



*Société*  
*Géologique du*  
*Nord*

*ANNALES*

**Tome 17 (2<sup>ème</sup> série)**

*parution 2010*

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD  
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

# SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

## Extraits des Statuts

### Article 2

- Cette Société a pour objet de concourir à l'avancement de la géologie en général, et particulièrement de la géologie de la région du Nord de la France.
- La Société se réunit plusieurs fois dans l'année.
- La Société publie des Annales mises en vente selon un tarif établi par le Conseil. Les Sociétaires bénéficient d'un tarif préférentiel.

### Articles 5

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

## Extraits du Règlement Intérieur

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

§ 13. - Seuls les membres ayant acquitté leurs cotisation et abonnement de l'année peuvent publier dans les Annales. L'ensemble des notes présentées au cours d'une même année, par un auteur, ne peut dépasser le total de 8 pages, 1 planche simili étant comptée pour 2 p. 1/2 de texte.

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

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

§ 18. - Les Mémoires sont publiés par fascicule après décision du Conseil.

## Avertissement

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

## Diffusion des articles des Annales

La SGN n'imprime plus de tirages à part sur papier de ses articles. Ceux-ci sont diffusés sous forme électronique pdf (Portable Document Format) aux conditions définies par le Conseil d'administration :

- pour un auteur membre de la SGN : pdf gratuit (sous réserve que l'auteur se sera acquitté des frais de dépassement au cas où l'article ferait plus de 8 ou 10 pages) ;
- pour un 1<sup>er</sup> auteur non-membre : pdf gratuit (sous réserve que l'auteur se sera acquitté des frais de publication appliqués aux non-membres).

Pour toute autre personne désirant acquérir un article des *Annales*, il lui sera fourni au format pdf contre la somme de 20 € TTC (tarif réduit de 10 € TTC pour un étudiant sur présentation d'un justificatif).

## Cotisations et Abonnements (2010)

	QUALITÉ	COTISATION	ABONNEMENT aux Annales	TOTAL
France et Union Européenne.	Personnes physiques	10 € T.T.C.	25 € T.T.C.	35 € T.T.C.
Autres Pays	Personnes physiques	10 € T.T.C.	30 € T.T.C.	40 € T.T.C.
Tous Pays	Personnes morales	50 € T.T.C.	50 € T.T.C.	100 € T.T.C.

Abonnement des étudiants sur présentation d'un justificatif : 50% de réduction.

Abonnement des non-membres : FRANCE : 50 € T.T.C. — Union Européenne : 50 € H.T. — Autres Pays : 50 € H.T.

Sont en vente au Siège de la Société :

## FASCICULES SPÉCIAUX

*Ecorché géologique infra mésozoïque* (extrait de " Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France", présentée par C.F.P. (M), COPESEP et S.N.P.A.).

" Géologie du Nord de la France " (T. LXXXIX, fasc. 1).

" Rupture des roches et massifs rocheux " (T. XCV, fasc. 3).

" Données nouvelles sur le Paléozoïque de l'Europe occidentale " (T. XCVI, fasc. 4 et T. XCVII, fasc. 1 ).

" Apports récents à la Géologie du Gondwana " (T. XCVII, fasc. 4).

" Géologie de l'Europe, du Précambrien aux bassins sédimentaires post-hercyniens " (T. XCIX, fasc. 1).

" Géologie appliquée aux problèmes d'énergie et de matières premières " (T. Cil, fasc. 2).

" Tectonique cassante en distension et coulissement " (T. CIII, fasc. 2-3).

" Aspect de la Géologie de l'Ardenne, hommage au Professeur Beugnies " (T. CV, fasc. 2).

" Paléozoïque supérieur continental " (T. CVI, fasc. 2).

" Actualisation de quelques thèmes géologiques " (T. CVI, fasc. 4).

" Géologie et aménagement régional " (T. CIX, fasc. 2).

" Le Nord et son environnement géologique. " (T. 2, 2me série, fasc. 1).

## MÉMOIRES (\*)

<b>Tome I</b> n° 1. — Ch. BARROIS, <i>Recherches sur le terrain créacé de l'Angleterre et de l'Irlande</i> , 1876, 232 p. ...	30,00 €
n° 2. — P. FRAZER, <i>Géologie de la partie Sud-Est de la Pennsylvanie</i> , 1882, 178 p. ....	25,00 €
n° 3. — R. ZEILLER, <i>Mémoire sur la flore houillère des Asturies</i> , 1882, 24 p. ....	2,50 €
<b>Tome IV</b> n° 1. — J. GOSSELET, <i>Etudes sur les variations du Spirifer Verneulli</i> , 1894, 63 p., 7 pl. ....	12,00 €
<b>Tome VI</b> n° 1. — P. BERTRAND, <i>Etude du stipe de l'Adelophyton jutieri</i> , B. Renault, 1907, 38 p., 4 pl. ....	7,00 €
<b>Tome VIII</b> n° 2. — Ed. LEROUX, <i>Le tunnel de l'Ave Maria</i> , 1929, 50 p., 5 pl. ....	10,00 €
<b>Tome IX</b> n°1. — G. DUBAR, <i>Etude sur le Lias des Pyrénées françaises</i> , 1925, 332 p., 7 pl. ....	30,00 €
n°2. — G. FOURNIER <i>et al.</i> , <i>Poissons élasmodontes de Denée</i> , 1926, 23 p., 6 pl. ....	7,50 €
<b>Tome X</b> n° 2. — J. LAVERDIERE, <i>Terrains paléozoïques des Pyrénées occidentales</i> , 1931, 132 p., 8 pl. ....	14,00 €
<b>Tome XII</b> — D. LEMAITRE, <i>Faune des calcaires dévoniens du Bassin d'Ancenis</i> , 1934, 268 p., 18 pl. ....	30,00 €

Pour toute commande, s'adresser au Secrétariat de la SGN : Université Lille 1 – Sciences et Technologies, UFR des Sciences de la Terre (SN5), F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France).

