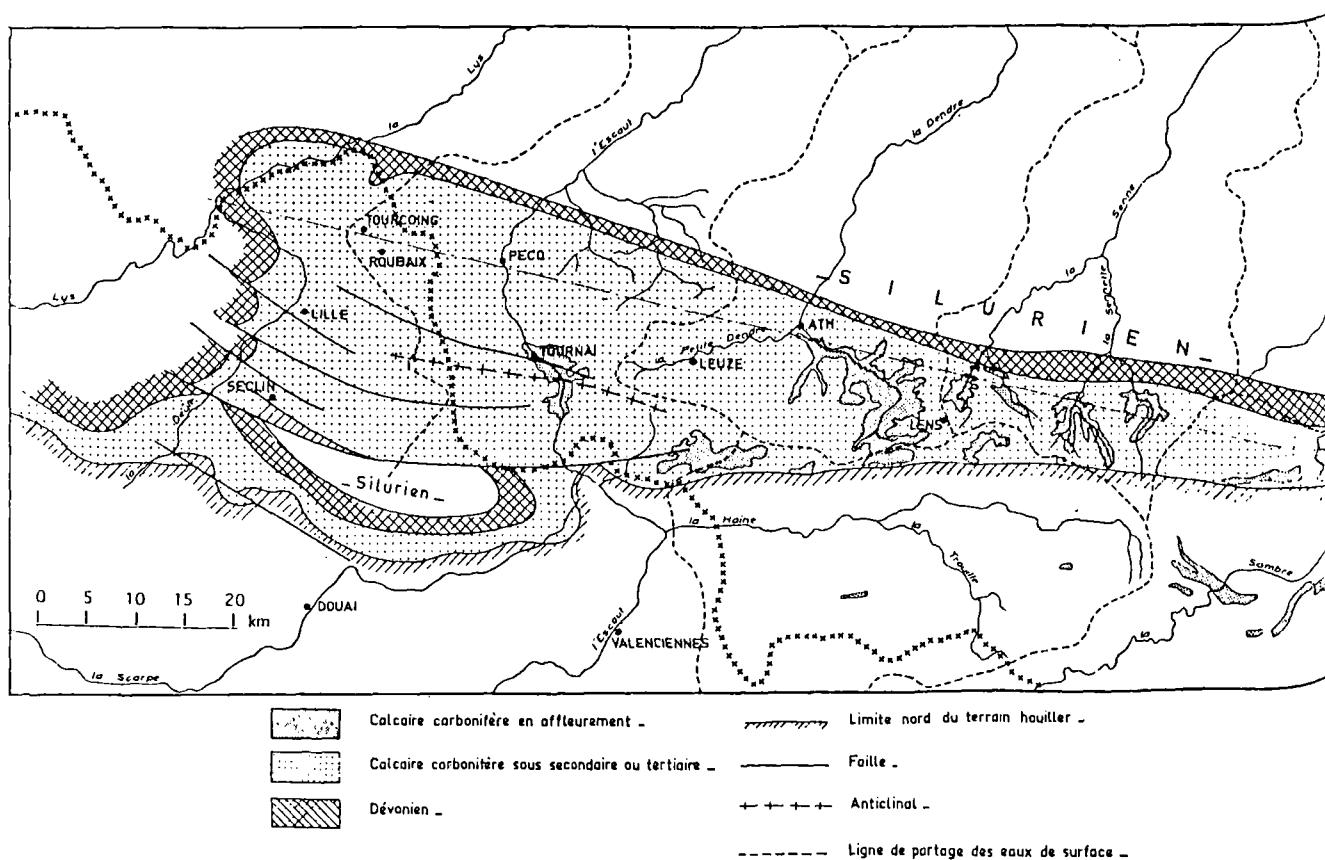


Fig. 3. — Carte géologique simplifiée du bassin hydrogéol. Franco-Belge (Youssof, 1973).

d'eau, soit directement par l'Escaut, soit par l'intermédiaire de la nappe de la Craie qui assure une partie de la recharge par drainance.

L'aquifère franco-belge des calcaires carbonifères contribue cependant encore pour 5 % aux prélèvements d'eau souterraine de la région NPC et est utilisé à 55 % pour l'alimentation en eau potable.

Hors de l'unité structurale précédente, les calcaires carbonifères réapparaissent à faible profondeur (62 m) à St Amand où les eaux thermo-minérales résultent d'un mélange d'eau profonde, infiltrée dans les affleurements calcaires belges, dissolvant au passage des évaporites déposées dans des karsts anciens, réchauffée en profondeur (à près de 70° C en Belgique) avant de s'injecter (par failles et drainance ascendante) dans la craie aquifère à la faveur d'un amincissement structural de son substratum imperméable.

Plus au Sud encore, les recherches pétrolières ont montré que l'envoyage occidental des calcaires carbonifères de l'Avesnois se poursuit en profondeur jusqu'à Bapaume. Mais on ignore encore tout de ce réservoir potentiel d'eau douce, thermo-minérale, voire géothermique.

#### 4) Les aquifères paléozoïques et jurassiques du Boulonnais

Extrémité S.E. de l'anticlinal du Weald, la demi-boutonnaire du Boulonnais laisse affleurer des formations jurassiques (Bajocien à Tithonien), recouvertes par endroit de dépôts wealdiens et, en bordure, d'Aptien-Albien. Dans la partie N.E. du Bas Boulonnais affleure le massif paléozoïque de Ferques (7 x 4 km) (fig. 4). L'ensemble est affecté de nombreuses failles subverticales, longitudinales N 100 à 120° E et transversales N 20 à 40° E. La fermeture périclinale de la demi-boutonnaire met en outre en évidence un abaissement d'axe vers l'Est, accentué au niveau de la bordure crayeuse par suite de sa discordance.

##### a) Les aquifères dévonien et carbonifère

Dans la partie N.E. du massif paléozoïque, la série monoclinale à fort pendage de l'unité autochtone (de Ferques) contient une assise calcaire givétienne puissante de 700 m, essentiellement drainée par un ruisseau et par l'exhaure de deux carrières.

Mais l'aquifère principal est constitué des assises carbonatées mississippiennes, dolomitiques à la base (Tournaisien-Viséen) puis calcaires (Viséen), tant de la partie supérieure affleurante de l'autochtone de Ferques, que de celle de l'allochtone du Haut-Banc. Il s'agit d'un aquifère essentiellement fissuré, peu karstifié, partiellement recouvert par les formations calcaires bathoniennes, transgressives et discordantes, soit en lambeaux discontinus, soit, vers le Sud, en une couverture plus large avec laquelle s'établit une certaine continuité hydraulique, au point que l'on ne peut plus alors considérer qu'une seule *nappe du Dogger-Primaire*.

Un seul captage d'AEP sollicite l'aquifère des calcaires viséens, par contre de plus en plus exploité pour ses matériaux (marbres et dolomies) à tel point que les exhaures, qui représentent près de 73 % des prélèvements et atteignent 8 à 9 hm<sup>3</sup>/an, engendrent des dépressions piézométriques de

plus de 100 m dans la nappe. Un bilan réalisé récemment sur le bassin carrier a montré que seulement 6,5 % du volume d'exhaure était soutiré de l'aquifère, la grande majorité provenant des pertes de ruisseaux (50,7%) et du ruissellement (42,8 %), ce qui met finalement en évidence la faible productivité de l'aquifère qui ne contribue qu'à 0,7 % aux prélèvements d'eau souterraine de la région NPC et n'est utilisé qu'à 27 % pour l'alimentation en eau potable.

##### b) Les aquifères jurassiques

Discordantes et transgressives vers l'Est sur le Paléozoïque, les assises jurassiques, bien qu'occupant près de 90% de la surface d'affleurement du Bas Boulonnais, ont une extension limitée puisque celle-ci ne dépasse guère celle de la boutonnière (l'Artois en est dépourvu).

La série jurassique du Boulonnais est en grande partie argileuse ou marneuse (225 m sur 345 m de puissance totale) avec des intercalations calcaires ou gréseuses qui constituent autant d'aquifères : calcaires bathoniens, puis calcaires et grès à différents niveaux de l'Oxfordien, du Kimméridgien et du Tithonien. Mais, peu épais (5 à 25 m), ces horizons aquifères ne possèdent pas d'affleurements suffisamment vastes pour renfermer des nappes puissantes. En raison de la grande diversité des terrains, les sources sont nombreuses. Les discontinuités dues au jeu des failles et au creusement des vallées amoindrissent le potentiel hydraulique. Néanmoins ces aquifères présentent un bon rendement dans les vallées lorsqu'ils sont recouverts par des alluvions riches en eau. C'est le cas des calcaires de l'Oxfordien (faciès Séquanien) dans le secteur de St Léonard, à Hesdigneul le long de la vallée de la Liane, des grès du Kimméridgien et du Tithonien au Nord de Wimereux ainsi que des calcaires du Dogger au Sud de Marquise en bordure de la vallée de la Slack.

Au total, les nappes du Jurassique ne produisent que 1 % des prélèvements d'eau souterraine de la région NPC et sont utilisées à 91 % pour l'eau potable locale.

#### 5) Les aquifères crétacés

##### a) L'aquifère du Crétacé inférieur

Après quelques dépôts continentaux, argiles et sables irrégulièrement distribués, caractérisant le Wealdien, les premières formations marines sont d'âge aptien puis albien avec, à la base, des sables verts (glauconieux) d'âge Aptien inférieur à Albien inférieur, recouverts par les argiles du Gault, d'âge Albien moyen à supérieur.

Dans le Boulonnais, en raison de la disposition anticlinale, l'aquifère des sables verts (17 à 20 m) n'est conservé qu'en bordure de la demi-boutonnaire, au pied de l'escarpement crayeux où elle donne lieu à des sources, parfois artésiennes, d'utilisation domestique ou maraîchère. Son extension sous couverture ne dépasse guère à l'Est celle de la boutonnière.

##### b) L'aquifère des craies du Crétacé supérieur

Après un bref recul, la mer s'est étendue du Cénomaniens au Sénonien sur la majeure partie de la région (Avesnois excepté), déposant des faciès crayeux plus précocement à l'Ouest qu'à l'Est. Elle a atteint son maximum au

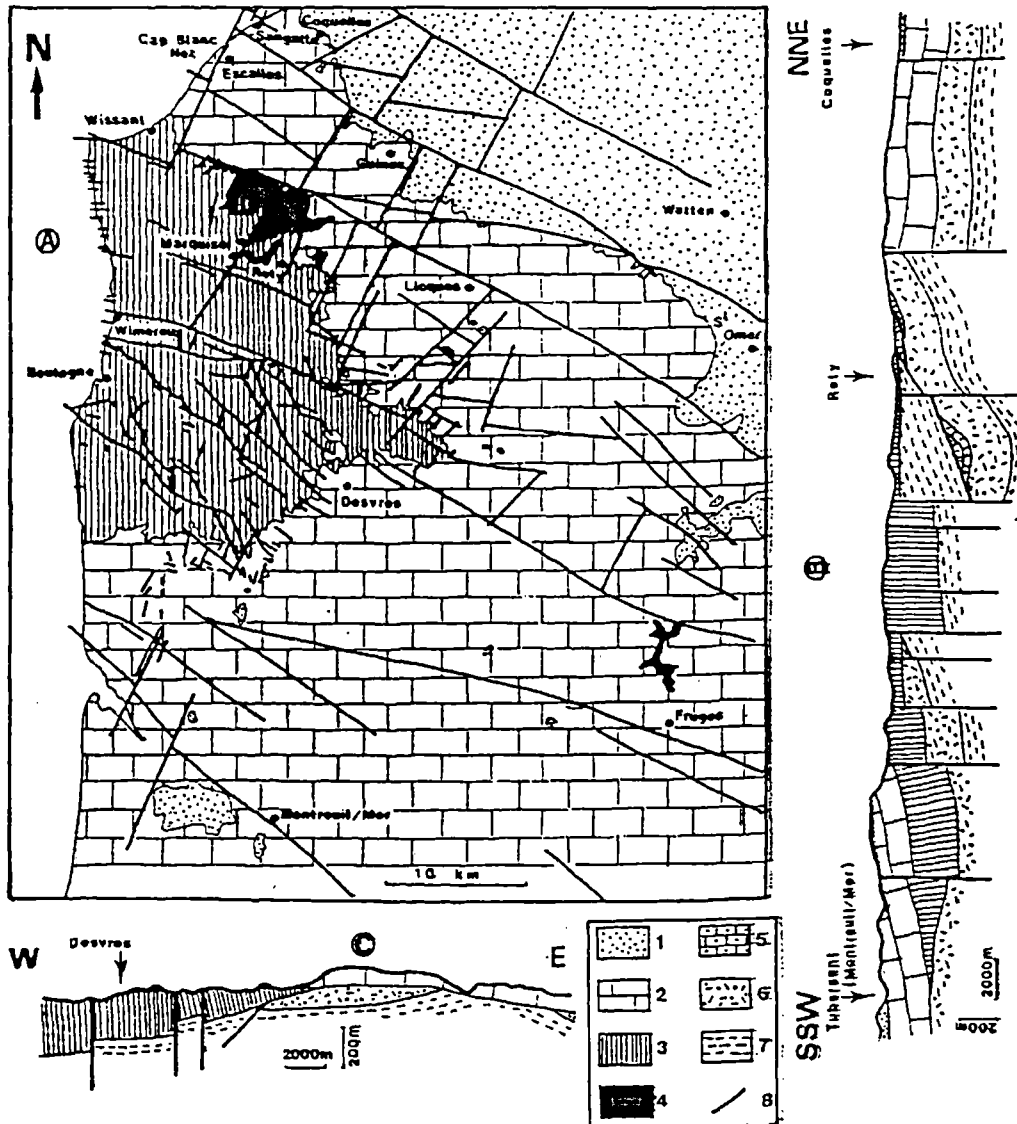


Fig. 4. — Géologie du Boulonnais et de ses abords (Colbeaux *et al.* 93).

A : Carte géologique, les failles représentées sont subverticales ; B : Coupe schématique subméridienne de la boutonnière ; C : Coupe schématique E-W de la bordure méridionale de la boutonnière du Boulonnais ; 1, Tertiaire ; 2, Crétacé ; 3, Jurassique ; 4, Paléozoïque indifférencié ; 5, Carbonifère ; 6, Dévonien ; 7, Silurien ; 8, failles.

Cénomaniens supérieurs et les dépôts transgressifs se réduisent fortement sur le dôme du Mélantois et aux abords de l'Avesnois.

Bien que s'étendant sur 90 % de la région Nord - Pas-de-Calais, les formations crayeuses ne sont aquifères que sur 74% de la superficie régionale et n'y affleurent que sur 60 % (fig. 5). La craie s'ennoie en effet sous le Bassin d'Orchies et plus profondément encore sous la plaine de Flandre où sa nappe devient captive et même artésienne avant de disparaître, semble-t-il, complètement par suite de la perte des qualités aquifères des formations crayeuses.

En raison des variations de faciès et d'épaisseur comme de la structure régionale, le réservoir crayeux n'est pas partout le même et n'est pas non plus unique.

En périphérie de la boutonnière du Boulonnais, l'aquifère est épais et continu du Cénomaniens moyen à supérieur au Sénonien, malgré la présence d'intercalations marneuses, mais la nappe est principalement contenue dans la craie cénomaniens en raison du relèvement anticlinal. Il y a toutefois continuité hydraulique avec les assises sus-jacentes du Turonien (supérieur et moyen) comme démontré par traçages.

Plus au S.E. (secteur de Fruges), le Cénomaniens supérieur encore crayeux et aquifère contient une nappe captive ou semi-captive sous couverture devenue peu perméable du Turonien inférieur, tandis que la craie du Turonien supérieur commence à se gorger d'une nappe libre. Plus à l'Est, le Cénomaniens devenu plus marneux ne renferme pratiquement plus de nappe exploitable.

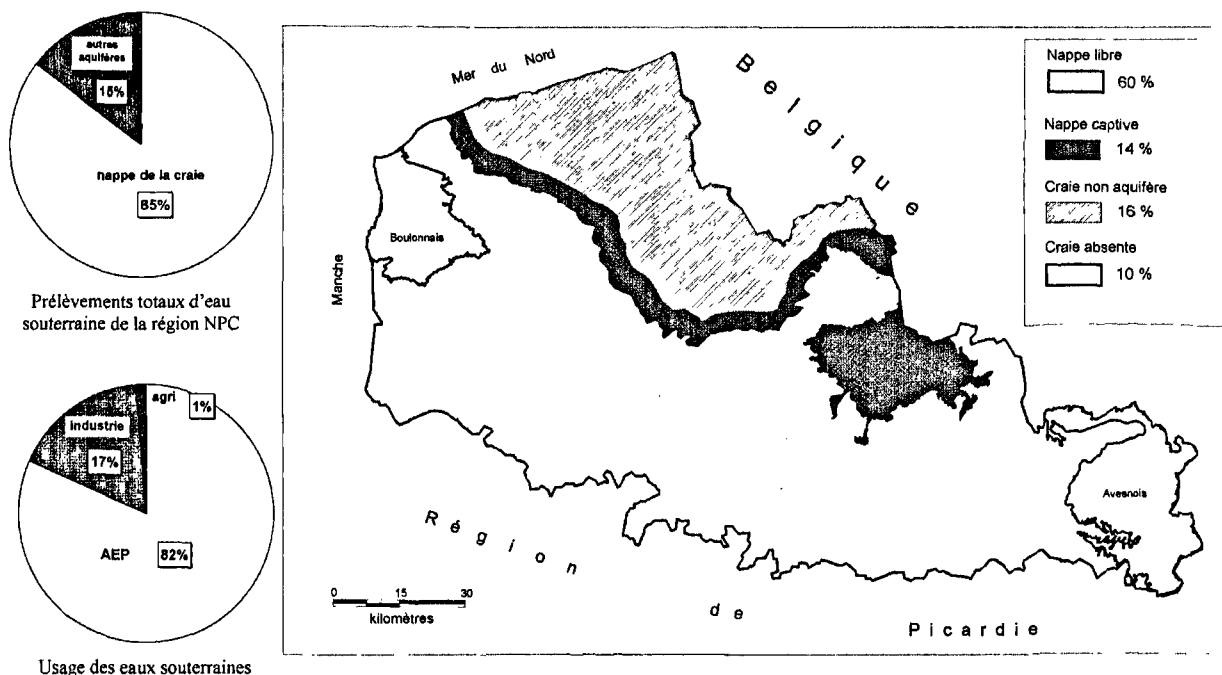


Fig. 5. — Extension de la Craie et % de prélèvements.

La craie du Turonien supérieur-Sénonien contient une nappe libre quasi continue dans la plaine d'Arras, le Béthunois, la région de Lens à Lille, le Douaisis et le Cambrésis jusqu'au Valenciennois.

En bordure du recouvrement tertiaire de la plaine des Flandres et du bassin d'Orchies, la nappe est contenue dans les horizons les plus élevés des craies franches du Turonien supérieur-Sénonien où elle est particulièrement productive, tant en nappe libre que captive sous le Thanétien inférieur argileux, dès lors que la distance aux affleurements ne dépasse pas quelques kilomètres. La nappe devient même artésienne (du nom de l'Artois) sur presque toute la limite S.E. de la plaine de Flandre, au bénéfice notamment des maraîchers et des cressiculteurs. Plus loin sous couverture, au coeur de la plaine des Flandres, la craie n'est pratiquement plus aquifère. Par contre, bien que captive, la nappe de la craie reste productive dans le bassin d'Orchies, même sous plus de 50 m de couverture.

La nappe de la Craie a produit en 2000 près de 300 millions de m<sup>3</sup>, représentant 85 % de la production d'eau souterraine, tous usages confondus, mais la productivité des puits ou forages varie régionalement en fonction des caractéristiques hydrodynamiques (T et S) de l'aquifère :

- la moyenne des débits maximaux de production est d'un peu plus de 95 m<sup>3</sup>/h et plus d'un forage sur trois (34 %) fournit un débit égal ou supérieur à 100 m<sup>3</sup>/h. Certains ouvrages permettent même de dépasser 600 m<sup>3</sup>/h. A l'inverse, d'autres ouvrages ne peuvent produire que quelques m<sup>3</sup>/h.

- les débits spécifiques s'échelonnent entre 0,15 et 1000 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup> (moyenne : 40 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.m<sup>-1</sup>).

Beaucoup de zones fortement productives (> 100 m<sup>3</sup>/h) sont déjà très exploitées, voire surexploitées, mais des ressources restent potentiellement disponibles dans des zones excédentaires ou autosuffisantes par rapport à l'infiltration efficace et aux risques de sécheresse.

La perte de productivité de la craie sous la plaine de Flandre a nécessité de faire appel à des ressources localisées en bordure des affleurements de l'Artois, pour alimenter des villes comme Dunkerque, Calais et Hazebrouck, avec des transferts (fig. 6) à longue distance (plus de 30 km de Houllemoule à Dunkerque). L'agglomération lilloise ne disposant plus sur place de suffisamment d'eau de bonne qualité, doit également faire appel à des ressources éloignées, à partir d'Aire-sur-la-Lys (43 km) ou du Douaisis, sans pour autant négliger ses champs captants au Sud de l'agglomération qui restent indispensables.

La nappe de la Craie (à 80 % libre et 20 % captive) est très majoritairement la première ressource en eau potable de la région : 76,5 % de la production totale d'eau potable (eau de surface comprise) et 89 % des prélèvements en eau souterraine pour ce même usage. 82 % des prélèvements dans la nappe de la Craie sont ainsi utilisés pour la consommation humaine, dont 32 % en nappe captive et 50 % en nappe libre. La réserve en eau mobilisable peut être estimée à quelque 3,2 milliards de m<sup>3</sup> (selon la valeur adoptée pour l'épaisseur transmissive moyenne).

Un bilan interannuel d'alimentation-écoulement a pu être établi pour la nappe de la Craie dans la région NPC, sans utiliser les approches habituelles de quantification de la pluie efficace (calcul d'ETP et d'ETR), ni de valeurs d'infiltration déduites de simulations numériques appliquées à un secteur limité de l'aquifère crayeux, mais en considérant les résultats pour validation.

Le principe de bilan est présenté sous forme d'organigramme (fig. 7). Les résultats sont établis en partant de la fin : en prenant en compte les débits moyens interannuels des cours d'eau en sortie de bassins versants crayeux, leurs débits minima à récurrence de 5 ans (assimilés à ceux des exutoires naturels de la nappe), les prélèvements avec les taux de restitution habituels selon les types d'usage

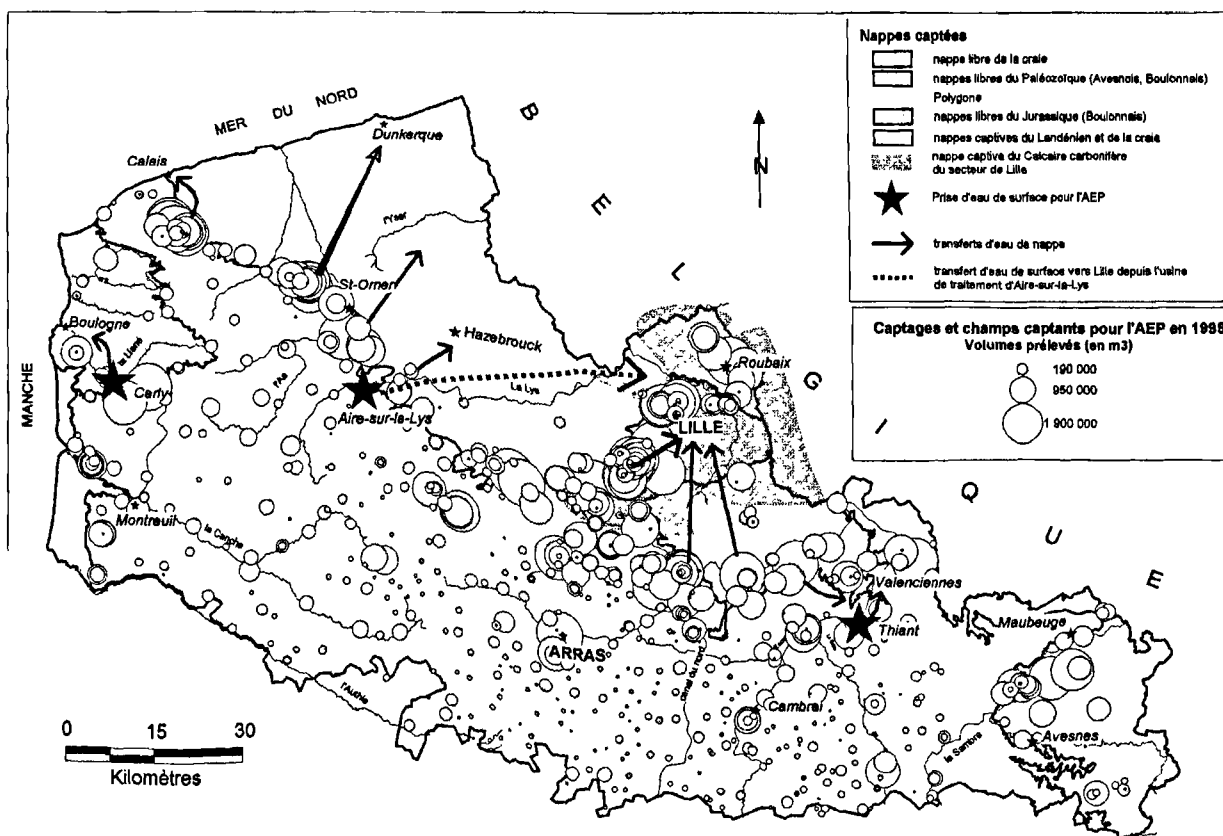


Fig. 6. — Prélèvements d'eau souterraine pour l'AEP (Atlas du Bassin AP, 1995).

et, bien entendu, la moyenne interannuelle des précipitations. La validation des résultats est établie en considérant la similitude des valeurs obtenues par d'autres méthodes : notamment pour l'infiltration (190 mm/an selon l'Agence de l'Eau ou 6 L.s<sup>-1</sup>.km<sup>-2</sup> selon la moyenne des modèles numériques), pour l'ETR (276 mm contre 265 à 274 par Turc) ou pour le ruissellement (11 % contre 12 %).

En admettant que l'infiltration (190 mm/an) corresponde à la ressource renouvelable, celle-ci peut être estimée à 1,4.10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>/an. Pour une réserve en eau mobilisable d'environ 3,2 milliards de m<sup>3</sup>, le taux moyen de renouvellement de la nappe de la Craie serait ainsi de l'ordre de 44 % et la durée moyenne de renouvellement de 2,3 ans.

**6) L'aquifère des sables thanétiens (ex-landéniens)**

La partie supérieure du Thanétien aquifère comprend des sables marins fins et glauconieux, surmontés de sables fluviomarins à continentaux. L'ensemble, qui porte le nom régional de *Sables d'Ostricourt*, est aquifère et repose généralement sur des formations plus argileuses, dites *argile de Louvil*.

Outre des affleurements conservés localement sur les régions crayeuses et pouvant donner lieu à de petites nappes perchées, le Thanétien aquifère (fig.8) s'étend en Flandres (2 700 km<sup>2</sup> dont 366 en affleurement) et dans le Bassin d'Orchies (600 km<sup>2</sup> dont 425 en affleurement), deux cuvettes séparées par le dôme du Mélançois, mais parties intégrantes et méridionale du vaste bassin sédimentaire éocène franco-belge.

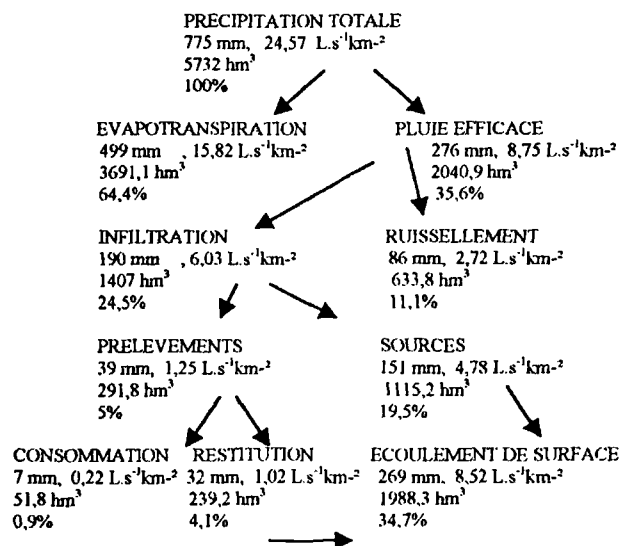


Fig. 7. — Bilan global interannuel de la nappe de la Craie.

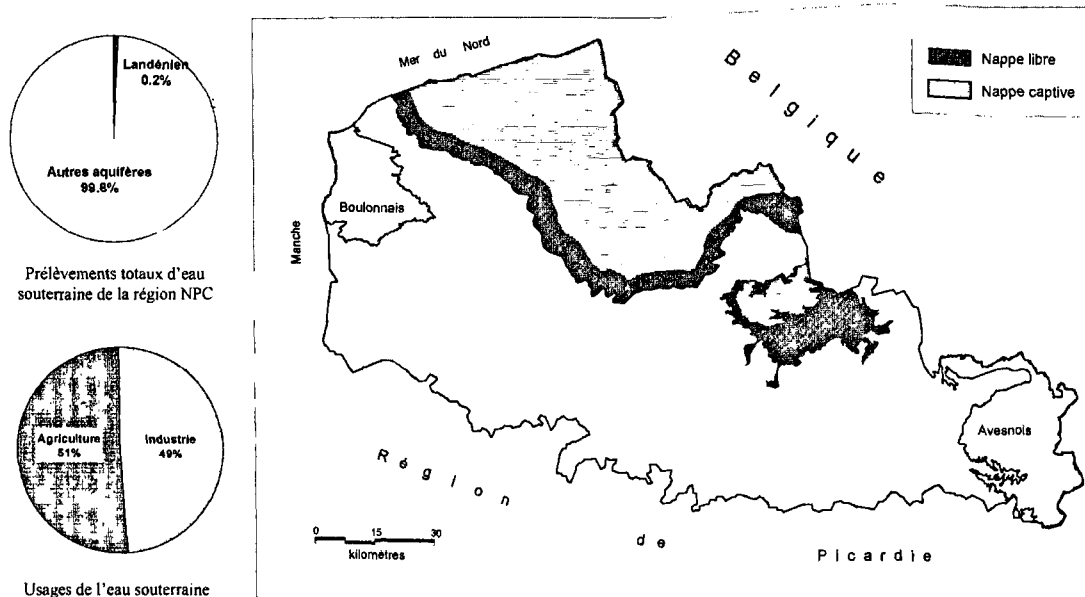


Fig. 8. — Extension des sables thanétiens et % de prélèvements.

La grande extension de l'argile des Flandres (Yprésien), superposée à la majeure partie de l'aquifère sableux, surtout dans le Bassin des Flandres, fait que le régime captif prédomine largement, le régime libre étant limité aux zones d'affleurements périphériques, essentiellement méridionaux.

L'épaisseur moyenne de l'aquifère oscille entre 10 et 15 m tandis que l'épaisseur totale de l'étage Thanétien atteint une quarantaine de mètres. Avec une porosité efficace de l'ordre de 20 %, la réserve est considérable (estimée à près de 6,6 milliards de m<sup>3</sup>, soit le double de celle de la Craie), avec un renouvellement annuel de l'ordre de 110 millions de m<sup>3</sup>. Toutefois, les teneurs en argile et la finesse des sables marins confèrent à l'aquifère une perméabilité faible ( $2.10^{-5}$  m/s) qui ne permet guère de produire plus de 10 m<sup>3</sup>/h par forage.

Utilisée autrefois pour des besoins domestiques par de nombreux puits, disséminés sur les zones d'affleurement, la nappe des sables thanétien est aujourd'hui essentiellement exploitée dans la partie captive du Bassin des Flandres, moitié pour l'industrie, moitié pour l'irrigation et l'élevage. Mais le total des prélèvements n'excède pas 0,2 % de la production en eau souterraine du Nord-Pas-de-Calais.

### 7) Les prélèvements

La carte des principaux prélèvements d'eau souterraine pour l'AEP (fig. 6) souligne la densité des captages et l'importance des volumes prélevés (en 1995) dans la nappe de la Craie, en particulier en limite de recouvrement tertiaire, et dans les Calcaires Carbonifères au Nord de Lille.

Les prélèvements effectués en 2000 (données de l'Agence de l'Eau Artois-Picardie) sont récapitulés par aquifère et par type d'usage (Tabl. I). On peut y relever que la région NPC satisfait l'ensemble de ses besoins en eau, à 63 % à partir des nappes et 37 % à partir d'eau de surface ; son eau potable est à 86 % d'origine souterraine, la nappe de la craie produisant près des 9/10 de cette eau souterraine potable.

### III. — VARIATIONS DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES ET DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES

#### 1) Analyse de la variation du niveau des nappes d'eau souterraine

La variation du niveau de la surface des nappes d'eau souterraine (ou surface liée à une pression d'eau = surface piézométrique) d'un réservoir aquifère correspond à un état d'équilibre de plusieurs éléments dits dynamiques. Ce niveau piézométrique peut être rencontré assez rapidement sous le sol lorsque le terrain qui reçoit la pluie efficace est en communication avec l'atmosphère.

On a creusé naguère manuellement des puits de dix à vingt mètres de profondeur dans la craie avec généralement une tranche d'eau d'un ou de deux mètres en fond d'ouvrage. Lorsqu'il faut traverser une couche d'argile épaisse avant d'atteindre la nappe des sables cette dernière est très souvent sous pression et son niveau peut brutalement remonter dans le tubage des forages ou même jaillir à la surface du sol.

La surveillance des niveaux a été initiée par le Service Géologique Régional du BRGM à partir de 1956 avec l'établissement de fichiers et de cartes piézométriques synthétiques dès 1965. On éte reconstituées des variations de niveau dans la nappe de la craie depuis 1900 comme par exemple sur le puits des ateliers de la SNCF à Hellemmes (fig.9), ou de celui de la station SNCF de Tincques dès 1903 (fig.10).

Des bulletins ont été régulièrement édités pour 164 points du réseau piézométrique jusqu'en 2000. Actuellement les mesures sont consultables par internet (Agence du Bassin et BRGM).

Les fluctuations piézométriques sont la conséquence du croisement de plusieurs causes : l'infiltration des eaux de pluies, les débits extraits par pompage ou parfois réinjectés dans le cas de l'alimentation artificielle (cas des bassins

	Usage:	A.E.P.	%	%	%	Industrie	%	%	%	Agriculture	%	%	%	Total	%	%	%	%
Eaux de surface		43 029.2	21.2		13.9	150 843.9	74.3		68.4	9 097.9	4.5		69.6	202 971.0	100.0			37.4
Eaux souterraines	<b>Aquifère</b>																	
	Quaternaire	500.5	59.7	0.2	0.2	317.8	37.9	0.5	0.1	20.2	2.4	0.5	0.2	838.4	100.0			0.2
	Landénien	0.0	0.0	0.0	0.0	278.7	48.9	0.4	0.1	291.8	51.1	7.3	2.2	570.5	100.0			0.2
	Craie libre	144 190.1	79.8	54.3	46.7	33 496.3	18.5	48.1	15.2	3 024.1	1.7	76.1	23.1	180 710.5	100.0	62.5	53.3	33.3
	Craie captive	92 031.1	85.0	34.6	29.8	15 557.3	14.4	22.3	7.1	625.7	0.6	15.7	4.8	108 214.2	100.0	37.5	31.9	20.0
	<b>Total Craie</b>	<b>236 221.2</b>	<b>81.8</b>	<b>88.9</b>	<b>76.5</b>	<b>49 053.6</b>	<b>17.0</b>	<b>70.4</b>	<b>22.2</b>	<b>3 649.8</b>	<b>1.3</b>	<b>91.9</b>	<b>27.9</b>	<b>288 924.6</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>85.1</b>	<b>53.3</b>
	Jurassique Boulonnais	3 412.4	90.9	1.3	1.1	340.0	9.1	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	3 752.4	100.0			1.1
	Paléozoïque Boulonnais	631.4	27.3	0.2	0.2	1 683.3	72.7	2.4	0.8	0.0	0.0	0.0	0.0	2 314.7	100.0			0.7
	Paléozoïque Secteur Lille	10 213.8	54.8	3.8	3.3	8 410.3	45.1	12.1	3.8	11.3	0.1	0.3	0.1	18 635.4	100.0			5.5
	Paléozoïque Avesnois	14 691.8	60.4	5.5	4.8	9 613.0	39.6	13.8	4.4	0.0	0.0	0.0	0.0	24 304.8	100.0			7.2
	<b>Total eaux souterraines</b>	<b>265 671.1</b>	<b>78.3</b>	<b>100.0</b>	<b>86.1</b>	<b>69 696.8</b>	<b>20.5</b>	<b>100.0</b>	<b>31.6</b>	<b>3 973.1</b>	<b>1.2</b>	<b>100.0</b>	<b>30.4</b>	<b>339 340.9</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>62.6</b>
	<b>Total eaux de surface + eaux souterraines</b>	<b>308 700.3</b>	<b>56.9</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>220 540.7</b>	<b>40.7</b>	<b>100.0</b>	<b>13 071.0</b>	<b>2.4</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>542 311.9</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>	<b>100.0</b>

Tabl. I. — Prélèv. annuels d'eau dans la région NPC en milliers de m<sup>3</sup> (année 2000).

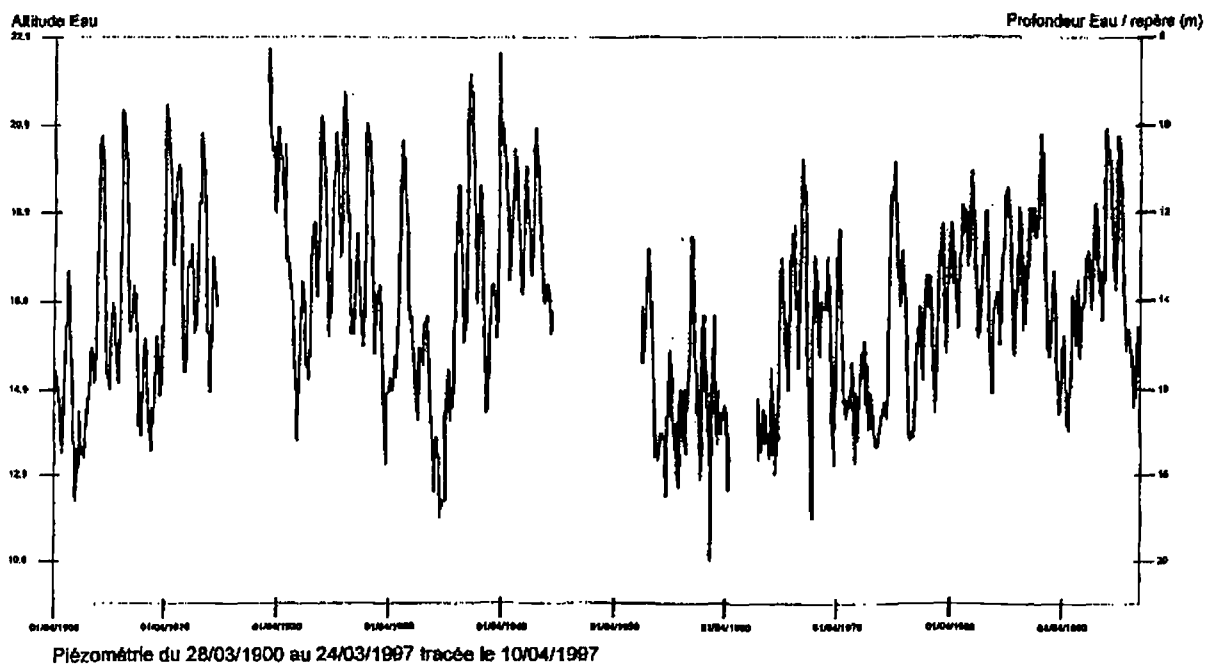


Fig. 9. — Evolution des niveaux piézométriques – Station SNCF d'Hellemmes (Craie) (BRGM).

d'alimentation creusés dans la craie sur le site d'Houille et Moulle).