(\*) Tous les prix sont indiqués T.T.C. (TVA 5.50% incluse).



*Société*  
*Géologique du*  
*Nord*

*ANNALES*

**Tome 17 (2<sup>ème</sup> série)**

*parution 2010*

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD  
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

CONSEIL D'ADMINISTRATION

— 2010-2012 —

<i>Président</i> .....	M. A. BLIECK
<i>Premier Vice-Président</i> .....	M. B. MISTIAEN
<i>Seconds Vice-Présidents</i> .....	M <sup>lle</sup> . D. BRICE M. O. AVERBUCH
<i>Secrétaire</i> .....	M. J. LEPLAT
<i>Trésorier</i> .....	M. B. QUESNEL
<i>Bibliothécaire</i> .....	M. C. LOONES
<i>Directeur de la Publication</i> .....	M. J.-P. DE BAERE
<i>Conseillers</i> .....	M. F. AMÉDRO M <sup>me</sup> C. DERYCKE M. T. OUDOIRE M. F. ROBASZYNSKI M. P. SCHRAEN M. A. TRENTESAUX
<i>Site Web</i> .....	M. P. CIURLIK

---

CONSEIL SCIENTIFIQUE

— 2008-2010 —

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

---

CONSEIL ÉDITORIAL

— 2008-2010 —

MM. F. AMÉDRO, A. BLIECK, B. MISTIAEN, F. ROBASZYNSKI,  
N. TRIBOVILLARD et M<sup>lle</sup>. D. BRICE

# A N N A L E S D E L A S O C I É T É G É O L O G I Q U E D U N O R D

Société fondée en 1870 et autorisée par arrêtés en date des 3 Juillet 1871 et 28 Juin 1873

Secrétariat : **Société Géologique du Nord**  
Sciences de la Terre, 59655 Villeneuve d'Ascq Cedex  
Tél. 03 20 43 41 40 (président) - C.C.P. Lille 52-47 Y

---

## AVANT-PROPOS

### 2010 : ANNEE DE CONSOLIDATION DE LA SGN

par Alain BLIECK, président 2010-2012

Comme l'ont écrit les deux présidents précédents de la SGN, MM. Francis Robaszynski et Francis Amédéo (*in* : *Annales SGN*, 2<sup>e</sup> série, tome 14, p. 1-2 et tome 16, p. 1-3), les quatre années récentes ont été cruciales pour la survie et la revitalisation de la Société. Les années 2006-2008 furent celles des changements introduits par F. Robaszynski : ouverture aux amateurs, réunions à la Maison Régionale de l'Environnement et des Solidarités (MRES) à Lille, passage à un fascicule par tome annuel des *Annales*, relance des sorties de terrain (anciennement connues sous le nom d'« excursions du président »), établissement d'une charte SGN pour les adhérents, négociation de la gestion de la bibliothèque SGN avec le Service Central de Documentation (SCD) de l'Université Lille 1, etc. Les années 2008-2010 furent entre autres choses celles du début de la numérisation des *Annales* pendant la présidence de F. Amédéo, dans le cadre d'une convention passée avec le SCD de l'Université Lille 1 (qui inclut la bibliothèque centrale du campus de Villeneuve d'Ascq où est déposée et gérée la bibliothèque de la SGN). L'ouverture aux étudiants et aux enseignants du secondaire s'est accrue par leur participation à nos sorties de terrain dans le cadre d'accords amicaux passés avec l'Association Géosciences de Lille 1 (AGEOL, ex- Association des étudiants en Géologie de Lille 1) et l'Association des Professeurs de Biologie et Géologie (APBG). L'ouverture aux amateurs s'est poursuivie avec la participation de nos amis de l'Association pour le Développement, la Recherche et l'Etude en matière de Minéralogie, Archéologie et Paléontologie (ADREMAP). Les activités de la Société ont atteint leur vitesse de croisière avec, en 2010, une Assemblée générale statutaire, une Assemblée générale de présentation de communications orales, deux sorties de terrain, deux conférences grand public, la participation active de la Société aux Journées de la Craie organisées à l'Université polytechnique de Mons et au Jardin géologique d'Obourg (Belgique) par le Pr. Jean-Marie Charlet. L'actuel président a donc hérité d'une Société en bien meilleure santé qu'il y a un certain nombre d'années. D'anciens membres individuels ou institutionnels l'avaient quittée à cause de la baisse drastique de ses activités : certains d'entre eux sont déjà revenus. Des membres nouveaux et jeunes participent à ses activités et réunions. Le nombre de membres cotisants est passé de 13 au début de la présidence de F. Robaszynski à 72 à ce jour. C'est la meilleure preuve de la vitalité retrouvée de la SGN qui est redevenue attractive et vivante. Comme me l'a fait remarquer F. Amédéo, ceci est un cas rare et peut-être unique dans les sociétés académiques traditionnelles nées au XIX<sup>e</sup> siècle et dont la plupart ont aujourd'hui disparu, victimes d'un vieillissement de leurs membres et des ravages liés au classement en rang C de leurs revues périodiques. En ce sens, l'ouverture aux amateurs, aux étudiants et aux enseignants, et l'organisation d'un calendrier dynamique alternant conférences et sorties sur le terrain ainsi que la numérisation des *Annales* sont des atouts majeurs. La Société, par l'intermédiaire de notre collègue José Leplat, a renoué des liens avec quelques sociétés d'extraction de matériaux tels que le Groupe Carrières du Boulonnais et le Groupe Eiffage qui ont ouvert leurs carrières à nos membres en 2010 (20 mars et 1<sup>er</sup> octobre respectivement). Une quarantaine de personnes ont participé à la sortie du 20 mars, ce qui est la plus forte participation enregistrée à l'une des activités de la Société depuis bien longtemps !