Parfois des liaisons avec des rivières ou d'autres aquifères (nappes alluviales sur la craie par exemple) peuvent perturber





Réseau: RB  
 Prof. Ouvrage: 30  
 Côte du Repère: 116.5  
 Côte du Sol: 116.5  
 Code Nappe: ART02...+L  
 Système Aquifère: 001G  
 Nom Nappe: CRAIE, CRAIE 1 -NAPPE DE LA CRAIE

Indice BRGM: 00254X0003  
 Désignation: P1  
 Commune: TINCQUES  
 Lieu dit: STATION SNCF  
 Département: PAS-DE-CALAIS (62)  
 Région: SGR/NPC

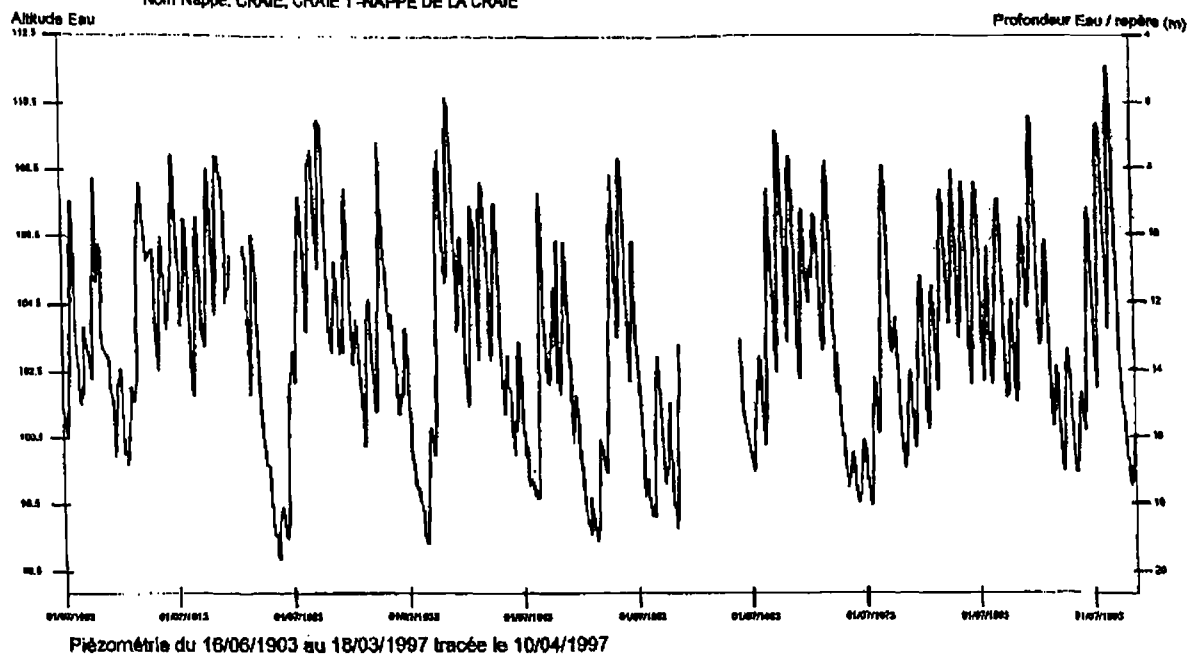


Fig. 10. — Evolution des niveaux piézométriques –Station SNCF de Tincques (Craie) (BRGM).

les variations des niveaux piézométriques avec l'apparition de phénomènes de drainance ,de pertes ou d'émergences.

Les variations des niveaux comme du débit des sources sont significatives de l'évolution des réserves en eau souterraine d'un réservoir aquifère. On a ainsi le moyen de surveiller l'état physique mais aussi chimique des eaux souterraines.

L'examen des variations piézométriques permet de répondre aux préoccupations suivantes :

- qu'elle est la répercussion à l'échelle interannuelle des prélèvements effectués sur les réserves en eau souterraine peu ou pas renouvelables (cas des aquifères captifs profonds) ?,
- qu'elle est l'influence des cycles climatologiques (sécheresse) sur l'évolution du niveau des nappes ?,
- qu'elles sont les relations hydrauliques entre des nappes superposées (drainance verticale) ou avec le réseau hydrologique (drainage ou réalimentation) ?,
- comment sont modifiés les directions ou le sens des écoulements souterrains à la suite de la mise en place ou de l'abandon d'un champ captif ?

C'est à partir des documents piézométriques qu'il est possible soit qualitativement soit quantitativement de répondre à ces questions.

## 2) Exemples choisis

Le lecteur intéressé peut se rapprocher du service géologique régional du BRGM Nord-Pas-de-Calais pour

examiner les graphiques piézométriques qui sont analysés et commentés ci-après.

### a) Nappes des Calcaires paléozoïques

Dans la région lilloise la nappe des calcaires du Carbonifère possède surtout un régime captif, les points d'observation sont à grande distance (environ 25 km) des affleurements situés en Belgique (région de Tournai).

Dans le secteur le plus déprimé de la nappe du calcaire carbonifère comme sur le forage de Bondues (fig. 11) l'on constate une chute graduelle des niveaux (1 m /an) depuis 1964 avec une accélération depuis 1971 (2 m /an) à mettre en relation avec l'exploitation intensive de la nappe et un fort déficit d'alimentation en liaison avec un bassin versant à l'affleurement très petit. On remarque une remontée saisonnière en juillet - août consécutive à l'arrêt des activités industrielles.

La baisse continue de la nappe du Calcaire carbonifère depuis 1945 au rythme de 1,5 m par an est à l'origine d'une recherche fine du bilan de la nappe et d'une gestion des ressources en eau qui s'est avérée une nécessité urgente entre la Belgique et la France.

Des effondrements karstiques de grande dimension (diamètre de 15 à 20 m) sont apparus aléatoirement à travers les alluvions de l'Escaut qui reposent directement sur les calcaires carbonifères au Nord de Tournai mais aussi et plus récemment dans les régions sous couverture crétacée. Ceux de l'hiver 1976-77 ont mis en liaison l'Escaut avec la nappe



Réseau: RB  
 Prof. Ouvrage: 168.53  
 Côte du Repère: 27.94  
 Côte du Sol: 29.8  
 Code Nappe: FLAD6,.....DC  
 Système Aquifère: 202  
 Nom Nappe: CALCAIRE CARBONIFERE

Indice BRGM: 00143C0079  
 Désignation: F1  
 Commune: BONDUES  
 Lieu dit: ROUTE NATIONALE LA PAYELLE  
 Département: NORD (59)  
 Région: SGR/NPC

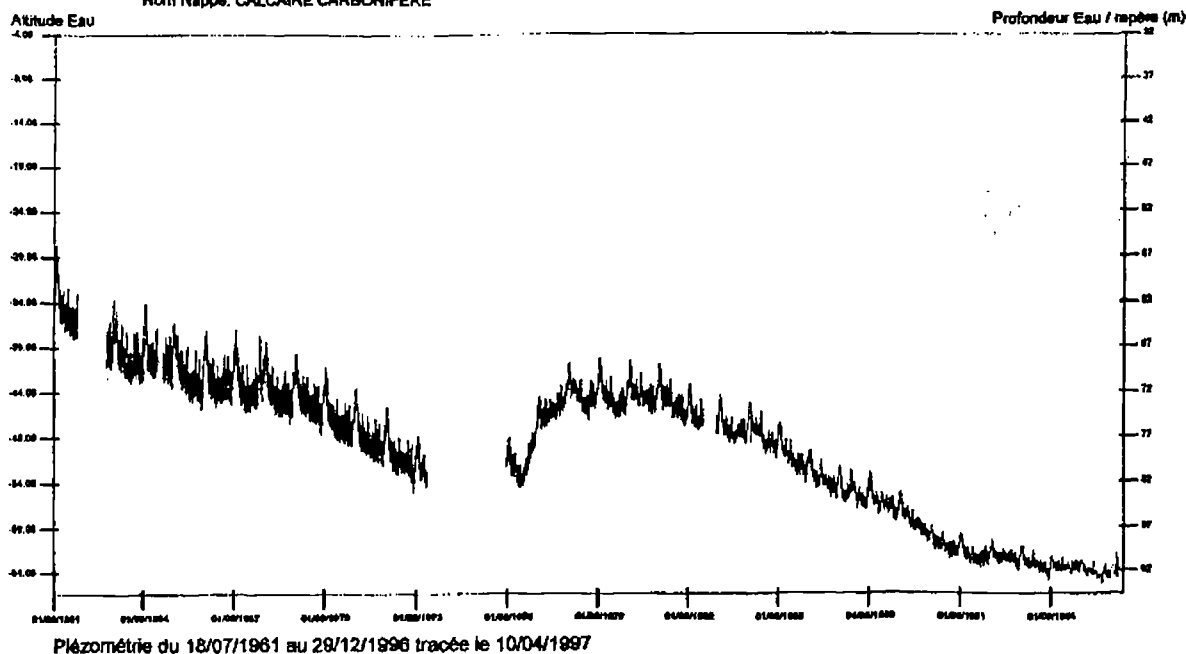


Fig. 11. — Evolution des niveaux piézométriques—Station de Bondues (Calcaire) (BRGM).

et induit une remontée de celle-ci de 8 mètres environ. Après plusieurs tentatives de réalimentation, l'une par bassins d'infiltration, l'autre par puits, dans le secteur de Tournai, le choix retenu actuellement en Belgique est de réduire les prélèvements dans la partie surexploitée de la nappe et de compenser cette réduction par une amenée d'eau traitée provenant de l'exhaure des carrières. Un débit complémentaire est fourni par des puits implantés au S.E. de Tournai.

Dans l'Est de la région comme à Dompierre-sur-Helpe la nappe libre du calcaire carbonifère réagit directement aux cycles des précipitations.

b) *Nappes de la Craie :*

La chronique piézométrique la plus longue est celle des Hudions à Rieulay dans la vallée de la Scarpe où l'aquifère crayeux est captif sous les recouvrements tertiaire et alluvionnaire. On remarque dès 1950 l'intensification des prélèvements qui correspondent à une demande forte en eau potable liée à l'afflux migratoire d'une population et de la modernisation de l'habitat du pays minier.

A Nort-Leulinghem au N.O. du pays audomarois et à la limite des Flandres argileuses l'évolution des niveaux de la nappe de la craie sur le plateau présente d'amples fluctuations marquées par les sécheresses de 1957 à 1961, 1972 à 1975 et celles de 1996 à 1998.

c) *Nappes du Jurassique du Boulonnais*

La mise en exploitation des forages A.E.P. de la région boulonnaise à St Léonard se répercute intensément dès 1972 sur les niveaux de la nappe du Jurassique sur lesquels se superpose la sécheresse de 1972 à 1975. Les points hauts de la piézométrie indiquent une alimentation par les alluvions de la Liane .

d) *Nappe des Sables thanétiens*

La nappe libre des sables à Bouvignies dans le bassin d'Orchies est marquée par une variation saccadée des niveaux d'eau à fleur de sol dans les marais de la Scarpe sous l'influence des pluies .

e) *Aquifères quaternaires*

Le sables dunaires du Calais sont également sous l'influence des pluies.

La nappe des alluvions de la Sambre à Catillon sur Sambre est étroitement soumise à l'incidence des sécheresses et une forte sensibilisation aux précipitations qui affectent également les débits de la Sambre.

3) **Analyse de la variation de la qualité chimique des nappes d'eau souterraine**

Depuis l'origine de la mise en place du réseau piézométrique on s'est intéressé à la qualité physico-chimique

et bactériologique des eaux surtout pour des raisons sanitaires et dans le cadre de la mise en place des périmètres de protection des captages d'adduction d'eau potable. Les directions départementales de l'action sanitaire et sociale surveillent régulièrement la qualité des eaux à destination de la distribution publique.

Des synthèses régionales ont permis de montrer les impacts de l'activité humaine, rejets des eaux usées et industrielles, infiltration diffuse des produits phytosanitaires et fertilisants agricoles, percolation des eaux de lessivage indésirables des stockages de déchets vers les eaux souterraines et superficielles, accidents avec déversement sur les axes routiers et ferrés, incendies de bâtiments de stockage de produits dangereux, fuites des canalisations de produits chimiques ou d'eaux usées.

La prévision de l'évolution spatiale mais aussi au cours du temps est un impératif pour prévoir la mise en place de dispositifs palliatifs ou de dépollution et cela en fonction des sens d'écoulement des eaux souterraines.

Les premières cartes de synthèse sur l'impact régional des pollutions ont été établies depuis 1981 à partir des concentrations en nitrates, en chlorures et en sulfates dans les eaux souterraines de la craie (voir archives du Service Géologique Régional du BRGM). On constate la superposition des influences des grandes zones urbaines avec la région lilloise et le bassin minier. Des polluants comme les nitrates croissent régulièrement au rythme de 2 mg/l et par an. On invoque à la fois l'urbanisation, l'agriculture et les défauts d'assainissement industriels. L'apparition généralisée des herbicides comme l'atrazine (limitée à 0,10 µg/l dans l'eau distribuée) et son dérivé toxique le déséthyl-atrazine a posé le problème de son interdiction, au niveau des pratiques agricoles, qui sera effective en 2003.

Les nitrates s'étendent progressivement dans la zone agricole au sud d'une ligne Arras-Cambrai. Des poches isolées apparaissent dans les bassins occidentaux de l'Artois. Les chlorures et les sulfates sont des marqueurs de la pollution industrielle et urbaine. Il faut noter cependant le

caractère souvent sulfaté des eaux souterraines du valenciennois où la nappe de la craie est soumise à des venues d'eaux hydrothermales profondes.

Les conséquences des activités humaines sur la qualité de la nappe de la craie se rencontrent presque exclusivement dans les secteurs où la nappe est libre, plus particulièrement dans ceux où l'urbanisation est dense et l'industrie développée. Comme c'est aussi dans ces zones que les captages sont les plus nombreux et les plus intensifs, la surexploitation peut engendrer l'inversion d'une partie au moins des échanges nappe-rivière (cours d'eau drainant devenant infiltrant, fuites de canaux) ou l'augmentation de la drainance à partir d'une nappe alluviale polluée, aboutissant parfois à l'abandon de certains captages (champs captants au Sud de Lille). Les zones rurales à culture ou élevage intensifs sont également à l'origine de contaminations importantes, lorsque la nappe est libre. Mais il y est parfois difficile de distinguer les contaminations diffuses des contaminations ou pollutions locales.

#### IV. — CONCLUSIONS

La région du Nord et du Pas-de-Calais est riche par sa diversité hydrogéologique et l'eau souterraine y est abondante. Il faut cependant noter que la forte dégradation de la qualité des eaux des grandes nappes libres de la craie depuis les années 1980 a obligé les collectivités territoriales à abandonner certains champs captants ou à faire appel à des ressources lointaines comme dans le cas des eaux superficielles de la vallée de la Lys amenées vers la métropole Lilloise.

Les ressources en eau de qualité vont devenir de plus en plus rares et les sites potentiellement aquifères totalement utilisés. La connaissance du milieu souterrain nécessitera des moyens d'investigation de plus en plus lourds en particulier pour mieux apprécier l'évolution future de nos ressources à long terme.

#### BIBLIOGRAPHIE

- AGENCE DE L'EAU ARTOIS-PICARDIE (1995) - L'Atlas du Bassin Artois-Picardie, 52 p.
- ARNOULT Ph. (1981) - Gestion quantitative et qualitative des eaux souterraines en zone agricole - Application à la nappe de la Craie de l'Artois et du Cambrésis. Thèse 3ème Cycle, Univ. Sci. et Techn. Lille, 182 p., 2 annexes.
- BAILLON K., LACHEREZ S., SIX P., CAULIER P., RISBOURG D. & MAILLOT H. (2001) - Gestion de la nappe de la craie dans le nord de la France. Premiers résultats sur le transfert des nitrates d'origine agricole dans le non-saturé de l'arrondissement de Cambrai- TSM N°4, avril 2001, 96, 33-47
- BECKELYNCK J. (1981) - Traitement régionalisé des paramètres contribuant à la gestion des nappes - Application à la modélisation de la nappe de la Craie dans le bassin de l'Aa et de la moyenne Lys (région Nord-Pas de Calais). Thèse 3ème Cycle, Univ. Sci. et Techn. Lille, 140 p., 12 annexes.
- BECKELYNCK J., BESBES M., COMBES P., HUBERT P., DE MARSILY G., TALBOT A. (1983) - Pour une gestion intégrée des ressources en eau souterraine et superficielle. Le cas de l'alimentation en eau potable de la Métropole lilloise (Nord, France). *Hydrogéologie-Géologie de l'Ingénieur*, 1983, 3, 183-193.
- BERNARD D. (1979) - Contribution à l'étude hydrogéochimique de la nappe de la craie dans le Nord de la France. Etat et acquisition du chimisme de l'eau. Thèse 3ème Cycle, Univ. Sci. et Techn. Lille, 179 p., 12 annexes.
- BRACQ P. (1994) - L'effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux - Apports de l'analyse morphostructurale. Thèse Doct., Univ. Sci. et Technol. Lille (1992), Publication n° 21, Soc. géol. Nord, 244 p.
- BRAILLON J.M. (1976) - Contribution à l'étude des caractères hydrogéologiques des régions minières et lilloise (Nord-Pas-de-Calais) en vue de leur synthèse cartographique. Thèse 3ème Cycle, Univ. Sci. et Techn. Lille, 153 p., 12 annexes.

- CAOUS J.Y. (1993) - Taux d'utilisation des aquifères crayeux du bassin Artois-Picardie. *Hydrogéologie*, 1993, 2, 171-178.
- CAOUS J.Y. (1995) - Soutien des étiages d'une rivière par surexploitation de la nappe d'eau souterraine. Quelques constatations et remarques à propos de l'utilisation de cette technique dans le haut bassin de la Lys (Pas-de-Calais) au cours de la dernière sécheresse. *Hydrogéologie*, 1995, 1, 43-48.
- CARLIER E. (1983) - Influence de la fracturation sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif des calcaires paléozoïques de l'Avesnois (Nord). Thèse 3ème Cycle, Univ. Sci. et Techn. Lille, 224 p., 10 annexes.
- CAULIER P. (1974) - Etude des faciès de la Craie et de leurs caractéristiques hydrauliques dans la région du Nord. Thèse 3ème Cycle, Univ. Sci. et Techn. Lille, 156 p., 7 annexes, 32 pl. h.t.
- COLBEAUX J. -P. & MANIA J. (1976) - Relations entre la fracturation et l'écoulement des eaux superficielles et souterraines en pays crayeux au Cran d'Escalles. Application à l'Artois. 2ème Coll. Internat. d'Hydrologie en Pays Calcaire, Besançon, Ann. Scient. Univ. Besançon, Géol., 25, 3è sér., 179-194.
- CRAMPON N., DROZ B. & POREL G. (1982) - Complémentarité des traçages d'essai et des études hydrodynamiques pour la connaissance de la répartition spatiale des caractéristiques d'un milieu calcaire fissuré - Exemple de la Craie sur le site expérimental de Béthune. Coll. Les Milieux Discontinus en Hydrogéologie, Orléans, 16-17 novembre 1982, Document BRGM n°45, 233-252.
- CRAMPON N., CARLIER E., COLBEAUX J.P., DROZ B. & LEMPEREUR R. (1987) - Guides structuraux de l'écoulement souterrain dans les formations carbonatées de l'Avesnois (Nord de la France). *Bull. Soc. géol. France*, 1987, 8, III, n° 4, 783-796.
- CRAMPON N., ROUX J.C. & BRACQ P. (1993) - Chapter 7 "France", p.113-152, in "Hydrogeology of the Chalk of the North-West Europe" edited by Downing R. A., Price M. & Jones G. P. Oxford University Press, London, 300 p.
- CRAMPON N., ANOUAR K., BRACQ P., CARLIER E., DZIKOWSKI M., HANICH L., POREL G. & WANG H.Q. (1994) - Transport in groundwater flow - Researches on characterization of solute transport in relation with aquifer structure and flow conditions. *Trends in Hydrology*, 1, 257-266.
- DELPORTE B. (1979) - Traitement de l'information hydrogéologique, socio-économique et économique. Application au Bassin de la Sambre (Nord de la France). Thèse 3ème Cycle, Univ. Sci. et Techn. Lille, 202 p., 7 annexes.
- DEVRED D. (1989) - Etude pluviométrique du bassin de la Sambre - Etude hydrologique du sous-bassin de la Solre. Thèse Doct., Univ. Sci. et Techn. Lille, 382 p., 2 annexes.
- DROZ B. (1985) - Influence de la structure et de la nature des terrains du Valenciennois sur la qualité de la nappe de la Craie (Nord de la France) - Apport du krigeage à l'hydrochimie régionale - Gestion qualitative des eaux souterraines. Thèse 3ème Cycle, Univ. Sci. et Techn. Lille, 205 p., 7 annexes.
- GULINCK M. & LEGRAND R. (1969) - La nappe aquifère franco-belge du Calcaire carbonifère. *Bull. S.B.G.*, t. 78.
- LALLAHEM S. (2003) - Structure et Modélisation hydrodynamique des eaux Souterraines- Application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris, *Publication n° 32, Société Géologique du Nord*, 187 p.
- LIBESSART A. (1997) - La nappe des sables du Thanétien des Flandres. Elaboration d'une carte piézométrique et évaluation de la qualité. Mémoire DESS Géode (Génie Géologique de l'Environnement), 43 p., 10 annexes.
- LOUCHE B. (1997) - Limites littorales de la nappe de la Craie dans la Région Nord-Pas de Calais - Relations eaux souterraines - eaux superficielles - mer. Thèse Doct., Univ. Sci. et Techn. Lille (1996), *Publication n° 24 Soc. géol. Nord (1997)*, 249 p., 2 annexes.
- MANIA J. (1976) - Modèle transitoire de la nappe du calcaire carbonifère de la région de Lille (Nord) à Tournai (Belgique). Situation de l'alimentation artificielle. *Bull. B.R.G.M. (2° sér.)*, Section III, n° 1/2, 47-61.
- MANIA J. (1978) - Gestion des systèmes aquifères. Application au Nord de la France. Thèse Doctorat d'Etat Univ. Sci. et Techn. Lille (1977) et Mémoire n° XV, *Soc. géol. Nord*, 228 p.
- MAQSOU A. (1996) - Approche hydrogéologique et hydrochimique du caractère karstique éventuel d'hydrosystèmes souterrains de la Craie du Bassin de Paris. Thèse Doct., Univ. Sci. et Techn. Lille, 324 p.
- POREL G. (1988) - Transfert de soluté en aquifère crayeux. Causes de modifications des résultats de traçages. Thèse Doct., Univ. Sci. et Techn. Lille, 460 p., 8 annexes.
- TILLIE B. (1980) - Nappe de la Craie du Bassin minier du Nord-Pas de Calais (zone médiane et occidentale) - Acquisition et traitement des données - Modélisation des écoulements souterrains. Thèse 3ème Cycle, Univ. Sci. et Techn. Lille, 130 p., 14 annexes.
- WANG H.Q. (1987) - Modélisation des transferts de masse en milieu saturé à double porosité. Application aux écoulements convergents en Craie fissurée semi-confinée et multicouche. Thèse Doct., Univ. Paris-Sud, 271 p.

## DÉCOUPAGE ET PREMIÈRE CARACTÉRISATION DES MASSES D'EAU SOUTERRAINE DANS LE BASSIN ARTOIS PICARDIE

par Daniel BERNARD (\*) et Karine VALLEE (\*)

*Résumé.* — Un exercice de découpage des masses d'eau souterraine au sens de la directive cadre a été entrepris au niveau national fin 2001. En Artois-Picardie, 17 masses d'eau ont ainsi été recensées dont 5 transfrontalières et 3 transdistrict. Ces masses d'eau ont des tailles allant de 370 à 2900 km<sup>2</sup>. Afin de déterminer l'état qualitatif et quantitatif des masses d'eau souterraine, la directive prévoit la mise en place de réseaux de surveillance. Dans le bassin Artois-Picardie, les réseaux existants sont composés de 192 points pour la qualité et de 182 points pour la piézométrie. Quelques résultats et implications sur la gestion de la ressource dans l'optique de la Directive Cadre sont cités.

*Abstract.* — To answer the Water Framework Directive (2000/60/EC), a national exercise of identification of groundwater "water bodies" has been made. In the Artois-Picardie basin, we identified 17 water bodies with 5 cross border and 3 cross district water bodies. The areas vary from 370 to 2900 km<sup>2</sup>. In order to determine the qualitative and quantitative state of the water bodies, the directive imposes the implementation of surveillance points. In the Artois-Picardie basin the networks count 192 points for quality and 182 points for quantity. Results and implications on water resource management with Water Framework Directive are listed.

### I. — INTRODUCTION

La Directive Cadre Européenne du 22 décembre 2000 (DCE) introduit la notion de « masses d'eau souterraines » sur chaque bassin hydrographique, chaque Etat Membre devant alors les protéger, améliorer et restaurer leur état qualitatif et quantitatif, et assurer leur suivi.

La DCE définit par masse d'eau « un volume distinct d'eau souterraine à l'intérieur d'un ou de plusieurs aquifères » un aquifère représentant « une ou plusieurs couches souterraines de roches ou d'autres couches géologiques d'une porosité et d'une perméabilité suffisantes pour permettre soit un courant significatif d'eau souterraine, soit le captage de quantités importantes d'eau souterraine ».

### II. — DÉCOUPAGE DES MASSES D'EAU SOUTERRAINE

Le bassin Artois-Picardie est constitué des départements du Nord, du Pas-de-Calais, de la Somme et du Nord de l'Aisne. Ce bassin représente une superficie de 19580 km<sup>2</sup> et une population de 4,7 millions d'habitants pour 2455 communes. La densité moyenne de population est de 240 hab/km<sup>2</sup>.

Du point de vue de l'hydrogéologie (fig. 1), la majorité du bassin est constitué par la nappe de la craie qui fournit 95% de l'eau potable distribuée.

### 1) Méthode de découpage

La base de travail utilisée est le référentiel hydrogéologique BDRHF V1 défini en 1990 sur le bassin Artois-Picardie. Globalement ce référentiel est satisfaisant, néanmoins le niveau de connaissance s'est considérablement accru sur le bassin depuis cette date avec notamment une connaissance assez fine de la piézométrie de la nappe de la craie qui s'étend sur la majorité du territoire du bassin. Aussi, avant de passer au découpage, nous avons retravaillé certaines limites de BDRHFV1 en fonction de la piézométrie ce qui a donné lieu à des modifications qui seront à intégrer dans BDRHFV2.

Le bassin Artois-Picardie est occupé essentiellement par la nappe de la craie en position libre. Etant donné l'étendue de ce système et la diversité des situations, 12 masses d'eau ont été délimitées par regroupement des 38 systèmes aquifères de la craie. Les règles retenues sont les suivantes :

- pour les cours d'eau côtiers (Canche, Authie), la masse d'eau est constituée par le bassin versant souterrain du cours d'eau, les limites étant déterminées par les crêtes piézométriques. Ce découpage a l'avantage d'être « calé » sur les bassins versants superficiels et donc sur les limites administratives des SAGE.

- pour les autres secteurs, la masse d'eau regroupe des entités homogènes du point de vue hydrogéologique et sont délimitées par des crêtes piézométriques et des lignes de courant.

---

(\*) Agence de l'Eau Artois-Picardie

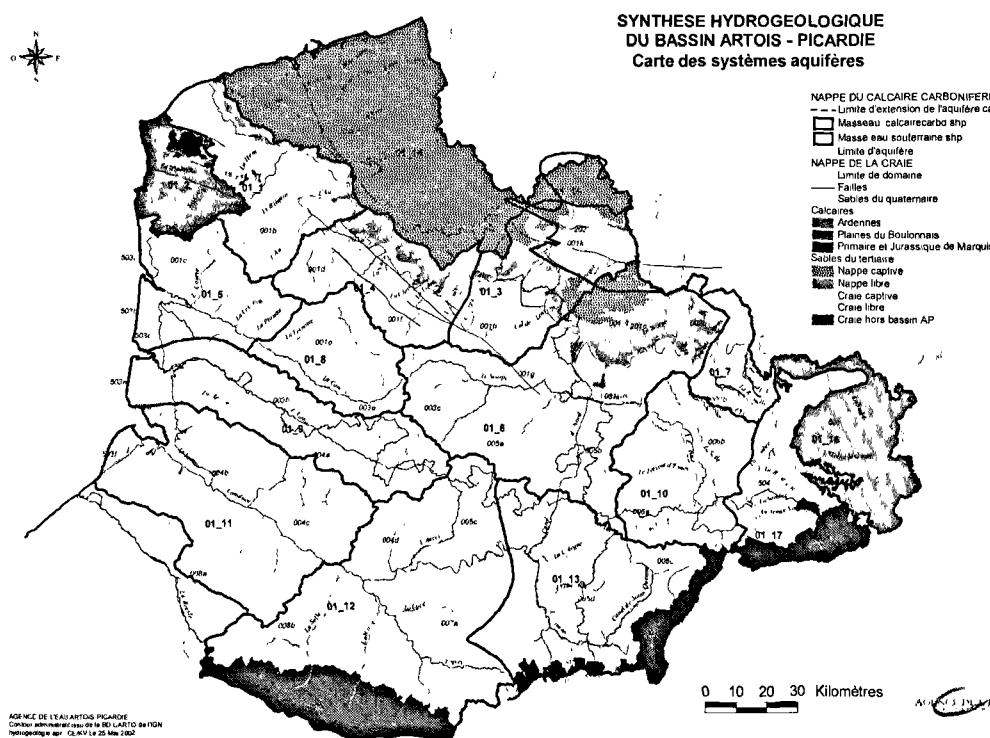


Fig. 1. — Carte hydrogéologique du bassin Artois Picardie avec les contours de masses d'eau

Les parties captives de la craie ont été rattachées à leurs parties libres dans la masse d'eau car les problématiques sont liées et l'eau prélevée dans la partie captive s'est infiltrée dans la zone libre.

Cinq autres masses d'eau ont été délimitées :

- Le Boulonnais constitué par les sables du crétacé inférieur et les calcaires primaire et jurassique contenant des nappes libres et localement captives. Cette masse d'eau correspond au domaine 502 de BDRHF V1.

- L'Avesnois reprenant le système 505 de BDRHF V1 (grès, calcaires primaires, cambrien, dévonien, carbonifère). Cette masse d'eau est constituée de petites nappes libres drainées par l'Helpe et ses affluents.

- Le calcaire carbonifère de Roubaix-Tourcoing. Cette masse d'eau correspond au système 202 (calcaire carbonifère fissuré et karstifié situé sous les craies marneuses et les formations tertiaires de la région lilloise). Elle est captive côté français et libre en Belgique où les calcaires deviennent affleurants.

- Le Landénien. Cette masse d'eau est constituée du système aquifère 201b1. Il s'agit des sables dit « d'Ostricourt » situés sous l'argile Yprésienne du bassin tertiaire des Flandres. Elle contient une nappe captive qui s'étend pour partie en Belgique.

- Le domaine de la bordure du Hainaut (504) est peu aquifère mais on y recense des prélèvements à usage AEP supérieurs à 10 m<sup>3</sup>/jour. Cette zone a donc été identifiée en

tant que masse d'eau de type système imperméable localement aquifère.

Au total, 17 masses d'eau ont donc été définies, d'une taille moyenne de 1223 km<sup>2</sup>. Toutes font l'objet de prélèvements d'eau à usage AEP supérieurs à 10 m<sup>3</sup>/jour. On note 5 masses d'eau transfrontalières avec la Belgique et 3 masses d'eau transdistricts avec le bassin Seine Normandie.

## 2) Réseaux de surveillance

### a) Qualitatif

Ce réseau (fig. 2) a pour objectif de connaître la qualité physico-chimique des eaux souterraines au niveau de la ressource. Il est constitué aujourd'hui de 190 stations et intègre différents types de points : 114 captages destinés à l'alimentation en eau humaine, 15 captages d'irrigation, 56 sources, 5 autres ouvrages (usage industriel ou particulier). Le protocole national sur la conception des réseaux de connaissance des eaux souterraines publié en 1999 fixe une périodicité minimale de 2 prélèvements par an (en période d'étiage et en période de hautes eaux). Les analyses concernent un ensemble de paramètres physicochimiques comprenant des éléments fugaces relevés *in situ* (pH, conductivité, potentiel redox, oxygène dissous...) et des éléments constitutifs de la minéralisation globale. En outre, les micropolluants minéraux sont recherchés avec une période plus longue (tous les 5 ans).