La première livraison de la numérisation des *Annales* a été faite en début d'année : les tomes 1 (1875) à 64 (1939) et les tables générales des années correspondantes sont désormais accessibles gratuitement en ligne via l'adresse URL suivante : <https://iris.univ-lille1.fr/dspace/simple-search?query=Annales>. Le logiciel qui gère la banque de données IRIS permet une interrogation par mots-clés directement sur les fichiers pdf des *Annales*. Le tome 17 des *Annales* sera livré à la fin de l'année civile 2010 : il inclut 6 articles portant sur des sujets variés depuis la géologie du détroit du Pas-de-Calais jusqu'à l'histoire des sciences (concernant un ancien président de la Société), en passant par des champignons de l'ambre sparnacien, une flore du Miocène, une coupe dans le Givétien des Ardennes et un sujet d'actualité sur l'origine des tétrapodes. J'en souhaite bonne lecture à tous nos membres abonnés. Le livre « *Des roches aux paysages dans le Nord – Pas-de-Calais — Richesse de notre patrimoine* »

*géologique* », co-édité par la SGN et le Conservatoire des Sites Naturels du Nord et du Pas-de-Calais (Robaszynski F. & Guyétant G. coord. 2009), s'est bien vendu puisqu'il est quasiment épuisé. Le CSNNPC en a préparé un deuxième tirage qui est désormais disponible à la vente. La revue nationale d'informations géologiques *Géochronique*, dans ses numéros 106 (2008) et 114 (2010), ainsi que *La Lettre d'info de la MRES* (été 2010) se sont faites l'écho de nos activités.

La SGN se préoccupe également du patrimoine géologique régional tant *in situ* qu'*ex situ*. Plusieurs de ses membres sont impliqués dans des opérations d'inventaire, de sauvegarde et de valorisation de carrières : carrière du Griset (société Stinkal) ouverte dans les calcaires dévoniens du Boulonnais, carrières de Loos-Emmerin-Haubourdin (ex société Ramery) ouvertes dans les craies du Crétacé supérieur. Pour ces dernières, les actions seraient réalisées en partenariat avec la communauté urbaine de Lille, l'Espace Naturel Lille Métropole et porteraient non seulement sur la géologie mais aussi sur le patrimoine culturel historique et économique local. En ce qui concerne son patrimoine propre, la SGN a terminé le déménagement de ses réserves (*Annales, Mémoires et Publications*) de l'ancien au nouveau local accordé par l'UFR des Sciences de la Terre de l'Université Lille 1, ce qui permet d'assurer la préservation des milliers de fascicules en notre possession, datant pour certains du XIXe siècle. Ce déménagement a été l'occasion de trier, classer et ranger de façon accessible l'ensemble des *Annales* et *Mémoires*, permettant ainsi de répondre aux commandes d'ouvrages anciens provenant de France et de l'étranger. La même opération vient d'être menée à bien pour les *Publications*. Une diffusion gratuite des *Publications de la SGN* à un certain nombre d'institutions et de bibliothèques du nord de la France et de la Belgique a été réalisée, d'où un élargissement de l'accès à nos publications auprès du public.

Le programme de l'année 2011 comporte une Assemblée générale statutaire (qui comprendra vraisemblablement une AG extraordinaire de révision des statuts), une séance avec présentation de communications orales, deux sorties de terrain avec une visite du musée de l'ADREMAP à Grande-Synthe, deux conférences grand public et l'organisation du Forum GeoReg du 23 au 27 octobre 2011, sous l'égide la Fédération Française des Géosciences (FFG) que la SGN a rejoint en 2010.

Qu'il me soit permis ici de remercier tous ceux et toutes celles qui, par leur engagement et leur enthousiasme, ont fait et font que la Société continue d'exister et de vivre. Je citerai tout particulièrement les deux présidents précédents bien entendu, mais aussi quelques-uns des autres membres du Conseil d'administration qui lui consacrent de leur temps : Mme Denise Brice toujours active au service de la Société ; MM. Bernard Quesnel, Trésorier méticuleux et soucieux de la bonne santé de la Société ; José Leplat, assurant une partie du secrétariat ainsi que les contacts avec les carriers ; Christian Loones, Bibliothécaire travaillant en étroite relation avec la bibliothèque-recherche de l'UFR des Sciences de la Terre et avec la bibliothèque centrale de l'Université Lille 1 ; Jean-Pierre De Baere qui a accepté la redoutable tâche de prendre la relève du poste de Directeur de la Publication qui a été assuré pendant tant et tant d'années par Mme Paule Corsin ; Philippe Recourt qui assure la composition de chaque tome des *Annales* ; et tous les autres membres du CA sans oublier ceux de nos membres qui nous aident dans les activités de tous les jours.

### **Etre informé et devenir membre**

Pour être informé, obtenir le programme des activités et devenir membre, il suffit soit d'envoyer votre adresse par courrier postal à : Société Géologique du Nord, Université Lille 1 – Sciences et Technologies, Sciences de la Terre-SN5, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex ; soit de transmettre votre adresse courriel au président en exercice : [alain.blieck@univ-lille1.fr](mailto:alain.blieck@univ-lille1.fr) ; soit de consulter le site Web de la SGN [attention : nouvelle adresse URL] : <http://geosystemes.univ-lille1.fr/sgn.php>. Les tarifs de cotisation et abonnement figurent en page II de couverture. Pour devenir membre, veuillez remplir et signer le bulletin d'adhésion ci-dessous et le transmettre tel qu'indiqué ci-dessous.

### **BULLETIN D'INSCRIPTION À LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD (SGN)**

Nom et prénom :

Adresse postale :

Adresse courriel :

Téléphone :

---

#### **Charte SGN : devenir membre de la Société géologique du Nord implique :**

de s'acquitter en début d'année civile de la cotisation (et abonnement souhaité), de participer aux activités au mieux des possibilités, de promouvoir la Société (par exemple en ralliant de nouveaux membres), de refuser le mercantilisme (commerce, vente d'objets géologiques récoltés, à la place d'échanges).

Je soussigné(e) suis en pleine connaissance des points de la charte et les accepte

Date et signature:



## LES ACTINOMYCETALES DE L'AMBRE SPARNACIEN DES CORBIÈRES (AUDE, FRANCE) : TAPHONOMIE ET DIVERSITÉ.

### *The Actinomycetales of the Sparnacian amber from Corbières (Aude, France): taphonomy and diversity*

par Gérard BRETON (\*)

**Résumé.** — Les sédiments sparnaciens de Douzens (Aude, France) ont livré de nombreux fragments d'ambre. L'examen au microscope optique de cet ambre a révélé la présence d'actinomycètes nombreux et variés. Deux genres nouveaux, *Thermomonosporopsis* et *Thermomonosporites* et huit espèces nouvelles, *Thermomonosporopsis waggoneri*, *T. tenuis*, *Thermomonospora corbarica*, *Thermomonosporites arcuatus*, *Nocardia? cousini*, *N.? crispa*, *Actinoplanes? girardi*, et *Streptomyces vizcainoi* sont décrits sur la base de caractères morphologiques, de la préservation de structures reproductrices (spores, sporanges, rameaux sporifères), de la dualité éventuelle des mycéliums et de structures de multiplication (fragmentation du mycélium). À côté du piégeage dans la résine, un processus taphonomique original est décrit : au moins une espèce a été capable de coloniser la surface de la résine et de croître dans cette résine.

**Abstract.** — *The Sparnacian sediments of Douzens (Aude district, France) yielded many fragments of amber. The investigation under a light microscope of this amber showed numerous and diverse actinomycetes. Two new genera, Thermomonosporopsis and Thermomonosporites and eight new species, Thermomonosporopsis waggoneri, T. tenuis, Thermomonospora corbarica, Thermomonosporites arcuatus, Nocardia? cousini, N.? crispa, Actinoplanes? girardi, and Streptomyces vizcainoi are described herein on the basis of morphological characters, of the preservation of reproductive structures (spores, sporangia, sporophores), of an eventual duality of the mycelium, and of structures of multiplication (mycelium fragmentation). Besides the trapping within the resin, an original taphonomical process is described: at least one species was able to colonize the surface of the resin, and grow into the resin.*

**Mots clés :** Ambre, Actinomycètes, Taxon nouveau, Taphonomie, Eocène, France.

**Key words :** Amber, Actinomycetes, New taxon, Taphonomy, Eocene, France.

### I. — INTRODUCTION ET HISTORIQUE

Les ambres sont des résines fossiles issues de Gymnospermes ou d'Angiospermes. Ils ont, depuis longtemps, attiré l'attention des paléontologues pour la qualité et l'excellence de la conservation des organismes animaux ou végétaux qui y avaient été enrobés. Ces organismes sont majoritairement continentaux, donc moins bien représentés dans le reste du registre fossile que les organismes aquatiques, principalement marins. Parmi eux, les arthropodes terrestres sont les plus fréquents, les plus recherchés et les plus étudiés. L'attention des paléontologues s'est donc davantage portée sur la macrofaune, et en particulier sur les insectes (voir par exemple Poinar, 1994) que sur les microfossiles. Pourtant, l'existence de microfossiles est connue depuis longtemps, par exemple des grains de pollen (Goepfert, 1883, cité par Dejax *et al.*, 2001), des filaments mycéliens et des spores (Goepfert & Berendt, 1845) ou encore de bactéries (Galippe, 1920 ;

Blunck, 1929). Ce n'est que récemment que l'excellence de la préservation des micro-organismes a conduit à des études descriptives, analytiques avec les travaux de Waggoner (par exemple Waggoner, 1993, 1994a, b, 1996 ; Waggoner & Poinar, 1992 ; Poinar *et al.*, 1993), de Kohring (1995), de Breton (Breton *et al.*, 1999 ; Breton & Tostain, 2005 ; Breton, 2007), de Schmidt (Schmidt *et al.*, 2004 ; Schmidt & Schäfer, 2005 ; Schmidt *et al.*, 2006), de Girard (Girard, 2009, Girard *et al.*, 2008a,b, 2009a, 2009b). Des développements récents ont porté sur les aspects techniques (De Franceschi *et al.*, 2000, Dejax *et al.*, 2001, Ascaso *et al.*, 2003) et sur la contamination possible de l'ambre par des organismes récents (Saint-Martin *et al.*, 2006 ; Girard *et al.*, 2007, Girard *et al.*, 2009b). Enfin, des interrogations portaient sur les durées pendant lesquelles les micro-organismes – bactéries principalement – peuvent rester vivantes (Sneath, 1962 ; Kennedy *et al.*, 1994). Cano & Borucki (1995), appliquant les techniques bactériologiques à l'étude des bactéries de l'ambre de la République Dominicaine (25 – 45 millions d'années),