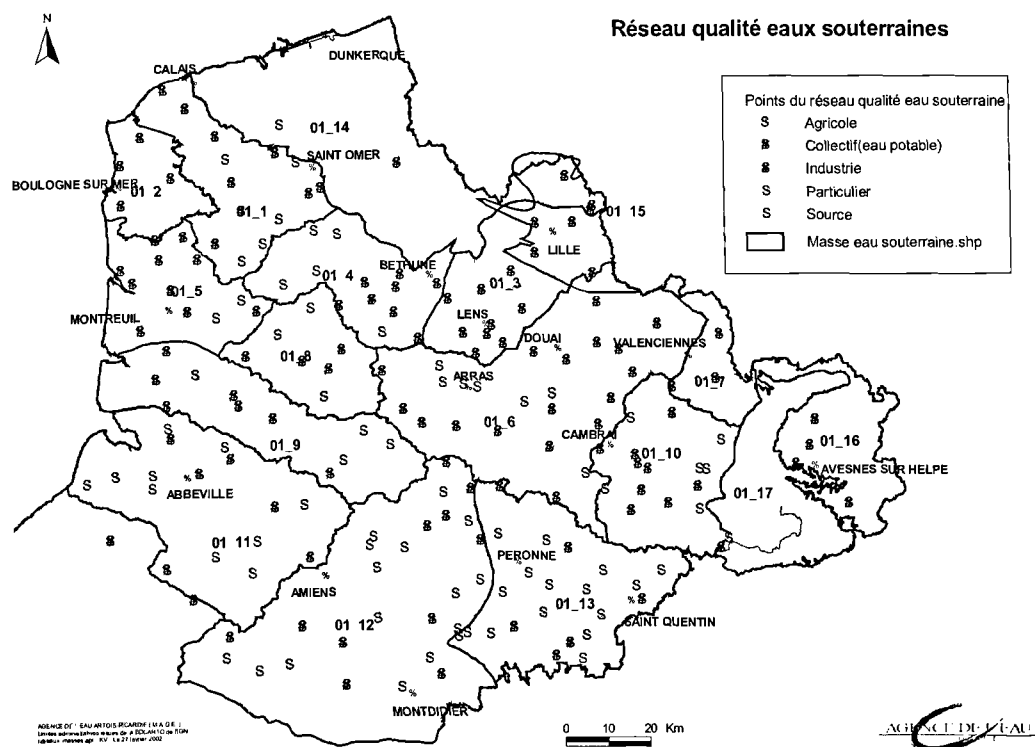


Fig. 2. — Localisation des points du réseau qualité eaux souterraines

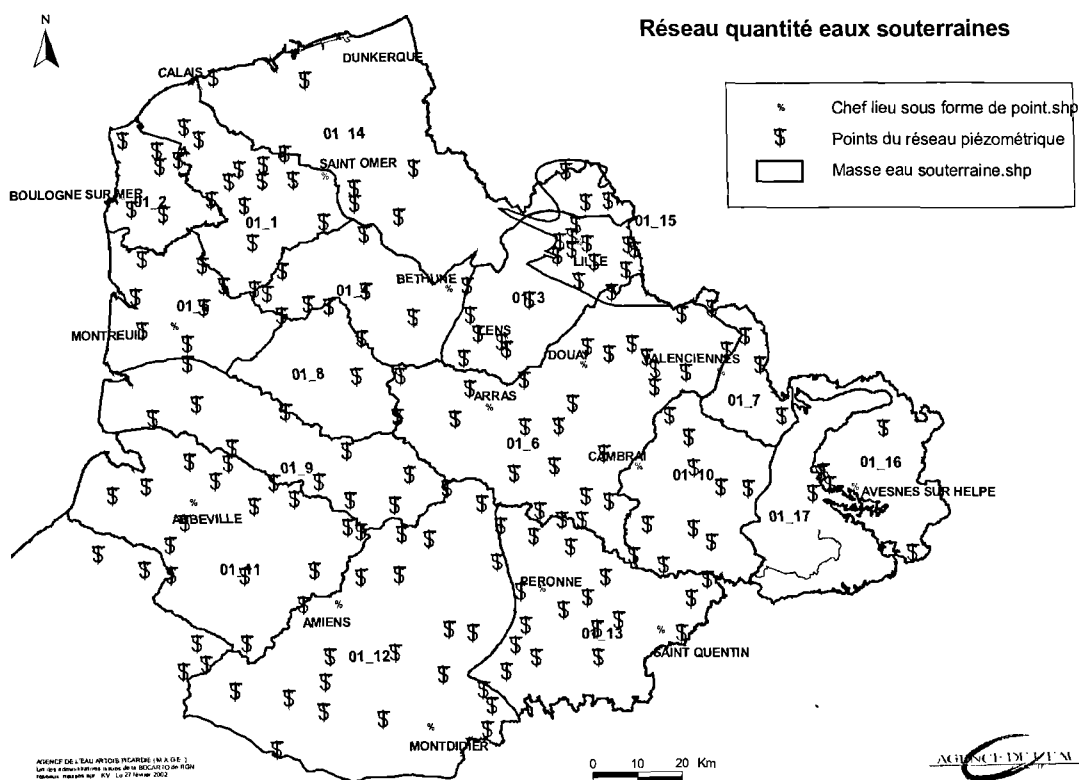


Fig. 3. — Localisation des points du réseau piézométrique

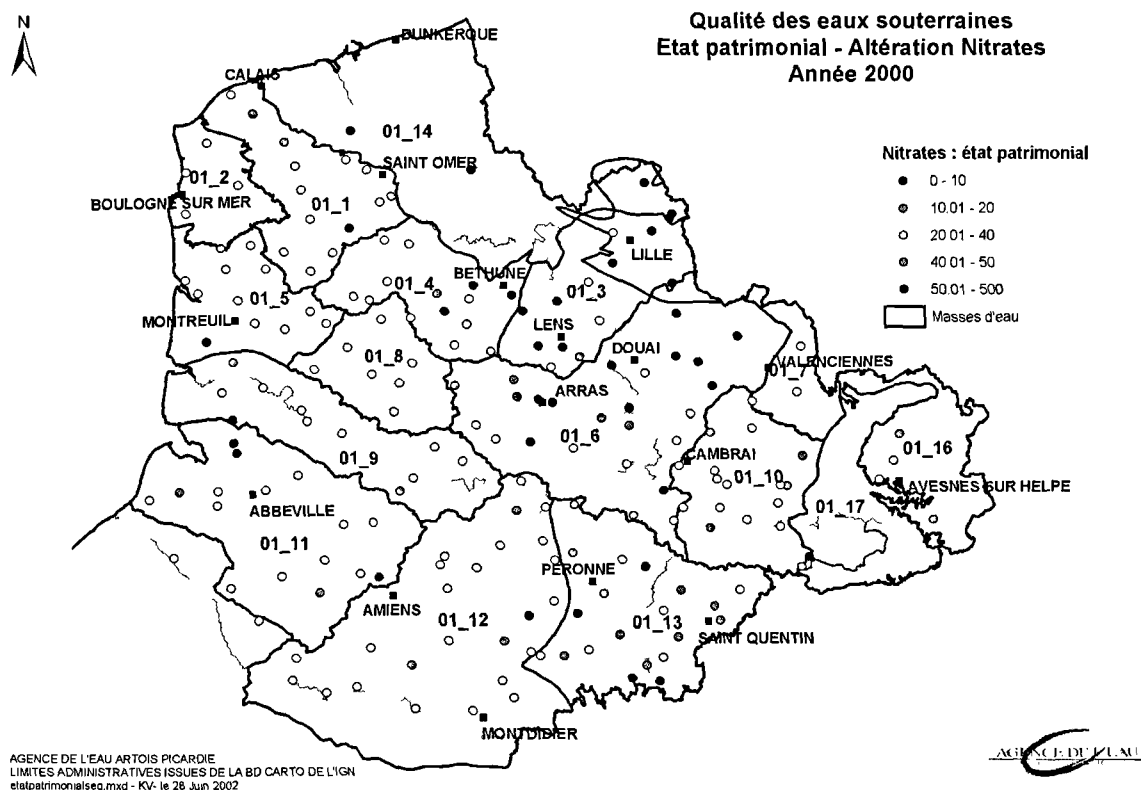


Fig. 4. — Qualité des eaux souterraines pour les nitrates – SEQ eaux souterraines

b) *Quantitative*

Le réseau piézométrique du bassin est d'abord un réseau de connaissance qui permet d'apprécier les tendances d'évolution de la nappe par rapport à des états de référence.

Le relevé des variations piézométriques permet :

- de suivre l'impact des situations d'étiage ou de très hautes eaux des nappes ;
- d'évaluer les ressources renouvelables des aquifères ;
- de limiter si nécessaire l'usage de certains captages.

Depuis 1997, le réseau (fig. 3) est constitué de 182 points répartis sur l'ensemble du bassin Artois Picardie : 129 anciens points de l'ancien réseau géré par le BRGM et 53 nouveaux points. Cela représente une densité d'observation spatiale de près de 1 point pour 100 km<sup>2</sup>.

**III. — EVALUATION DU BON ETAT QUALITATIF**

En première approche, on note que la masse d'eau 1003 comporte plus de points de mauvaise qualité (fig. 4) ce qui est logique quand on connaît l'occupation du sol de cette zone. La Directive Cadre impose de recouvrer un « bon état » en 2015 mais à l'heure actuelle, aucune instruction ne permet d'évaluer le « bon état » ni les circonstances conduisant à améliorer ou dégrader l'état de la qualité. Il semble que ce soit l'évaluation d'une tendance à l'amélioration ou à la

dégradation qui fasse foi de l'état. En outre, l'évaluation de l'état doit se faire en liaison avec l'impact sur les cours d'eau trouvant leur alimentation à partir de l'émergence de la nappe. Il reste enfin qu'aucune méthode n'est prescrite concernant le passage de l'évaluation de la qualité par point à la qualification de la masse d'eau dans sa globalité en bon état ou en état médiocre.

**IV. — EVALUATION DU BON ETAT QUANTITATIF**

Le SDAGE Artois-Picardie comporte déjà un indicateur (n°6) évaluant le degré de sollicitation de la nappe par unités SDAGE. Elaboré par le BRGM, le calcul de cet indicateur consiste à soustraire les volumes d'eau annuellement prélevés par pompage et comptabilisés à l'Agence de l'Eau, des volumes d'eau apportés par les précipitations efficaces sur la surface de la masse d'eau, exclusivement pour les nappes libres.

Cet indicateur est simple, mais souffre de ne pas tenir compte des échanges latéraux entre unités hydrogéologiques et masses d'eau, ni des apports des cours d'eau.

Le mauvais état doit être considéré lorsque la masse d'eau observe une tendance marquée à la baisse, indépendamment des oscillations saisonnières des nappes. Par contre, aucune altération des masses d'eau de surface ne doit être observée à cause de la surexploitation des masses d'eau souterraine.



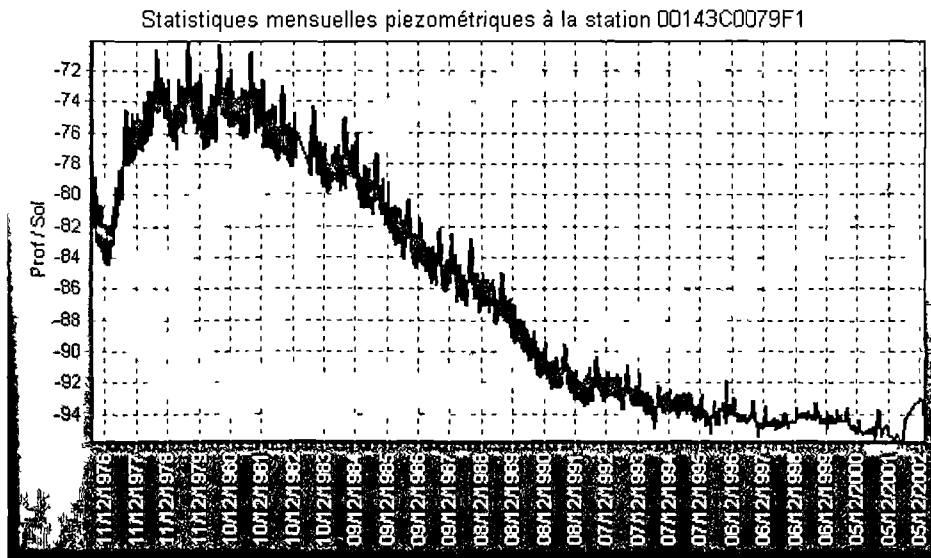


Fig. 5. — Variation de la piézométrie à Bondues (59) dans la nappe du calcaire carbonifère

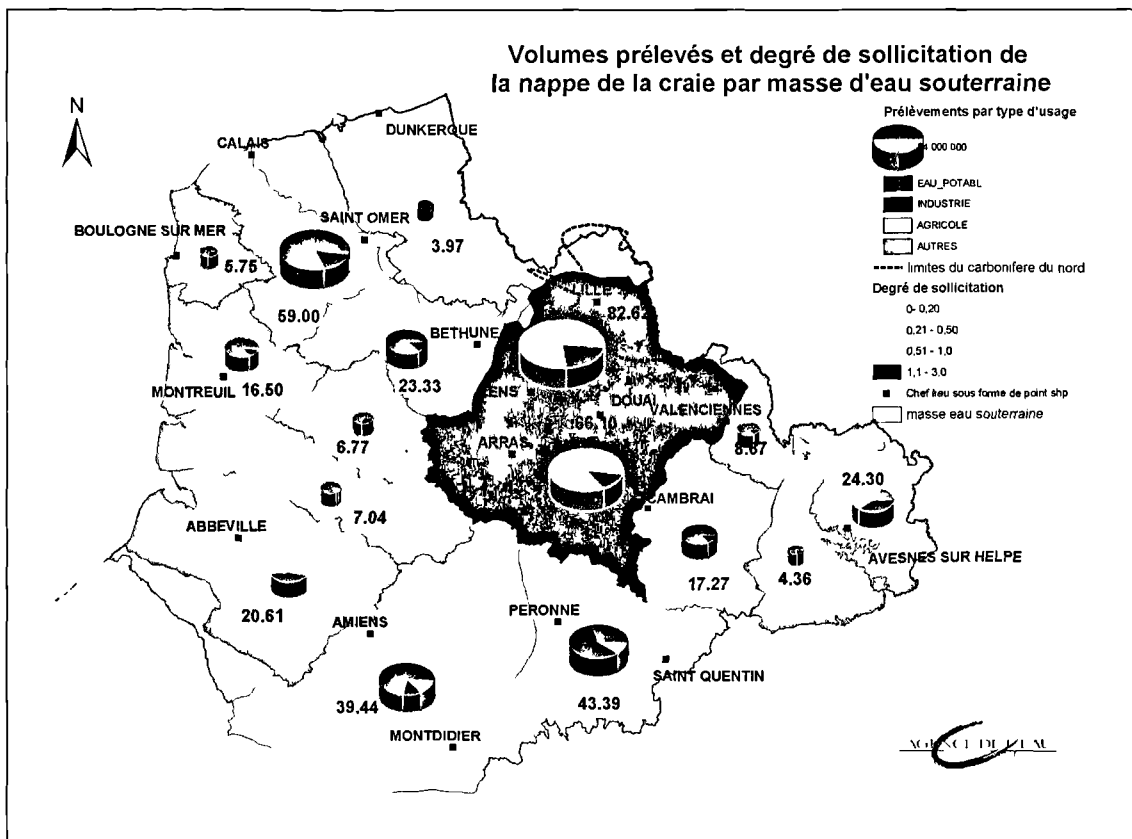


Fig. 6. — Carte des volumes prélevés et du degré de sollicitation de la nappe par masse d'eau

Ainsi, la masse d'eau du Calcaire Carbonifère (1015) (fig. 5), observant une tendance à la stabilité depuis les années 90, ne devrait pas être considérée comme en mauvais état quantitatif.

La carte de la figure 6 indique que la masse d'eau de la vallée de la Deûle (1003) paraît fortement sollicitée, les prélèvements excédant largement l'alimentation météorique naturelle vu la faible surface de la masse d'eau.

N masse eau	nom masse eau (proposition)	Superficie (km <sup>2</sup> )	Typologie	Entités V1 concernées	prélèvements AEP > 10m <sup>3</sup> /j	masse transfrontalière	Pays	masse transdistrict	Rattachement	Points RP qualité	Points RP quantité
1001	Audomarois	1003.11	Sédimentaire	001a+001b+ partie de 001x1 (craie captive)	O	N		N		14	13
1002	Bouloonnais	479.15	Socle	502a+502b	O	N		N		4	6
1003	Deûle (Lille-Lens)	1006.49	Sédimentaire	001k+001j+001h+partie de 001f (craie libre) partie de 001x1+partie de 001y1 (craie captive)	O	O	Belgique	N		13	16
1004	Artois - Lys	888.49	Sédimentaire	001d+001f + partie de 001x1 (craie captive)	O	N		N		14	10
1005	Canche aval	833.34	Sédimentaire	001c + partie aval de 003a + partie de 003b + 503a+503b+503c	O	N		N		11	7
1006	Scarpe - Sensee	2389.00	Sédimentaire	001g+001i+003c+005a+005b+partie de 001y1	O	O	Belgique	N		24	23
1007	Valenciennois	372.23	Sédimentaire	002b+002a1	O	O	Belgique	N		3	3
1008	Canche amont	708.32	Sédimentaire	001e+partie amont de 003a	O	N		N		7	3
1009	Authie	1262.80	Sédimentaire	003b+004a+503e	O	N		N		11	11
1010	Cambresis	1032.51	Sédimentaire	006a+006b	O	N		N		15	9
1011	Somme aval	1906.48	Sédimentaire	004b+004c+partie de 008a+503d+503f	O	N		N		15	15
1012	moyenne Somme	2964.86 dont 605.6 sur SN	Sédimentaire	004d+008b+partie ouest de 005c + partie ouest de 007a	O	N		O	AP	26	21
1013	Somme amont	1523.90	Sédimentaire	005d+007b+006c+partie de 006d+partie est de 005c+partie est de 007a	O	N		N		22	18
1014	landénien	2189.05	Sédimentaire	201b1	O	O	Belgique	N		3	6
1015	calcaire carbonifère de Rx-Tg	587.31	Sédimentaire	202	O	O	Belgique	N		2	5
1016	avesnois	755.57	Socle	505	O	N		N		4	5
1017	Hainaut	891.22 dont 234.48 sur SN	Système imperméable localement aquifère	504	O	N		O	AP	2	1

Taille maximale : 2964.86

Taille moyenne : 1223.17

Taille minimale : 372.23

Tabl. I. — Tableau de synthèse des masses d'eau souterraine en Artois-Picardie

## V. — CONCLUSION

Le découpage des masses d'eau souterraine, basé essentiellement sur des critères hydrogéologiques semble bien adapté au niveau du bassin Artois-Picardie (Tabl. I), d'autant plus qu'il devrait être compatible avec les périmètres des SAGE. Les réseaux de mesure du bassin sont denses et répartis de façon relativement homogènes et ne devront probablement pas subir de modifications majeures pour

répondre aux exigences de la directive cadre. Concernant l'évaluation du bon état chimique et quantitatif, l'absence d'éléments sur les paramètres à prendre en compte, sur les seuils et la façon d'agrèger les données au niveau de la masse d'eau ne permet pas de conclure. Les tests effectués sont une première approche qu'il conviendra de compléter lors de la publication de la directive fille. Il reste que l'enjeu de ces études, est de déterminer, d'ici fin 2004, les masses d'eau qui risquent de ne pas atteindre les objectifs de bon état de la Directive Cadre.

## MAITRISE DE L'ENERGIE, ENERGIES FOSSILES, ENERGIES RENOUVELABLES

par Hervé PIGNON (\*)

A travers les âges et les continents, toutes les civilisations ont tenté de construire leur modèle de développement, développement plus ou moins durable selon les âges, les continents et les hommes qui les peuplent.

Le développement industriel et productiviste qu'ont connu les pays occidentaux, dès le XIX<sup>e</sup> siècle, témoigne d'un développement de société qui a favorisé la satisfaction d'une demande croissante des citoyens et de progrès considérables qui ont placé les pays dits riches au devant de la scène internationale.

Mais à quel prix ?

Aujourd'hui les menaces qui pèsent sur l'avenir de la planète amènent à reconsidérer ces comportements « prédateurs » qui ont contribué à épuiser les ressources naturelles, à accumuler les déchets nucléaires stockés dans le sous-sol, à augmenter la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Parce qu'au milieu des problèmes, au cœur des préoccupations, se trouve ce bien précieux qu'est l'énergie. Des questions d'environnement local, régional ou mondial, l'énergie n'est jamais en reste : pollution des mers par les hydrocarbures, pluies acides, pollution de l'air, effet de serre, accidents nucléaires, déforestation, inondations pour la fabrication d'électricité hydraulique, tensions politiques et guerres. Sans énergie pas de salut.

Et quelle considération pour les milliards d'habitants de cette même planète qui eux aussi tendent à exprimer des besoins, des modes de vie calqués sur ceux importés d'occident ? Et si soudain ils revendiquaient leur part du gâteau ? Parce qu'en parallèle aux menaces environnementales qui pèsent sur la planète, viennent s'en greffer d'autres toutes aussi préoccupantes comme l'émergence, l'explosion démographique des pays en voie de développement, la faim, les épidémies et l'épuisement progressif des ressources essentielles. Pour les pays nantis se pose la question de l'accès à l'énergie des générations futures ; pour les pays pauvres se pose la question plus temporelle de la survie au quotidien.

80 % des habitants de cette planète n'y ont pas accès, les 20 % restants sont atteints de boulimie galopante et surtout très gaspilleuse. Quand un américain consomme 7 à 8 tep/an, un indien n'en consomme que 0,3 pour un usage essentiel qu'est la cuisson des aliments. En Russie c'est l'industrie non performante qui engloutit la majeure partie de la consommation d'énergie (4 à 5 tep/habitant/an pour un niveau

de vie bien inférieur à un européen qui consommera entre 3 et 4 tep/an).

Les années 1980 sont bien les années de la prise de conscience que la planète avait ses propres limites, que l'humanité dans son ensemble en se développant, en s'enrichissant, pouvait modifier de manière parfois irréversible le fonctionnement même de la planète et les grands équilibres du monde. Ces années ont apporté aussi la démonstration que la richesse d'un pays, son développement économique et social peut s'accommoder parfaitement d'une consommation d'énergie maîtrisée.

Parmi les principaux gaz liés à l'activité humaine et responsables de l'accroissement de l'effet de serre, on trouve tout d'abord le gaz carbonique issu de la combustion à l'air de tous les produits carbonés, pétrole, charbon, gaz naturel, bois. Viennent ensuite le méthane produit par l'agriculture et la fermentation des plantes.

En un siècle les émissions de gaz à effet de serre ont augmenté de 50 %, principale conséquence : les températures augmentent. Ce phénomène est directement lié à l'activité humaine. Les climatologues constatent en effet que les années 1990 ont été les plus chaudes du siècle et qu'en un siècle la planète s'est réchauffée en moyenne de 0,6 °C.

Partout dans le monde les modifications physiques sont palpables et montrent bien que les limites sont atteintes (la banquise recule, son épaisseur diminue, les déserts avancent en Afrique, les glaciers du massif alpin régressent, des espèces de poissons apparaissent en Méditerranée quand elles fréquentaient des eaux plus chaudes...)

On comprend mieux aujourd'hui les échanges d'énergie entre la terre, l'océan, l'atmosphère et l'espace. Et d'ores et déjà on attend dès le milieu du XXI<sup>e</sup> siècle des évolutions flagrantes comme la montée du niveau des mers, et la disparition de pays comme les îles Maldives.

Toutes les activités humaines génèrent des G.E.S. ; l'industrie est un émetteur important mais ses performances technologiques, l'amélioration de l'efficacité énergétique de ce secteur, en font un secteur en décroissance. Le bâtiment reste un poste important (chauffage, climatisation, production d'eau chaude sanitaire) mais le secteur le plus préoccupant reste le transport où les consommations augmentent le plus du fait de l'accroissement des déplacements et de l'augmentation du parc de véhicules.