(\*) 6 rue des Réservoirs, F 76600 Le Havre ; gerardbreton@free.fr ; et chercheur libre rattaché au laboratoire Géosciences de l'Université de Rennes I. F-35042 Rennes cedex

obtiennent la « reviviscence » et la culture d'une bactérie fossile proche de l'actuel *Bacillus sphaericus*. Ce résultat est immédiatement contesté (Priest, 1995 ; Beckenbach, 1995). Depuis, d'autres travaux ont évoqué cette possibilité de reviviscence et de culture de bactéries fossiles de l'ambre : *Staphylococcus succinus* Lambert *et al.*, 1998, isolé de l'ambre de la République Dominicaine (Lambert *et al.*, 1998) ; un assemblage « paléomicrobiologique » isolé de l'ambre crétacé (120 millions d'années) d'Israël (Greenblatt *et al.*, 1999), parmi lesquelles une espèce moderne – *Micrococcus luteus* – est identifiée (Greenblatt *et al.*, 1999). Enfin, une société commerciale, Ambergene®, est créée pour exploiter les utilisations possibles des bactéries fossiles de l'ambre. En 1999, sa banque de données comportait plus de 1600 isolats provenant d'ambres variés (Greenblatt *et al.*, 1999). Néanmoins, la possibilité qu'un acide nucléique intact soit isolé d'un fossile au-delà de quelques centaines de milliers d'années, *a fortiori* qu'un micro-organisme reste vivant au-delà de ce délai est très généralement contestée.

Au début du 20<sup>e</sup> siècle, les actinomycètes étaient considérés comme un groupe intermédiaire entre les champignons (filamenteux, avec développement d'un mycélium) et les bactéries dont ils avaient la taille et les spores. Leur nom – actinomycètes – rappelle cette proximité supposée avec les champignons. Waksman (1950, p. 46) les considère comme un groupe distinct et des champignons et des bactéries. Dès les années 60, avec les progrès de la microscopie électronique, on reconnaît leur nature bactérienne : ce sont d'authentiques procaryotes. On les trouve dans tous les milieux marins, dulcicoles, terrestres ; ils sont particulièrement abondants dans les sols et les composts et certains habitent des milieux extrêmes, étant par exemple thermophiles ou hyperthermophiles. Beaucoup sont pathogènes pour l'homme, les animaux ou les plantes. Parmi les métabolites produits par les actinomycètes, on recense de nombreux antibiotiques, parmi lesquels la streptomycine qui permit de grandes avancées dans la lutte contre la tuberculose dès les années 40. Des fossiles à morphologie d'actinomycètes ont rarement été signalés : calcaires jurassiques d'Ecosse (Ellis, 1915), fougères carbonifères (Smoot & Taylor, 1983), sédiments précambriens [liste dans Knoll, 1977 ; voir aussi les « possible actinomycetes from 1.9 billion-year Gunflint chert, Ontario » *Eoastrion bifurcatum* Barghoorn et *E. simplex* Barghoorn, d'après Barghoorn & Tyler (1965) cités par Tappan (1980 : fig. 1.13, p. 35)]. Comme le souligne Waggoner (1993), aucun de ces micro-organismes ne peut être attribué à une famille, faute de spores ou de sporanges. C'est effectivement Waggoner (1993) qui décrit le premier actinomycète fossile certain, conservé dans un ambre éocène de l'état de Washington, U.S.A., et il le classe dans la famille des Streptomycetaceae. Waggoner (1994b) décrit encore deux genres fossiles d'actinomycètes dans un ambre du Crétacé supérieur du Mississippi (U.S.A.). Dans l'ambre éocène des Corbières (France), Breton *et al.* (1999) découvrent des « myceloid bacteria » que Breton (2007) attribue à des actinomycètes. Ce sont ces actinomycètes qui sont décrits ci-dessous.

## II. — CONTEXTE GEOLOGIQUE

L'affleurement de Douzens (Aude, France) (Fig. 1), situé sur le flanc nord de la Montagne d'Alaric, a été brièvement

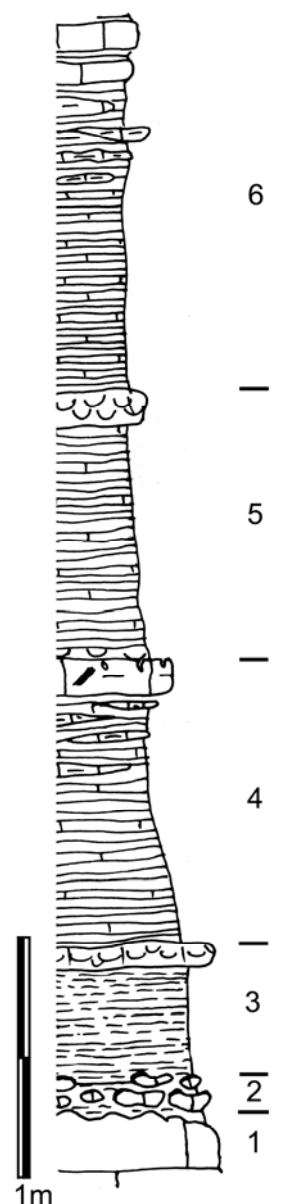


Fig. 1. — Coupe lithostratigraphique. Sparnacien de Douzens (Aude, France). 1 : calcaires lacustres massifs, surface ferruginisée. 2 : niveau à *Thalassinoides* isp. et à galets calcaires perforés. 3 : argiles grises à huîtres, coiffées par une lumachelle d'huîtres. 4 : argiles marneuses grises à Turritelles se chargeant vers le haut de lits plus calcaires. 5 : argiles grises avec pyrite altérée, coiffées par une lumachelle à huîtres avec Ampullinidae. 6 : argiles marneuses brun grisâtre se chargeant progressivement vers le haut de lits calcaires. Le trait vertical à droite de la colonne des numéros des couches indique l'extension verticale observée de l'ambre.  
Barre d'échelle : 1 m.