---

(\*) Délégué Régional de l'ADEME

Même si des incertitudes persistent non pas sur le fait même du réchauffement de la planète mais plutôt sur les conséquences même de ce réchauffement. 2000 scientifiques internationaux se sont entendus pour affirmer que l'atmosphère terrestre se réchauffait et que cette évolution est largement attribuable aux activités humaines et ils ont établi que personne ne sera épargné. Les états Unis ont déjà estimé le coût du réchauffement à 64 milliards de dollars. Pour autant ils n'ont toujours pas ratifié les accords de Kyoto à l'instar de nombreux pays industrialisés qui ont pris des engagements de réduction de leurs émissions sur la période 2008-2012 par rapport aux émissions de 1990. Pour respecter ces engagements ces pays doivent mettre en œuvre des programmes de réduction des émissions, donc des consommations d'énergie. Les quinze états membres européens ont mis en commun leurs moyens pour un objectif de réduction de 8 %. Pour la France il s'agira de stabiliser ses émissions sur la base de 1990. La Mission Interministérielle de l'effet de serre MIES qui dépend du Premier Ministre est chargée de suivre l'application de ces engagements. L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie est l'outil de cette nouvelle politique. Elle intervient auprès des différents types d'acteurs (entreprises, collectivités, citoyen) pour les accompagner dans la mise en œuvre de solutions efficaces.

En Nord Pas de Calais, ces politiques sont définies et partagées avec le Conseil Régional. Premier objectif : améliorer l'efficacité énergétique de l'industrie régionale, des patrimoines des collectivités locales et territoriales, sensibiliser les citoyens à ce nouveau challenge. Contrairement à une idée reçue trop fortement ancrée, chacun à son niveau peut contribuer à la diminution des gaz à effet de serre. Les techniques existent, et en période de pénurie énergétique on a été capable de prouver que l'on pouvait à confort égal, à croissance maintenue, consommer moins consommer mieux. Ceci dit tout ne réside pas dans le seul choix technologique, le véhicule le mieux conçu « énergétiquement parlant » consommera énormément si la conduite est particulièrement énergivore.

Installations performantes, cogénération, technologies propres, transfert modal pour les marchandises et les personnes, appareils électroménagers à faible consommation, gestes simples et quotidiens (déplacements à pied, vélo, transport en commun, chasse aux lumières allumées, et ordinateurs non éteints...) politique ambitieuse, investissements efficaces, bon sens, tous ces ingrédients permettront de réduire durablement les consommations d'énergie.

Au delà des mesures techniques et comportementales il est nécessaire d'intégrer les mesures structurelles : réorganiser la ville et les déplacements, intégrer de nouveaux modes d'organisation de la mobilité, concevoir des choix urbanistiques plus respectueux de l'environnement ; autant de pistes et de réflexions partagées par l'ADEME et les collectivités territoriales.

Mais l'énergie ne s'examine pas uniquement sous l'œil de la consommation, la produire coûte plus cher que l'économiser et génère aussi des gaz à effet de serre.

En France, la situation est particulière du fait du programme nucléaire de production d'électricité. Il n'en demeure pas moins que les combustibles irradiés issus de l'utilisation de l'énergie nucléaire pour fabriquer l'électricité contiennent des produits de fission et des transuraniens dont certains restent radioactifs et dangereux pendant des siècles voire des millénaires. Aucune solution satisfaisante pour leur destruction ou leur stockage fiable à long terme n'a encore été trouvée et le démantèlement d'importantes installations nucléaires risque de poser aussi des problèmes non encore clairement identifiés.

Produire plus proprement de l'énergie est aussi possible, et a été largement démontré en Nord Pas de Calais. Produire de l'électricité à partir d'éolien, de solaire, d'hydraulique aura une contribution intéressante contre le réchauffement climatique car ces sources renouvelables n'émettent pas de CO2. Une directive européenne impose aux pays membres de produire 21% de leur énergie à partir d'énergie renouvelables.

Les sources et potentiels locaux sont nombreux.

S'éclairer avec les déchets des décharges d'ordures ménagères, quelle belle idée !. En Nord Pas de Calais un certain nombre de décharges se sont dotées d'installation permettant la captation et l'utilisation du méthane produit soit pour faire de l'électricité soit après transformation pour se substituer au gaz. La méthanisation de déchets agro-alimentaires est un gisement là encore considérable. En région on s'est aussi préoccupé d'identifier les quantités de déchets de bois disponibles et les ressources potentielles dans une région faiblement boisée (plantation d'essence à croissance rapide) et de structurer les filières de collecte, de transformation et d'utilisation de ces déchets devenus bois-énergie et consommés dans des chaudières performantes.

L'éolien connaît de belles perspectives en région où les zones propices couvrent quasiment 70 % du territoire. Il en va de même du solaire dans ses usages directs (capteurs solaires thermiques et cellules photovoltaïques) comme dans ses usages passifs (bioclimatique) qui se développe aussi en région.

C'est un choix politique que de décider un nouvel ordre mondial, un nouveau mode de développement, d'obliger chacun à sortir de sa propre logique : le chercheur de sa discipline de recherche, l'entreprise de son profit, l'Etat de son pouvoir et le citoyen consommateur de son confort.

Peut-on à l'horizon 2100, considérer comme les démographes comme celui d'une probable évaluation de la population à 12 milliards d'habitants, envisager un réel ordre mondial où chacun aurait accès aux richesses ou bien la planète est-elle condamnée à une telle pression qu'elle ne pourra en aucun cas satisfaire à cet accroissement démographique ?

Une chose est certaine aujourd'hui, plus on tardera dans l'action plus la facture sera lourde.

## CONSERVATOIRE DES SITES NATURELS DU NORD ET DU PAS DE CALAIS : CONSERVATION IN SITU ET INVENTAIRE DU PATRIMOINE GÉOLOGIQUE DU NORD- PAS-DE-CALAIS : RÉALISATIONS ET PERSPECTIVES

par Fabrice CUGNY (\*)

### I. — INTRODUCTION

Le travail qui va vous être présenté a été réalisé en 1997 par le conservatoire des sites naturels du Nord et du Pas de Calais et en particulier par un géologue employé spécifiquement sur cette mission : Pierre Goubet.

La région Nord Pas-de-Calais offre par son histoire un lieu de découverte important de la géologie. Certes notre relief est peu prononcé, mais les gens du nord ont, outre le soleil à l'intérieur, une tradition de travail et d'exploitation de leur ressources et maintenant d'optimisation de leur compétences. Par les diverses activités, exploitation du charbon, de la craie, construction d'infrastructures, tunnel sous la manche, on est allé chercher la géologie en profondeur pour la remonter à la surface et parfois en plein paysage à y construire nos propres montagnes. Dans cette région densément peuplée, le besoin de nature et de sa protection s'est très vite fait ressentir. En 1994, à l'initiative de diverses associations de protection de la nature est né le Conservatoire des sites naturels du nord et du pas de Calais dont les quatre missions sont la protection, la gestion, la connaissance et la valorisation de notre patrimoine naturel. Aussi est-ce tout naturellement que le conservatoire en est venu à se préoccuper de la situation et du devenir du patrimoine géologique de la région.

Le patrimoine géologique, une composante naturelle, les sites géologiques, une composante scientifique et culturelle, les collections et les bibliothèques. Pour préserver et mettre en valeur il faut d'abord connaître. Le CSN a donc sollicité du Conseil Régional du Nord/Pas de Calais et de l'Europe des subventions pour inventorier les sites géologiques remarquables, proposer les modalités de leurs préservation et de leur mise en valeur et définir les grands traits d'une stratégie régionale de préservation et de mise en valeur. Nous présenterons donc la méthodologie utilisée pour inventorier les sites géologiques remarquables puis la stratégie de préservation et de mise en valeur de ces sites.

### II. — MÉTHODOLOGIE DE L'INVENTAIRE DES SITES GÉOLOGIQUES REMARQUABLES

L'inventaire des sites géologiques remarquables de la région Nord/Pas de Calais a été réalisé en trois étapes successives. La première étape consistait à inventorier les sites géologiques potentiellement intéressants d'un point de vue scientifique et/ou pédagogique dans tous les domaines des sciences de la Terre. La seconde étape a eu pour but de définir quels seraient, parmi cet inventaire, les sites à étudier en priorité sur la base de critères de sélection déterminés. La troisième étape correspondait à l'étude de ces sites prioritaires, dits "remarquables" et à la présentation des résultats sous forme de fiches.

#### 1) Etape 1 : inventaire préalable des sites géologiques régionaux

Cette première étape consistait à inventorier les sites géologiques ayant suscité l'intérêt des scientifiques ou ceux qui sont utilisés par les enseignants comme support lors d'excursions géologiques. Cet inventaire fut réalisé à la fois sur une base bibliographique et avec l'aide de scientifiques travaillant dans la région. Des géologues régionaux furent consultés en entretien, ce qui permit l'établissement d'une liste de 80 sites géologiques

#### 2) Etape 2 : sélection des sites à étudier en priorité

Après une étude bibliographique sur les différentes méthodes d'inventaire de sites remarquables dans le monde, trois critères furent retenus pour permettre une sélection :

- l'importance scientifique du site d'un point de vue international ;
- la présence de phénomènes géologiques rares ou particulièrement bien exprimés sur le site
- l'importance du site pour la compréhension d'une période de l'histoire géologique de la région

---

(\*) Conservatoire des sites Naturels du Nord et du Pas de Calais ; Rue saint pierre 59118 Wambrechies. Tél : 03 28 04 53 45  
Fax : 03 20 78 79 20. (Atlas des sites géologiques 1997- CSN Pierre Goubet)

Cette méthode se rapproche de celle utilisée par les britanniques pour sélectionner les " Sites of Special Scientific Interest " (site d'intérêt scientifique important).

Trente huit sites ont ainsi été sélectionnés parce qu'ils répondaient à l'un au moins de ces trois critères. Certains aspects ou périodes géologiques ne sont pas représentés au sein des sites retenus, ce qui démontre la nécessité de compléter à l'avenir cet inventaire non exhaustif.

### 3) Etape 3 : étude des sites géologiques remarquables

Après avoir sélectionné les 38 sites géologiques les plus remarquables du Nord/Pas de Calais, il convenait d'étudier plus en détail ces sites pour définir leurs caractéristiques principales et les potentialités de leur préservation et de leur mise en valeur, puis synthétiser les résultats sous une forme exploitable. Ainsi, une fiche de données standard fut élaborée, puis établie pour chaque site d'après un travail de terrain et l'analyse de la bibliographie.

Pour faciliter une action rapide de préservation et de mise en valeur, il a été défini une échelle de la valeur patrimoniale des sites et des atteintes et menaces dont ils font l'objet. La prise en compte de ces deux paramètres permettra de définir la nécessité et l'urgence de la de préservation et de la mise en valeur.

#### a) Analyse de terrain et fiches standard de site

Chaque site retenu pour étude a été visité, après accord oral des propriétaires lorsque l'accès n'en était pas libre (dans certains cas, l'observation du site était possible à partir du domaine public). Cette visite avait pour but :

- de délimiter l'aire géographique du site
- de déterminer l'état du site et la visibilité des phénomènes géologiques signalés
- d'estimer les atteintes et les menaces
- d'estimer les intérêts pédagogiques
- de considérer les modalités de préservation et de mise en valeur
- d'effectuer un relevé photographique total ou partiel

Les résultats de l'étude des sites géologiques remarquables du Nord/Pas de Calais ont été synthétisés sous forme de fiches spécifiques à chaque site. Il s'agit de documents techniques et opérationnels, pouvant servir de base à la définition d'un plan de travail pour une stratégie effective de préservation et de mise en valeur des sites. Elles résument les éléments essentiels de chaque site.

La première page est descriptive et rassemble des informations géographiques et foncières, des données géologiques et pédagogiques.

La seconde page propose des mesures de préservation, de gestion et de mise en valeur scientifique et pédagogique des sites. Une bibliographie élémentaire est incluse.

#### b) Relecture par un scientifique et validation par le comité de suivi

Les fiches présentées ont fait l'objet d'une relecture par un scientifique ayant récemment travaillé sur le site afin de

garantir que les informations reportées étaient d'actualité, compatibles avec les enjeux scientifiques liés aux sites, et de signaler les études ou les projets en cours. Chaque scientifique ayant relu une fiche est mentionné sur celle-ci.

L'ensemble des fiches a été validé par le comité de suivi de l'étude.

## III. — ETAT DES LIEUX, RESULTAT DE L'ETUDE SUR LES SITES GEOLOGIQUES REMARQUABLES

### 1) Les sites

L'étude de 38 sites géologiques régionaux d'importance internationale, nationale, ou régionale a permis de décrire chacun d'entre eux et de déterminer les conditions de sa préservation et de sa mise en valeur sous la forme de fiches. Le tableau récapitulatif montre que la plupart des sites appartiennent à cinq catégories (les lister). Il nous permet en outre de constater que :

- seulement un quart d'entre eux sont d'origine naturelle (sites géomorphologiques, falaises, sources), les trois quarts restant étant d'origine humaine ;
- les carrières, abandonnées ou en activité, représentent près des deux tiers des sites (61%), ce qui s'explique par la rareté des affleurements naturels dans la région due au faible relief du territoire et à la végétation omniprésente (la moitié des carrières abandonnées est menacée à court terme).

Il est clair, que les carrières doivent faire l'objet d'une attention particulière dans le cadre d'une stratégie de préservation des sites géologiques.

### 2) Les acteurs

De nombreuses structures peuvent participer à la préservation et à la mise en valeur des sites géologiques remarquables, soit parce qu'ils sont utilisateurs de sites, soit parce qu'ils sont propriétaires ou responsables des sites.

#### a) Services de l'Etat

Les politiques de tous les services listés ci-dessous sont dictées par les Ministères de tutelle. Pour une efficacité maximum d'action, c'est au niveau national que doivent être prises les grandes décisions de préservation et de mise en valeur des sites géologiques. L'enjeu dépasse largement le cadre régional. Néanmoins, ces services ayant une certaine liberté d'action, leur politique peut à court terme grandement améliorer la situation régionale actuelle.

- Le Ministère de l'Environnement par l'intermédiaire de la DIREN et le Ministère de l'Industrie et de la Recherche par l'intermédiaire de la DRIRE. (l'évaluation des plans de réhabilitation des carrières et dans l'élaboration des schémas carriers départementaux).

- Le BRGM est également un acteur important dans la préservation du patrimoine géologique : il possède des banques de données pour la connaissance du sous-sol et il est responsable de l'application d'une partie du code minier applicable aux carrières enfin ; une partie de son personnel utilise les sites géologiques pour la recherche.

- ONF, DDE, DRE et SNCF (qui ont des sites inventoriés sous leur responsabilité ; ensuite ces services sont susceptibles de modifier certains sites existants ou de permettre la découverte de nouveaux sites remarquables, notamment lors de travaux.

*b) Collectivités locales et territoriales*

Les services régionaux (DEED) sont à même de favoriser la sauvegarde des sites, la première en contribuant à l'application des politiques régionale en faveur de la préservation du patrimoine naturel, la seconde en incorporant les inventaires et les données géologiques dans leurs études et banques de données (les données de cette étude ont été intégrées dans le Système d'Informations Géographiques, SIGALE®).

Les Départements, grâce aux mesures de préemption, à la TDENS, et leurs services de gardiennage, peuvent jouer un rôle important dans la préservation de nombreux sites.

Près des deux tiers des sites inventoriés étant en zone de Parc Naturel Régional, les Syndicats Mixtes des Parcs Naturels Régionaux sont responsables de l'élaboration et de la mise en œuvre des chartes de parcs

De nombreuses communes possèdent, sur leur territoire, des sites géologiques remarquables.

*c) Associations de préservation et de mise en valeur du patrimoine naturel*

Certaines associations ont déjà la responsabilité de la gestion et de la mise en valeur de sites géologiques, elles peuvent jouer un rôle technique de gestion ou d'animation à la demande d'autres structures, ou en proposant d'elles même la préservation de certains sites.

Le Conservatoire des Sites Naturels du Nord et du Pas de Calais est l'association régionale spécialisée en matière de préservation et de gestion des espaces naturels remarquables.

*d) Scientifiques*

Que ce soit pour la recherche fondamentale ou appliquée, ou pour l'enseignement des sciences de la Terre au plus haut niveau, il leur est nécessaire de disposer de sites accessibles où des prélèvements modérés et responsables sont possibles.

Ils peuvent aussi sensibiliser les acteurs locaux et le grand public à la préservation des sites.

*e) Enseignants*

Ils ont également la responsabilité de sensibiliser les élèves à la préservation du patrimoine géologique : pour le grand public, l'école est bien souvent l'unique contact avec la géologie.

*f) Musées*

Les musées et espaces muséographiques hébergent souvent les éléments importants du patrimoine géologique que sont les collections. Ils sont directement impliqués dans la sensibilisation du grand public et servent de relais entre amateurs et scientifiques

*g) Industriels*

Principalement pour l'extraction de matériaux ou comme lieux de dépôts de matériaux divers. Ils peuvent aussi jouer un rôle essentiel dans la mise en valeur des sites en délivrant des autorisations de visites aux scientifiques et aux enseignants. Ils possèdent aussi des moyens techniques et financiers pour la gestion des sites pendant et après l'exploitation.

*h) Géologues amateurs et clubs de géologie*

Certains amateurs jouent un rôle important pour la recherche scientifique. Ils possèdent du temps et des moyens parfois plus importants que les chercheurs, et ont une bonne connaissance de certains sites. D'autres parfois peuvent avoir des comportements excessifs..

#### **IV. — STRATEGIE REGIONALE DE PRESERVATION ET DE MISE EN VALEUR DES SITES GEOLOGIQUES REMARQUABLES**

##### **1) Assurer la protection et la gestion des sites géologiques remarquables**

Bien qu'uniques et irremplaçables, de nombreux sites géologiques remarquables régionaux sont menacés de disparition. Il ne faut pas seulement stopper toutes dégradations d'origine humaine ; il faut aussi laisser au site son potentiel d'exploitation scientifique et pédagogique, d'où la nécessité de définir une stratégie de gestion conservatoire pour limiter les dégradations naturelles. Ces mesures de gestion doivent considérer comme objectif principal le patrimoine géologique, et prendre en compte les enjeux liés au patrimoine biologique, qui est souvent d'une grande valeur sur les sites géologiques.

##### **2) Mettre en valeur les sites géologiques remarquables du point de vue scientifique, pédagogique et culturel**

*a) Permettre ou faciliter l'étude scientifique des sites.*

Il est important que les sites géologiques remarquables de la région fassent l'objet d'un suivi scientifique permanent. La plupart d'entre eux, parce que déjà bien connus, servent de référence à de nombreux scientifiques pour tester de nouvelles méthodes ou de nouvelles théories. D'autres ne sont encore que très peu connus et leur étude permettrait d'accroître la connaissance de la géologie régionale. Il est donc important que les pouvoirs publics, les gestionnaires d'espaces naturels et les propriétaires facilitent la recherche scientifique sur les sites.

Il serait donc utile de développer une procédure de convention de fouille entre chercheurs et propriétaires et si cela est impossible, de prendre des mesures contraignantes à l'encontre des propriétaires hostiles. Les autorisations ou les renouvellements d'exploitation devraient inclure une clause rendant obligatoire la délivrance d'autorisations de visite pour les scientifiques en poste dans les services de l'Etat (Universités, C.N.R.S etc...).

b) *Aménager et mettre en valeur les sites du point de vue pédagogique.*

L'enseignement des Sciences de la Terre est dispensé à tous les niveaux du cursus scolaire et universitaire. Une visite sur LE TERRAIN est indispensable à l'enseignement de cette discipline. Malheureusement, les sorties de terrain des classes deviennent rares à cause de la disparition des sites ou du refus des autorisations d'accès. Pour les professeurs les plus motivés, il reste la solution du voyage vers certaines parties de notre région ou vers d'autres régions.

La mise en valeur pédagogique sur les sites peut être réalisée grâce à des supports variés tels que les visites guidées, les panneaux d'information, des animations ou des musées de sites (petites structures fixes protégeant ou présentant des objets particuliers). Elle doit aussi être réalisée en utilisant des guides de terrain, une mallette pédagogique et des supports informatiques alliant interactivité et disponibilité.

c) *Favoriser le développement d'activités touristiques liées au patrimoine géologique.*

Depuis quelques années, le public s'intéresse à des formes de tourisme plus culturelles, plus naturelles, souvent nommées "tourisme vert". Ainsi, le patrimoine géologique peut être un centre d'intérêt pour de nombreux touristes désirant découvrir et connaître le Nord/Pas de Calais. La nature et la structure du sous-sol étant déterminantes pour la compréhension de l'écologie et de l'histoire socioculturelle d'une région, il est important de pouvoir les observer

La proximité de la Grande Bretagne, de la Belgique et des Pays-Bas est un atout important pour le Nord/Pas de Calais, car de nombreux habitants de ces pays sont intéressés par un tourisme porté sur la nature.

Il faut néanmoins veiller strictement à ce que les objectifs de mise en valeur touristique soient compatibles avec les objectifs de préservation, toujours prioritaires sur les sites géologiques remarquables.

### **3) Sensibiliser les acteurs locaux et le grand public à la préservation du patrimoine géologique**

La préservation des sites géologiques remarquables du Nord/Pas de Calais passe par la nécessaire prise de conscience de la valeur de ce patrimoine, et des atteintes et menaces dont il fait l'objet. Informer et sensibiliser sont d'autant plus importants que la géologie est une science relativement peu connue et que la notion de patrimoine géologique est récente en France.

Le grand public doit être informé des enjeux liés à la préservation du patrimoine géologique. D'abord parce que ce patrimoine est le bien de tous, il est donc légitime que le grand public puisse s'y intéresser. Ensuite, parce que le comportement du public sur les sites est un des facteurs de leur préservation. Enfin, parce que la mobilisation du grand public en faveur de la sauvegarde et de la mise en valeur du patrimoine géologique motivera les pouvoirs publics et les industriels pour une meilleure prise en compte de ce patrimoine dans leurs activités.

Les acteurs locaux (communes, syndicats de communes, propriétaires, exploitants) ont une responsabilité déterminante dans toutes mesures de préservation et de mise en valeur des sites géologiques. Ils doivent donc faire l'objet d'une information particulière.

### **4) Développer l'information scientifique auprès des géologues amateurs**

La recherche scientifique a beaucoup à gagner de la collaboration avec les géologues amateurs, surtout pour ce qui est de la paléontologie. Les géologues amateurs sont souvent proches du terrain, disponibles pour la fouille paléontologique, et ont parfois des moyens financiers plus importants que les chercheurs universitaires.

Bien sur, si la plupart des amateurs effectuent des fouilles paléontologiques modérées et sérieuses, certains n'ont d'autres motivations que l'argent ou l'accumulation de trophées.

Une "charte de fouilles" devrait aussi être définie et signée par des structures à caractère scientifique (laboratoire, sociétés géologiques, musées), les amateurs particuliers et les clubs de géologues amateurs.

Les géologues amateurs doivent connaître et respecter les sites préservés où les fouilles sont réglementées ou interdites.

### **5) Garantir la conservation et l'entretien des collections et bibliothèques**

Le patrimoine géologique au sens large inclut les collections pétrologiques, minéralogiques, paléontologiques et les bibliothèques de publications géologiques. Ce patrimoine scientifique et les sites géologiques sont complémentaires, l'un et l'autre étant de valeur patrimoniale élevée. Les collections scientifiques sont parfois les uniques archives de sites géologiques d'importance internationale aujourd'hui disparus. Le bassin houiller du Nord/Pas de Calais est un des bassins houillers les mieux connus au monde, et sert de référence pour les bassins d'avant pays. Des milliers de données diverses (échantillons, relevés stratigraphiques et géométriques, publications) sont l'objet de nombreuses recherches. Ces collections et données sont irremplaçables puisque les sites ne sont plus accessibles. Elles ne sont malheureusement pas à l'abri de dégradation, voire de disparition. Conserver ce patrimoine nécessite des moyens financiers et humains qu'il est nécessaire de développer.

## **V. — CONCLUSION**

Bien plus qu'un simple atlas, ce travail a permis une réelle prise de conscience auprès des différents acteurs de l'importance de préserver notre patrimoine géologique. Depuis sa réalisation, une série de sites ont pu être protégés et valorisés par le conservatoire. Diverses publications à destination du grand public offre une information claire et compréhensible sur la fragilité de notre patrimoine géologique et de nombreuses actions partenariales se mettent en place entre les différents acteurs pour une meilleure déclinaison de la stratégie définie lors de la rédaction de l'atlas.



## LA PROTECTION DU PATRIMOINE GÉOLOGIQUE EN FRANCE BILAN ET PERSPECTIVES.

par Max JONIN (\*)

Le patrimoine géologique, c'est le passé de la Terre. C'est un héritage de 4,5 milliards d'années. Il représente une mémoire fragile. Tout objet géologique disparu l'est définitivement. Le patrimoine géologique doit prendre sa place aux côtés du patrimoine biologique dans les politiques de conservation et de valorisation du patrimoine naturel. Le géologue est le scientifique privilégié qui sait décrypter dans les roches et les paysages l'histoire de la Terre, mais le patrimoine géologique est l'affaire de tous, il est aussi l'histoire de l'Homme.

### I. — DU PASSÉ NE FAISONS PAS TABLE RASE....

Au milieu du 19<sup>ème</sup> siècle, les artistes, sortis des ateliers académiques, trouvent l'inspiration dans la nature. Cette première approche sensible, esthétique, paysagère de notre environnement entraînera la première protection officielle, celle de la forêt de Fontainebleau. Un demi-siècle plus tard (1930) une loi permet de classer des « monuments naturels et des sites dont la conservation ou la préservation présente, au point de vue artistique, historique scientifique, légendaire ou pittoresque, un intérêt général » (en 2002, article L.341-1 du code de l'environnement). Les phénomènes géologiques étant à l'origine de diverses et nombreuses curiosités naturelles, de nombreux sites d'intérêt géologique seront protégés par cette loi, dès lors qu'un site classé « ne peut ni être détruit ni être modifié dans son état ou son aspect sauf autorisation spéciale » (art. L.341-10).

La loi « littoral » de 1986, dans son décret d'application de 1989, évoque sans ambiguïté le patrimoine géologique en indiquant que doivent être protégés « dès lors qu'ils constituent un site ou un paysage remarquable ou caractéristique du patrimoine naturel ou culturel du littoral », « les formations géologiques telles que les gisements de minéraux ou de fossiles, les stratotypes, les grottes ou les accidents géologiques remarquables ». Il reste que la protection est limitée à l'espace et ne concerne pas les objets géologiques en tant que tels.

### II. — RECONNAÎTRE ET PROTÉGER LE PATRIMOINE GÉOLOGIQUE.

#### a) *Intuition géniale sans suite*

Un projet de loi en 1910 prévoyait d'imposer à toute personne de déclarer les fouilles archéologiques ou paléontologiques afin d'en neutraliser le commerce et d'éviter la fuite à l'étranger des plus belles pièces. L'opposition fut si vive au nom de la liberté des fouilles scientifiques et de la menace d'ingérence administrative dans « les œuvres vives de la géologie »... que le projet de loi a été retiré...

#### b) *Premiers pas*

Le texte fondateur sera donc la loi du 10 juillet 1976, relative à la protection de la nature qui était jusqu'à ce jour, l'outil le mieux adapté à la protection des sites géologiques même si cette loi a été rédigée essentiellement par des naturalistes biologiques. La loi prévoit la création de réserves naturelles, notamment « lorsque la conservation (...) des gisements de minéraux et de fossiles (...) présente une importance particulière ou qu'il convient de les soustraire à toute intervention artificielle susceptible de les dégrader ». On peut ainsi envisager « la préservation de (...) formations géologiques, géomorphologiques ou spéléologiques remarquables (...) des sites présentant un intérêt particulier pour l'étude de l'évolution de la vie ou des premières activités humaines ». Des réserves naturelles géologiques peuvent donc être créées par l'Etat. La loi prévoit qu'elles doivent être gérées, et l'Etat leur attribuera un budget annuel. Depuis 1976, 12 réserves naturelles géologiques ont été créées. La loi donnait aussi aux propriétaires fonciers la possibilité de solliciter, pour leurs propriétés privées, un agrément « en réserve naturelle volontaire » pour y protéger « les espèces de la flore et de la faune sauvage présentant un intérêt scientifique et écologique ». De façon juridiquement hasardeuse, le texte a été utilisé pour créer des « réserves naturelles volontaires géologiques » : il y en a 15 à ce jour.

(\*) Président de la commission du patrimoine géologique de Réserves Naturelles de France

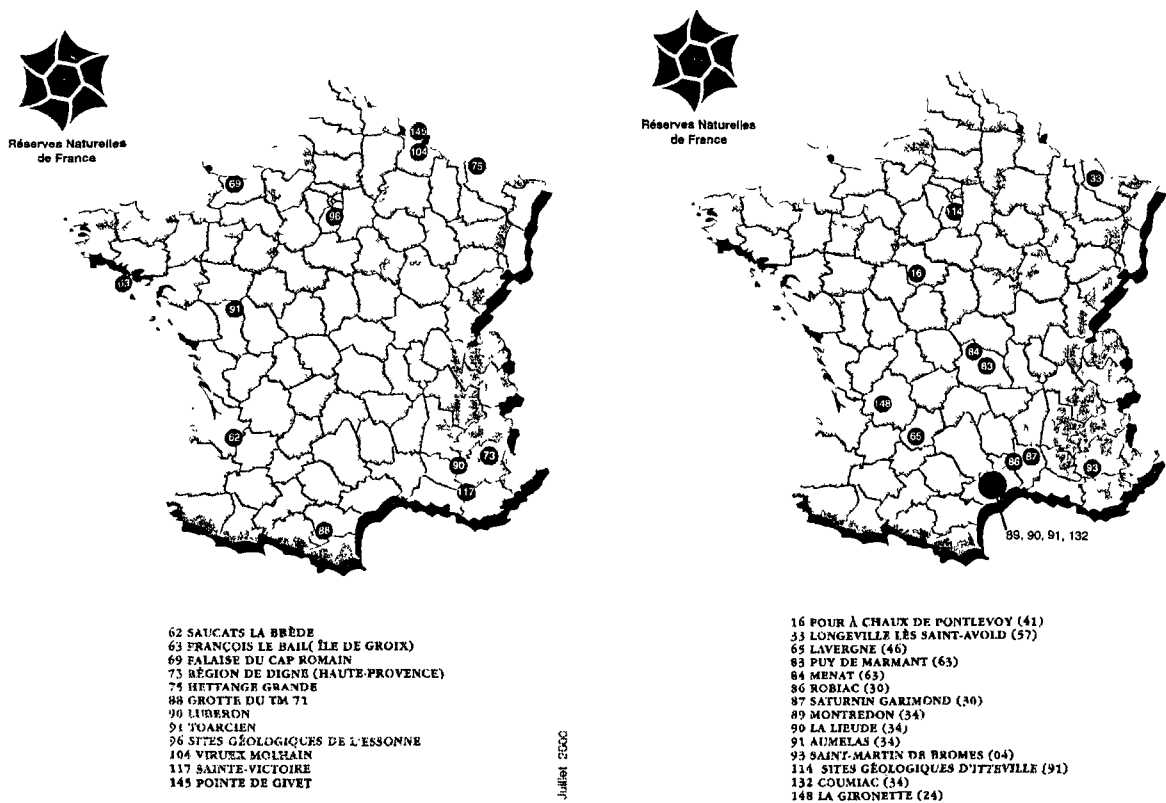


Fig. 1. — Les réserves naturelles « géologiques » et les réserves naturelles volontaires « géologique »

Par ailleurs, un regard géologique porté sur les réserves naturelles créées sur la base d'un patrimoine biologique remarquable a permis de mettre en évidence, ici et là, un intérêt géologique évident. Ainsi, au total, dans le réseau national de quelques 309 réserves naturelles, c'est une soixantaine d'entre elles qui abrite et protège un patrimoine géologique, offrant une belle géodiversité.

Cela étant, le patrimoine géologique doit être appréhendé plus largement et s'étendre à tout ce qui concerne la mémoire de la Terre, sa lecture directe, sa connaissance scientifique, son interprétation. Ainsi, collections publiques et privées, écrits, cartes, etc... sont potentiellement du patrimoine.

#### c) Situation et contexte actuels

Si le chantier de la conservation du patrimoine géologique est ouvert depuis longtemps (dès 1981 commissions «Bouchardeau» du ministère chargé de l'environnement), le mouvement s'est accéléré ces dernières années.

Comme souvent, des initiatives pionnières locales, régionales,...apparaissent et débute les premiers inventaires : en Bretagne en 1993 (SEPNB), en Nord-Pas de Calais en 1997 (conservatoire des sites naturels), en Haute-Loire, en Hérault (conseils généraux), etc...Sous l'impulsion de divers acteurs, des journées nationales (et d'autres régionales) du patrimoine géologique sont organisées : Paris, 1997 ; Lille, 1999 ; Brest, 2002. En 1998, le ministère chargé de l'environnement met en place une conférence permanente du patrimoine géologique (CPPG) chargée de l'assister pour

concevoir et mettre en œuvre une politique concrète de protection, de gestion et de valorisation du patrimoine géologique. La question de l'inventaire préalable se pose rapidement et une commande est passée au BRGM pour la constitution d'une base de données informatisée nationale avec application sur la Région Bretagne. Ce projet pilote terminé a été présenté aux journées nationales de Brest (septembre 2002). La méthode validée par la CPPG peut être utilisée partout en régions, dans les départements ou dans les parcs nationaux, etc... Il est d'ailleurs souhaitable qu'elle le soit pour une bonne cohérence nationale *in fine*. Des groupes d'experts évaluent chaque site inventorié au plan de la valeur patrimoniale et des besoins de protection ce qui donne les bases pour des politiques de conservation aux niveaux national et régional.

#### d) Aux plans législatif et réglementaire

La loi dite « Barnier » de 1995 et celle de 2002 relative à la démocratie de proximité apportent de nouveaux outils adaptés et suffisants pour la protection du patrimoine géologique. Lisons le code de l'environnement : « le patrimoine minéralogique », « tout objet minéral » peuvent être protégés au titre du patrimoine ou de l'intérêt scientifique (article L.342-1) et le ministre chargé de la protection de la nature doit arrêter une liste des sites protégés (*idem*). « La destruction des sites concernant des fossiles permettant d'étudier l'histoire du monde vivant » peut être interdite au nom de l'intérêt scientifique ou des nécessités de la préservation du patrimoine et une liste des sites protégés doit être fixée (articles L.411-1 et L.411-2)

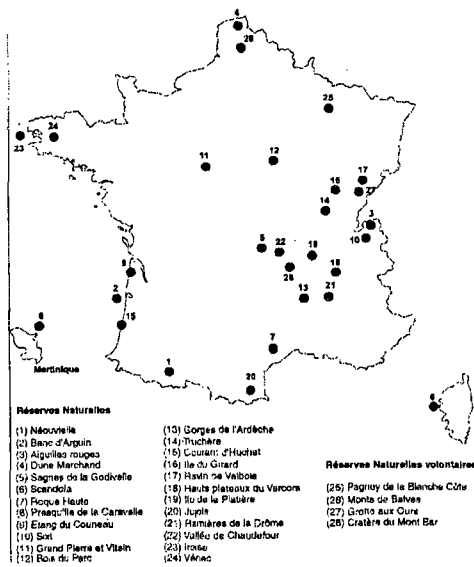


Fig. 2. — Autres réserves naturelles et réserves naturelles volontaires présentant un patrimoine géologique remarquable.

En 2002, le code est complété. Désormais le patrimoine géologique est très clairement et très précisément évoqué (articles L.332-2- II et L.411-5-I ) même s'il faut regretter que, ici et là, le législateur ait éprouvé le besoin d'ajouter

« paléontologique, minéralogique » au risque d'une lecture restrictive du patrimoine géologique à protéger. Désormais, l'Etat a la charge d'un « inventaire du patrimoine national » qui inclut les « richesses (...) géologiques, minéralogiques et paléontologiques » sous la responsabilité scientifique du muséum national d'histoire naturelle (MNHN). Enfin, la réserve naturelle régionale, nouvel outil juridique, prévoit explicitement la protection du patrimoine géologique ce que la réserve naturelle volontaire (désormais disparue) avait oublié.

### III. — CONCLUSION

Le chantier est bien lisible. La boîte à outils semble complète. Rien ne s'oppose à ce que le travail commence. Reste la volonté, la décision politique.

La logique et la rigueur voudraient que les DIREN (directions régionales de l'environnement) lancent les inventaires régionaux du patrimoine géologique sous la responsabilité des géologues experts et du conseil scientifique régional du patrimoine naturel (CSRPN) selon la méthodologie établie pour la base de données informatisée validée par la CPPG. Une validation et évaluation nationales seront faites sous la responsabilité (voulue par la loi) du MNHN permettant d'arrêter la liste nationale des sites à protéger. Ensuite, localement les mesures adaptées au terrain pourront être mises en œuvre pour une action concrète de conservation (maîtrise foncière, statut juridique, réglementation, gestion, valorisation, ...).

### BIBLIOGRAPHIE

Actes du premier symposium international sur la protection du patrimoine géologique, 1994, *Mémoires de la Soc. géol. de France*, nouvelle série, n° 165, 276p

La lettre des réserves naturelles / 10 ans de protection du patrimoine géologique dans les réserves naturelles de France 1997, n° 44-45, 80p.

FROHLICH F., LORENZ J, CORNEE A, (éditeurs) (1998). Premières journées nationales du patrimoine géologique. 18/19 novembre 1998. Coll. Patrimoines Naturels, volume 38, Service du Patrimoine Naturel/IEGB/MNHN, Paris, 72

Collectif (2000). — Deuxièmes Journées Nationales du Patrimoine Géologique, *Ann. Soc. Géol. Nord*, 2e série, 7(4), 232p



## DES OUTILS POUR ENSEIGNER LA GÉOLOGIE

### Texte de l'intervention de Philippe GAYOT (\*)

De nombreux outils modernes : CD Rom, logiciels manipulations virtuelles etc. existent pour enseigner les sciences de la Terre. Mais, quand on recherche les bases qui permettent de mettre en place les modes de raisonnement du géologue et les outils de la géologie, c'est à dire pour rendre accessibles échantillons et roches en place, les problèmes deviennent rapidement importants : carrières interdites pour raisons de sécurité, collèges ou lycées récents non équipés des collections de références bien souvent accumulées au cours du temps, collègues arrivant d'académies lointaines ne connaissant pas la géologie régionale sont parmi d'autres problèmes, des handicaps sérieux. Il y a quelques années, cela n'aurait pas gêné grand monde : certains hauts responsables pédagogiques ont pu même déclarer que tout en restant intéressante, la sortie sur le terrain n'était plus utile à (l'heure des satellites et des outils informatiques. Actuellement, retour de balancier habituel dans les programmes, cette sortie est non seulement conseillée mais encore devient obligatoire en collège et en première scientifique. Il faut donc trouver de "nouveaux vieux outils" pour enseigner la géologie.