Fig. 1. — Lithostratigraphic section. Sparnacian of Douzens (Aude, France). 1: massive lacustrine limestone, with a ferruginous surface. 2: level with *Thalassinoides* isp. and bored limestone pebbles. 3: clay with oysters, topped by an oyster coquina. 4: grey marly clay with turritelles becoming more calcareous upwards. 5: grey clay with oxidized pyrite, topped by an oyster coquina with ampullinids. 6: brown-grey marly clay becoming progressively more calcareous upwards. The vertical line on the right of the levels numbers shows the distribution of the amber.  
Scale bar: 1 m.



décrit par Breton *et al.* (1999). Au dessus d'une barre de 8 m de calcaires lacustres massifs gris, à la surface perforée, encroûtée et irrégulièrement ferruginisée (altération de pyrite probable) [1], une série argilo-marneuse grise débute par un banc calcaire (0,10 m) avec un beau réseau de *Thalassinoides* isp. et nodules de phosphate, immédiatement surmonté par un lit contenant des galets calcaires perforés à perforations ramifiées millimétriques (*Entobia* isp. ?) [2]. Suivent :

[3] : 0,4 m d'argiles marneuses gris brunâtre à huîtres coiffé par un banc plus calcaire, sableux, de 0,05 m constitué d'une lumachelle d'huîtres ;

[4] : 1,2 m d'argiles marneuses gris brunâtre, se chargeant vers le haut de lits centimétriques plus calcaires, eux-mêmes coiffés par un niveau de calcaire marneux à huîtres et bois carbonisés de 0,15 m d'épaisseur, à surface perforée et encroûtée. Ces argiles gris brunâtre sont riches en gastropodes (déterminés par Didier Merle (MNHN, Paris) que nous remercions) : *Turritella hybrida* Deshayes et *Turritella* sp. très largement dominantes, *Batillaria praesubacuta* Doncieux et un Vetigastropoda indéterminé rares. En outre, de rares *Thericium depereti* (Doncieux) et *Potamides (Tylochilus) granosus* Doncieux sont présents mais n'ont pas été recueillis en place.

[5] : 1,1 m d'argiles marneuses grises avec pyrite altérée (limonite, gypse) coiffées par un banc plus calcaire de 0,1 m d'épaisseur constitué d'une lumachelle d'huîtres. Ce niveau [5] est riche en Ampullidae *Globularia* sp. et *Crommium* sp.

[6] : 1,6 m d'argiles marneuses brun – grisâtre se chargeant progressivement en lits calcaires vers le haut.

Les niveaux [2] à [6] sont plus ou moins lenticulaires, et peuvent se dédoubler, disparaître ou varier d'épaisseur en quelques mètres. L'ensemble est affecté d'un pendage 40°N et est daté du Sparnacien supérieur (Plaziat, 1970). La validité du Sparnacien (équivalent de la base de l'Yprésien) est certes largement mise en cause par les stratigraphes, mais il continue à être utilisé dans les Corbières, dans la mesure où cette utilisation n'entraîne aucune ambiguïté.

Des restes de Chéloniens et de Crocodiliens ont été recueillis dans le niveau [1] (D. Vizcaïno, comm. pers.). Un lavage des argiles marneuses du niveau [4] a fourni : gypse secondaire (20g/kg, cristaux isolés ou associations « en sapin » de plus de 1,5 mm) ; *Turritella hybrida* et *Turritella* sp. très abondantes, dont un spécimen avec perforations de prédateur, « *Ostrea* » *uncifera* Leymerie, rares bryozoaires, rares dactyles de crabes inidentifiables. Un lavage des argiles marneuses brun grisâtre du niveau [6], vers la cote + 3,5 m de la coupe (Fig. 1) a fourni une faune peu abondante : « *Ostrea* » *uncifera*, avec parfois surface de fixation sur un végétal cylindrique (observation déjà rapportée par Plaziat (1970) et interprétée comme indicatrice d'une mangrove) ; autres espèces d'huîtres ; *Globularia* sp. et *Crommium* sp. ; un rhyncholite de 13 mm de hauteur, probablement de Nautile ; bryozoaires, serpules et dactyles de crabes n'ont pas pu être identifiés ; un petit fragment d'ambre.

Les bois, tous conservés sous la forme de charbon de bois, sont plus abondants à la base de la série en particulier dans le niveau [2] et à la base du niveau [3] de la coupe (Fig. 1). Parmi ces bois, D. Pons (comm. pers.) a reconnu l'existence de deux espèces : un conifère *Abietina* et un Dicotylédone que l'état de conservation médiocre n'a pas permis d'identifier plus précisément.

Le caractère marin de cette série s'accroît depuis la base de la coupe, à affinités paraliques (populations abondantes et quasi-monospécifiques de Turritelles) jusqu'au sommet dont les sédiments dénotent cependant un milieu de dépôt néritique et proche de la côte.

L'ambre, de couleur rouge grenat, est présent dans la série dans les couches [3] à [6], entre les cotes + 0,15 à +3,60 m. Il est très irrégulièrement réparti, horizontalement et verticalement. De plus, les nodules sont très fragiles et toujours éclatés *in situ*. Il est donc extrêmement difficile, et risqué, d'assigner une série d'observations à un morceau originel précis et unique. Nous considérons donc « l'ambre de Douzens » comme une entité unique, en gardant toutefois à l'esprit qu'il s'agit de morceaux ayant connu éventuellement des cheminements taphonomiques distincts. Cet ambre a été secrété sur le continent proche, a été transporté ensuite jusqu'au bassin sédimentaire en milieu paralique (évoluant un peu plus tard en milieu plus franchement marin mais toujours très littoral) : nous resterons attentif à cette dualité milieu de sécrétion / milieu de dépôt sédimentaire découlant de l'histoire taphonomique en deux temps des fossiles de l'ambre de Douzens.

### III. — MATERIEL ET METHODES

#### 1) Les critères utilisés dans la systématique des Actinomycètes

Pour beaucoup de bactéries, les critères morphologiques, forme et taille des cellules, sont inopérants parce que la différenciation morphologique de ces procaryotes reste limitée. Les bactériologistes ont donc développé des méthodes d'identification fondées sur des critères biochimiques, principalement sur les métabolites utilisés ou produits par les souches de bactéries, ou la chimie de la cellule, en particulier les acides nucléiques. L'obligation, en paléomicrobiologie, de se cantonner à des critères morphologiques, en limite considérablement la portée : Waggoner (1993) précise, à propos de la systématique des bactéries fossiles : « [A] bacterial taxonomy based on morphology alone is usually tentative at best ».

Cependant, les Actinomycètes présentent une différenciation morphologique plus importante que les autres bactéries, et plusieurs étapes de leur développement ou de leur reproduction peuvent avoir un retentissement morphologique. Les principaux critères utilisés pour l'étude des Actinomycètes vivants sont les suivants.

- formation d'un mycélium, ramifié ou non, forme et diamètre des filaments, morphologie de la ramification.
- formation d'un mycélium du substrat (c'est-à-dire dans le milieu de culture), dit « végétatif », et d'un mycélium aérien (au-dessus du milieu de culture) dit « reproductif ». Différenciation morphologique entre ces deux mycéliums.
- fragmentation de l'un ou l'autre (ou des deux) mycélium, en unités de propagation, morphologie et dimensions de ces éléments.
- formations de spores, sessiles ou portées par un sporophore ; morphologie et dimensions des spores ; groupement et organisation des spores ; morphologie et dimensions des sporophores, présence de sacs spécialisés ou sporanges et endosporulation.

Cette morphologie riche, traduisant de plus des étapes du cycle biologique (fragmentation du mycélium, sporulation, dispersion des spores) constitue donc un outil puissant de systématique « Despite the many advances in the taxonomic use of cell chemistry, identification of actinomycetes is still very dependant on morphological characters » (M.P. Lechevalier *in* Holt, 1989). Cette systématique morphologique ne reflète sans doute pas l'histoire phylogénétique du groupe « Today, the actinomycetes phylogenetic relationships [...] is widely accepted; however, it is fundamentally different from the family level classification based on morphology that had been used until just twenty years ago » (Mijadoh *in* Mijadoh, 1997). La classification proposée par Holt (1989) et celle de Holt *et al.* (2000) séparent les bactéries en « groupes » informels, pratiques, largement fondés sur des caractères biochimiques. Au sein de ces groupes informels, il arrive parfois cependant qu'une famille soit nommée de manière formelle. La démarche de Mijadoh (1997) semble plus morphologique, et sa classification propose aussi des « groupes » informels à côté de familles. Stackebrandt *et al.* (1997) publient une classification phylogénétique fondée sur l'analyse des séquences des 16S rRNA/DNA, dans laquelle les taxons sont nommés formellement et hiérarchisés depuis la classe des Actinobacteria Stackebrandt, Rainey & Ward-Rainey, 1997 jusqu'au niveau générique. Malgré cette réorganisation phylogénétique au sein des actinomycètes, les critères morphologiques restent pertinents au niveau des taxons inférieurs, genres et espèces, et, de toute façon, sont les seuls utilisables en paléontologie. C'est pourquoi, bien que nous ayons cité de manière formelle les taxons des niveaux classe, ordre, famille en suivant Stackebrandt *et al.* (1997), il ne faut pas perdre de vue que nos espèces fossiles ont été classées au sein de ces taxons sur la base exclusive de critères morphologiques, seuls disponibles.

## 2) Techniques de préparation, d'observation et de mesure

Deux types de préparation ont été utilisés.

1 – Des lames minces de type pétrographique, mais non couvertes, sont examinées avec les objectifs faibles (jusqu'à x 63 à sec) en mettant sur la préparation une goutte d'huile à immersion synthétique puis en la recouvrant d'une lamelle couvre-objet. La lamelle est enlevée pour l'observation avec l'objectif x 100 à immersion.

2 – De très fines esquilles d'ambre sont montées dans du baume du Canada entre lame et lamelle. Le baume est séché au moins une semaine à 50°C mais pas cuit. Les premiers essais ont montré que la rétraction du baume au séchage entraîne une forte pression sur les esquilles les plus épaisses qui éclatent en une poussière de fragments inutilisables. C'est ainsi que quelques préparations ont été perdues (Breton *et al.*, 1999). C'est pourquoi nous montons les esquilles d'ambre entre lame et lamelle en calant latéralement la lamelle à l'aide de deux lamelles cassées : la plus grande épaisseur de milieu de montage limite les risques d'éclatement. Mais en même temps, une telle préparation, plus épaisse, empêche parfois l'examen des plans les plus profonds à l'aide des objectifs x 100 à immersion.

Les préparations sont examinées à l'aide :