#### I. — DES SITES GÉOLOGIQUES À EXPLOITER

Avant cette évolution, en 1996-97, le musée d'histoire naturelle de Lille avait engagé avec le Conservatoire des Sites Naturels du Nord-Pas de Calais, un inventaire des sites géologiques remarquables de la région. Cet inventaire a donné lieu au début de l'année 2002 à la publication de "La roche dans tous ses états", livret guide des sites géologiques régionaux. Ce document recense plusieurs dizaines de sites géologiques accessibles aux classes soit librement, soit avec des associations dont le service pédagogique du musée d'histoire naturelle a formé les animateurs. Ce document ne se veut pas exhaustif, tous les sites intéressants ne pouvaient y figurer mais le site Internet de l'Académie de Lille accueillera volontiers toutes les contributions pertinentes sur ce thème. Par ailleurs, des contacts sont actuellement en train de se nouer avec des collègues de l'université de Mons pour inclure des sites belges dans ce patrimoine pédagogiquement exploitable et des opportunités semblent se dessiner avec une carrière de la région de Wallers-Trélon. Enfin, l'université de Lille propose régulièrement en partenariat avec l'I.U.F.M. des formations sur les sites régionaux ou ardennais.

On pourrait nous objecter que les programmes d'enseignement étant essentiellement centrés sur les questions

de tectonique des plaques, notre région essentiellement sédimentaire et peu tectonisée en surface offre peu matière à enseignement. Toutefois, le Paléozoïque du Boulonnais, de l'Avesnois, voire des Ardennes pour les établissements les plus orientaux offre des exemples de compréhension tout à fait exploitables ; le Jurassique du Boulonnais, avec certaines précautions, peut être interprété comme une marge subsidente liée à l'ouverture de l'Atlantique Nord et la transgression du Crétacé supérieur être mise en relation directe avec la forte activité de la dorsale atlantique au moment où se déposait la craie.

D'autre part, les textes officiels, (cycle central pour le collège, 1<sup>er</sup>S pour le lycée) rappellent que la sortie de terrain « permet d'initier l'élève aux méthodes utilisées par le géologue et de le sensibiliser à l'importance de la collecte des données de terrain ». Le contexte et les problèmes géologiques choisis doivent se rattacher au contenu du programme ce qui est parfaitement possible.

#### II. — DES CENTRES DE RESSOURCES GÉOLOGIQUES

Par rapport ou aux régions Picardie ou Champagne-Ardenne, comparativement assez peu dotées, le Nord-Pas de Calais dispose de nombreuses structures associatives ou dépendantes de collectivités territoriales où le patrimoine géologique est exposé et peut être exploité pédagogiquement. Elles n'ont pas toutes la même taille et ne présentent pas toutes les mêmes intérêts ni la même disponibilité. Il est cependant intéressant de les connaître de manière à pouvoir les exploiter rapidement. Il serait fastidieux de vouloir toutes les citer, (fig. 1), on peut néanmoins rappeler que le Musée Géologique et Houiller de Lille a fait peau neuve en septembre 2002 et annoncer que ce sera bientôt le cas de la géologie au Centre Historique Minier de Lewarde (une exposition de préfiguration est prévue pour début 2003). Enfin le Palais de L'Univers de Capelle la Grande envisage pour 2004 ou 2005 l'ouverture d'un espace muséographique en partie consacré aux origines de la planète et de la vie où naturellement les sciences de la Terre auront leur place. Il est cependant dommage que l'Est de la région soit si peu doté en centres de ressources géologique malgré son patrimoine souterrain important. Le Musée du marbre de Bellignies expose des souvenirs de l'exploitation marbrière sans aborder vraiment la géologie et la maison de la Fagne de l'Ecomusée de Fourmies-Trélon n'a pas

(\*) Professeur chargé de mission au Musée d'Histoire Naturelle de Lille, Responsable du service pédagogique):

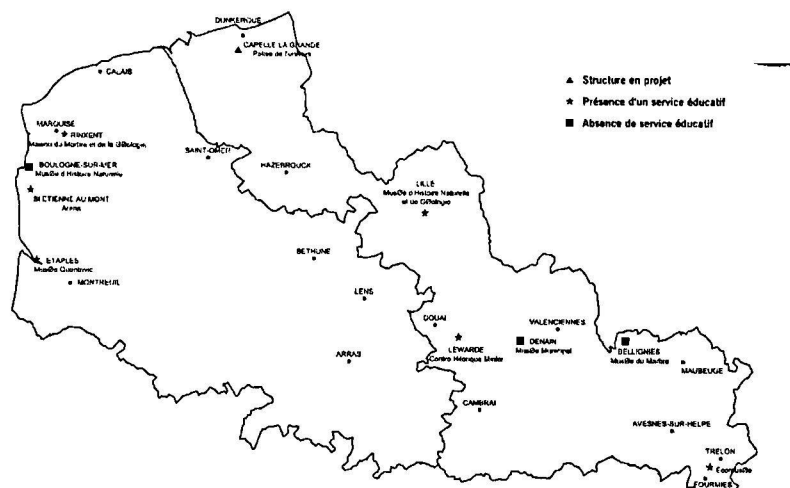


Fig. 1. — Lieux d'exposition ex-situ du patrimoine géologique en région Nord-Pas de Calais.

un fonctionnement régulier. Il me semblerait intéressant de développer, en s'appuyant sur des structures ou des associations locales une petite unité muséographique dans cette zone éventuellement en partenariat avec la Belgique ou d'autres régions voisines de la nôtre. On pourrait aussi envisager, en s'appuyant sur les collections de roches locales souvent accumulées patiemment par des générations d'enseignants et dormant dans les tiroirs des laboratoires des collèges et des Lycées, de bâtir un outil fixe ou itinérant qui permettrait aux élèves de Landrecies, de Maubeuge ou de Fourmies de ne pas aller jusqu'à Lille ou Bruxelles pour observer les roches et les fossiles qui sont sous leurs pieds. Enfin, il est aussi utile de rappeler qu'en Belgique, des structures intéressantes peuvent être visitées, qu'il s'agisse des musées d'histoire naturelle de Bruxelles, de Mons, de Tournai, de la Maison de l'Iguanodon de Bemissart ou du Jardin Géologique d'Obourg.



Fig. 2.

### III. — DES OUTILS POUR TRAVAILLER EN CLASSE

Depuis 1992, le Musée d'histoire naturelle de Lille proposait à la vente des moulages de fossiles régionaux ou extra régionaux susceptibles de présenter un intérêt pédagogique. Ces outils sont toujours disponibles mais nous avons décidé dans le cadre du centenaire du musée Gosselet de centraliser dans des malles pédagogiques une quantité importante d'information disponible centralisant les productions pédagogiques de plusieurs acteurs comme Lewarde, le B.R.G.M. ou le musée d'histoire naturelle de Lille sur cinq thèmes fortement liés à la géologie régionale :

- Erosion et sédimentation et formation des paysages : (malle "sable") ;
- Origine, pollution et gestion de l'eau : (malle "eau") ;
- Reconstitution de paléo-écosystèmes marins et évolution des espèces : (malle "Crétacé") ;
- Reconstitution de paléo-écosystème continental, exploitation houillère et mise en évidence de la migration continentale : (malle "Carbonifère") ;
- Reconstitution des principaux paysages régionaux fossiles et utilisation des roches par l'Homme : (malle "Roches").

Ces outils sont prêtés gratuitement aux professeurs pendant trois semaines, à charge pour l'établissement de les assurer. Ils sont conçus pour réaliser de véritables travaux pratiques : par exemple, la malle "Crétacé" présente trois espèces de bivalves mettant nettement en évidence la notion "d'espèce intermédiaire" montrant des caractères morphologiques composites. On peut aussi s'en servir pour réaliser de micro-expositions et enfin, elles peuvent aussi être utilisées dans d'autres cadres comme les itinéraires de découverte, les travaux personnels encadrés, ou des opérations spécifiques au département du Nord comme "science collège".

L'ensemble de ces opérations constitue un tout que nous avons l'intention de développer dans les années à venir entre autre grâce à l'aide de nos divers partenaires. Nous restons en effet persuadés que le contact concret avec le "caillou" et ses merveilles est pour les élèves une voie d'entrée privilégiée dans une voie qui, d'après un article récent de "La Recherche" sur les préférences des jeunes de 15 à 25 ans en matière de sciences, n'est pas particulièrement attractive. Ces contacts concrets sont aussi des moyens de sensibiliser les élèves à la notion finalement assez récente de patrimoine géologique qui contrairement à l'opinion de Pline l'ancien ne se renouvelle pas, du moins à l'échelle humaine (fig. 2).

Sont en vente au Siège de la Société :

### MÉMOIRES (\*)

<b>Tome I</b> n° 1. — Ch. BARROIS, <i>Recherches sur le terrain crétacé de l'Angleterre et de l'Irlande</i> , 1876, 232 p.....	51,20 €
n° 2. — P. FRAZER, <i>Géologie de la partie Sud-Est de la Pennsylvanie</i> , 1882, 178 p.....	38,40 €
n° 3. — R. ZEILLER, <i>Mémoire sur la flore houillère des Asturies</i> , 1882, 24 p.....	5,50 €
<b>Tome IV</b> n° 1. — J. GOSSELET, <i>Etudes sur les variations du Spirifer Verneuilli</i> , 1894, 63 p., 7 pl.....	13,75 €
<b>Tome VI</b> n° 1. — P. BERTRAND, <i>Etude du stipe de l'Adelophyton jutieri</i> , B. Renault, 1907, 38 p., 4 pl.....	13,00 €
n°2. — J. GOSSELET et al., <i>Faune silurodévonienne de Liévin</i> , 1912-1920. Fasc. 2.....	51,20 €
n°3. — V.COMMONT, <i>Saint-Acheul et Montières : Notes de Géologie, de Paléontologie et de Préhistoire</i> , 1909, 68 p., 3 pl.....	23,75 €
<b>Tome VII</b> n°1. — P. BERTRAND, <i>Etude des Stipes d'Asterochloena laxa</i> , Stenzel, 1911, 72 p., 6 pl.....	15,55 €
<b>Tome VIII</b> n° 2. — Ed. LEROUX, <i>Le tunnel de l'Ave Maria</i> , 1929, 50 p., 5 pl.....	18,30 €
<b>Tome IX</b> n° 1. — G. DUBAR, <i>Etude sur le Lias des Pyrénées françaises</i> , 1925, 332 p., 7 pl.....	65,85 €
n°2. — G. FOURNIER et al., <i>Poissons élasmodontes de Denée</i> , 1926, 23 p., 6 pl.....	14,65 €
<b>Tome X</b> n° 2. — J. LAVERDIERE, <i>Terrains paléozoïques des Pyrénées occidentales</i> , 1931, 132 p., 8 pl.....	27,50 €
<b>Tome XII</b> — D. LEMAITRE, <i>Faune des calcaires dévoniens du Bassin d'Anceis</i> , 1934, 268 p., 18 pl.....	51,20 €
<b>Tome XIII</b> — P. BRICHE et al., <i>Flore infraliasique du Boulonnais</i> , 1963, 145 p., 11 pl.....	38,40 €
<b>Tome XIV</b> — G. WATERLOT, <i>Les Gigantostrocés du Siluro-Dévonien de Liévin</i> , 1966, 23 p., 5 pl.....	13,00 €
<b>Tome XV</b> — J. MANIA, <i>Gestion des Systèmes aquifères. Applications au Nord de la France</i> , 1978, 228 p.....	27,50 €
<b>Tome XVI</b> — A. BOUROZ et al., <i>Essai de synthèse des données acquises dans la gènèse et l'évolution des marqueurs pétrographiques dans les bassins houillers</i> , 1983, 118 p., 10 pl.....	38,10 €

### PUBLICATIONS (\*)

Publication N° 1. — J. CHOROWICZ, <i>Etude géologique des Dinarides le long de la transversale Split-Karlovac (Yougoslavie)</i> .....	20,00 €
Publication N° 2. — J. CHARVET, <i>Essai sur un orogène alpin : Géologie des Dinarides au niveau de la transversale de Sarajevo (Yougoslavie)</i> .....	23,00 €
Publication N° 3. — J. ANGELIER, <i>Néotectonique de l'arc égéen</i> .....	22,00 €
Publication N° 4. — J.J. FLEURY, <i>Les zones de Gavrovo-Tripolitza et du Pinde-Olonos (Grèce continentale et Péloponnèse du Nord). Evolution d'une plate-forme et d'un bassin dans leur cadre alpin</i> .....	26,70 €
Publication N° 5. — M. COUSIN, <i>Les rapports Alpes-Dinarides. Les confins de l'Italie et de la Yougoslavie</i> .....	26,70 €
Publication N° 6. — F. THIEBAULT, <i>L'évolution géodynamique des Héliénides externes en Péloponnèse méridional</i> .....	28,20 €
Publication N° 7. — P. DEWEVER, <i>Radiolaires du Trias et du Lias de la Téthys</i> .....	27,50 €
Publication N° 8. — J. FERRIERE, <i>Paléogéographie et tectoniques superposées dans les Héliénides internes : les massifs de l'Othrys et du Pélion (Grèce continentale)</i> .....	28,20 €
Publication N° 9. — H. MAILLOT, <i>Les Paléoenvironnements de l'Atlantique sud : Apport de la géochimie sédimentaire</i> .....	20,00 €
Publication N° 10. — Cl. BROUSMICHE, <i>Les Fougères sphénoptériennes du Bassin Houllier Sarro-Lorrain</i> .....	30,00 €
Publication N° 11. — B. MISTIAEN, <i>Phénomènes récifaux dans le Dévonien d'Afghanistan (Montagnes Centrales). Analyse et systématique des Stromatopores</i> .....	30,00 €
Publication N° 12. — T. HOLTZAPFFEL, <i>Les minéraux argileux. Préparation, analyses diffractométriques et détermination</i> ..... T.T.C.	13,75 €
Publication N° 13. — J.L. MANSY, <i>Géologie de la Chaîne d'Ormeica des Rocheuses aux plateaux intérieurs (Cordillère Canadienne). Evolution depuis le Précambrien</i> .....	30,00 €
Publication N° 14. — C. BECK, <i>Géologie de la Chaîne Caraïbe au méridien de Caracas (Venezuela)</i> .....	19,00 €
Publication N° 15. — J.M. DEGARDIN, <i>Le Silurien des Pyrénées : Biostratigraphie, Paléogéographie</i> .....	19,00 €
Publication N° 16. — J. SIGAL, <i>Les recherches sur les Foraminifères fossiles en France des environs de 1930 à l'immédiat après-guerre</i> ..... T.T.C.	15,00 €
Publication N° 17. — F. DELAY, <i>Etude et cartographie géologiques du Massif pyrénéen de l'Agly (Fasc. 1 : Evolution tectono-métamorphique ; Fasc. 2 : Traitement informatique des microanalyses chimiques ; Fasc. 3 : Carte géol. en couleurs 1/25000 Massif Agly)</i> ..... T.T.C. (les 3 fasc.)	54,90 €
Publication N° 18. — A. KHATIR, <i>Structuration et déformation progressive au front de l'allochtone ardennais (Nord de la France)</i> ..... T.T.C.	23,00 €
Publication N° 19. — C. LAMOUREUX, <i>Les mylonites des Pyrénées. Classification. Mode de formation. Evolution</i> .....	23,00 €
Publication N° 20. — G. MAVRIKAS, <i>Evolution Crétacé-Eocène d'une plate-forme carbonatée des Héliénides externes. La plate-forme des Ori Valtou (Massif du Gavrovo), Zone de Gavrovo-Tripolitza (Grèce continentale)</i> .....	23,00 €
Publication N° 21. — P. BRACQ, <i>Effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux, apport de l'analyse morphostructurale</i> .....	23,00 €
Publication N° 22. — N. FAGEL, <i>Flux argileux du Néogène au Quaternaire dans l'Océan Indien Nord, mise en évidence et interprétation</i> .....	23,00 €
Publication N° 23. — G. BUSSON et A. CORNÉE, <i>L'événement océanique anoxique du Cénomaniens supérieur-terminal</i> .....	19,00 €
Publication N° 24. — B. LOUCHE, <i>Limites littorales de la nappe de la Craie dans la région Nord Pas-de Calais. Relations eaux souterraines-eaux superficielles-mer</i> .....	23,00 €
Publication N° 25. — J. G. BREHERET, <i>L'Aptien et l'Albien de la fosse vocontienne (des bordures au bassin). Evolution de la sédimentation et enseignements sur les événements anoxiques</i> .....	46,00 €
Publication N° 26. — T. PLETSCHE, <i>Clay minerals in Cretaceous deep-water formations of the Rif and the Betic Cordillera (N. Morocco and S. Spain)</i> .....	19,00 €
Publication N° 27. — E. VENNIN, <i>Architecture sédimentaire des Bioconstructions permo-carbonifères de l'Oural méridional (Russie)</i> .....	27,50 €
Publication N° 28. — Actes des 1 <sup>ères</sup> journées régionales Nord/Pas-de-Calais du Patrimoine géologique.....	15,00 €
Publication N° 29. — F. LACQUEMENT, <i>L'Ardenne Varisque. Déformation progressive d'un prisme sédimentaire préstructuré ; de l'affleurement au modèle de chaîne</i> .....	26,70 €
Publication N° 30. — R. PLATEVOET, <i>Diversité des formations pyroclastiques s.l. du strato-volcan du Cantal au Miocène. Elaboration d'une méthodologie de corrélation</i> .....	26,70 €

Les membres abonnés bénéficient d'une réduction de 20% sur un exemplaire de chacune de ces publications.

Les prix sont augmentés des frais de port et d'emballage quand les volumes ne sont pas pris directement au dépôt.

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

# SOMMAIRE

## Tome 10 (2<sup>me</sup> série), Fascicule 3

parution 2003

	pages
Patrick DE WEVER et Jean-Yves REYNAUD . — Gosselet et la notion de temps en géologie.....	87
- Denise BRICE et Bruno MISTIAEN. — Le Dévonien : ses subdivisions. Le Strunien un sous-étage du Famennien ? .....	97
- Jean-Pierre LAVEINE, Shanzhen ZHANG et Yves LEMOIGNE. — Apport des études paléobotaniques dans le Bassin Houiller du Nord-Pas-de-Calais aux reconstitutions paléogéographiques du Carbonifère .....	111
Jean-Louis MANSY. — La réactivation du socle Paléozoïque au Nord-Ouest de la France.....	135
Alexis GODET, Jean-François DECONINCK, Francis AMEDRO, Pierre DRON, Pierre PELLENARD et Irène ZIMMERLIN — Enregistrement sédimentaire d'événements volcaniques dans le Turonien du Nord-Ouest du Bassin de Paris .....	147
- Francis ROBASZYNSKI et Francis AMÉDRO . — Le Crétacé du Nord de la France : Évolution des concepts et aspects nouveaux depuis Jules Gosselet .....	163
- Jean SOMMÉ. — Formations superficielles ou Quaternaire : les données de la France septentrionale depuis Jules Gosselet et Jules Ladrière.....	183
Brigitte VAN VLIET-LANOË. — Changements climatiques actuels : Evolution normale ou perturbation anthropique ? .....	191
- Eric GROESSENS. — Les Marbres du Nord de la France et du Boulonnais .	209
Norbert CRAMPON, Jacky MANIA et Jean-Yves CAOUS. — Aquifères et ressources en eau souterraine du Nord-Pas-de-Calais .....	219
Daniel BERNARD et Karine VALLEE. — Découpage et première caractérisation des masses d'eau souterraine dans le bassin Artois Picardie .....	233
Hervé PIGNON. — Maîtrise de l'énergie, énergies fossiles, énergies renouvelables.....	239
- Fabrice CUGNY. — Conservatoire des sites naturels du Nord et du Pas de Calais : Conservation in situ et inventaire du patrimoine géologique du Nord-pas-de-Calais : réalisations et perspectives.....	241
- Max JONIN. — La protection du patrimoine géologique en France : bilan et perspectives .....	245
Philippe GAYOT. — Des outils pour enseigner la géologie.....	249

© 2003 Société Géologique du Nord Editeur, Lille

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

Imprimé en France (Printed in France)