- d'un Leitz Diaplan ® en fond clair,
- d'un Nacet 400 ® en fond clair, contraste interférentiel et contraste de phase ; l'un et l'autre microscope sont pourvus

d'une sortie photo. Les photos sont réalisées avec un réflectif argentique (diapositives 24 x 36) et/ou un réflectif numérique. La faible profondeur de champ, en particulier lors de l'examen à l'aide de l'objectif x 100 à immersion, permet rarement d'avoir une vue nette de l'ensemble de la structure étudiée. Plusieurs vues sont prises avec des mises au point sur différents plans. Les diapositives, numérisées, et les clichés numériques sont traités sous Photoshop ®, les plages de netteté maximum sont regroupées en une mosaïque sur un cliché unique, désigné dans les illustrations ci-dessous comme « m.a.p » (pour mosaïque de mise au point). Le logiciel Heliconfocus ®, qui rend automatiquement les mêmes services, a été utilisé pour quelques images prises avec un reflex numérique, désigné dans les illustrations ci-dessous comme « HF ». Ces techniques remplacent avantageusement les techniques de microscopie confocale auxquelles l'auteur n'a pas eu accès. Le dessin, au tube à dessiner, permettrait, alternativement, de réunir sur une illustration unique les zones de netteté maximum dans différents plans de mise au point. Cependant, le dessin est probablement perçu comme moins objectif, plus sujet à interprétation qu'une microphotographie, et donc n'a pas été utilisé ici [voir à ce sujet Martin-Gonzales *et al.* (2007), à propos des euglènes reconnues dans l'ambre cénomane d'Ecommoy (Sarthe) par Breton & Tostain (2005) : “The authors did not show any micrograph to support this identification but only a drawing of the trapped cells in amber”]. Le repérage de l'observation est donné par le numéro de la préparation, suivi des coordonnées x et y de la platine à mouvements rectangulaires du Nacet 400. Comme ces coordonnées ne sont pas universelles, et que d'autre part une viscosité résiduelle du baume du Canada autorise, même pour des préparations vieilles de quelques années, surtout si elles sont stockées verticalement, un déplacement relatif des esquilles d'ambre, un schéma de localisation sera annexé à chaque préparation comportant un type ou un figuré.

La mesure du diamètre des filaments ou des spores, réalisé à l'aide d'un micromètre intégré au Nacet 400 étalonné à l'aide d'un micromètre-objet doit être considérée comme **très approximative**, pour plusieurs raisons d'ordre optique et d'ordre taphonomique.

► Raisons optiques. À 0,3 – 0,5 µm mesurés, on est très proche du pouvoir séparateur de l'appareil et la mesure précise de l'épaisseur d'une structure ou du diamètre d'un filament serait illusoire, tout au plus peut-on espérer apprécier une fraction de la division du micromètre intégré : 1/3, 1/2 ou 2/3 d'une division seront respectivement notés comme 0,3, 0,5 et 0,7 µm, une division représentant un micromètre sous l'objectif x 100 à immersion. De plus, il nous a semblé que la mesure de la même structure donnait un résultat légèrement différent selon que l'on était en fond clair peu diaphragmé, très diaphragmé ou en contraste interférentiel, fait que le constructeur n'a pas pu nous confirmer.

► Raisons taphonomiques. L'aspect au microscope du mycélium du substrat et du mycélium aérien des actinomycètes vivants est très différent. Le premier est très noir, le second pâle. Vobis *in* Mijadoh (1997, p.181) l'explique : “The difference between the hydrophilic nature of the substrate mycelium and the hydrophobicity or the aerial mycelium is very conspicuous. This is easy to distinguish by an impression preparation on a cover slip, viewed in a dry system with a light microscope: substrate hyphae are transparent and phase-dark, aerial hyphae are refractive and

phase-bright". Nous retrouvons cette dualité chez l'une des espèces fossiles décrites ci-dessous. Elle présente en effet, presque toujours associés, un mycélium de diamètre supérieur, que nous désignons comme « mycélium robuste, filaments robustes » et un mycélium de plus faible diamètre, nommé « mycélium ténu (ou grêle), filaments ténus (ou grêles) » dans les descriptions ci-dessous. Pour des raisons précisées dans la discussion taphonomique, il est délicat de corréliser les deux types morphologiques de mycéliums de l'espèce fossile (robuste/grêle) aux types biologiques des actinomycètes cultivés (du substrat/aérien), sous réserve du paragraphe 4) ci-dessous. Il n'en reste pas moins que, comme beaucoup d'exemples de mycéliums aériens des actinomycètes actuels, les filaments robustes de notre espèce fossile sont généralement pigmentés.

Il n'est pas sûr que la même méthode de mesure (micromètre intégré) appliquée aux filaments pigmentés et aux filaments transparents, donne des résultats homogènes. De plus, peut-être à cause d'une rétraction de l'ambre lors de sa polymérisation, le moule externe d'un filament peut être agrandi par rapport au diamètre original du filament, et ceci d'une manière irrégulière. Nous avons observé ce phénomène dans des ambres cénomaniens.

Les mesures du diamètre des filaments et des spores doivent donc être considérées comme simplement indicatives.

### 3) Difficultés et pièges de l'étude des micro-organismes de l'ambre

Inclure, à tort, dans la taphocénose microbienne des supposés micro-organismes qui n'en font pas partie peut être la conséquence de deux types de « pièges » déjà soulignés (par exemple par Cloud & Morrison, 1979) à propos des plus anciennes traces de vie.

Les **pseudo-fossiles** sont souvent des micro-fractures dans la masse de l'ambre, parfois développées autour d'une inclusion, organique ou non. Elle peuvent être structurées plus ou moins concentriquement, avec sans des fractures radiales et ainsi évoquer des spores, cellules ou filaments, mimer des pseudo-organites cellulaires ou des figures de division, ou bien encore, de manière très trompeuse, ressembler à des groupes de cellules semblables aux « unidentified spore clusters » décrits par Waggoner (1994b : pl. 1, fig. 6 – 8) (Breton *et al.*, 1999). Une structure répétitive, en dents de peigne ou en marches d'escalier, est fréquente. Un autre type de pseudo-fossiles est engendré par la pénétration, dans une fissure, d'un fluide, le plus souvent gazeux, qui aboutit à une figure dendritique, fractale ou non.

Chaque inclusion individuelle a été examinée pour authentifier son caractère biologique et écarter les pseudo-fossiles :

- développement selon une surface ou développement en volume ;
- forte dispersion des tailles, s'il y a plusieurs pseudo-fossiles ou. faible dispersion des tailles compatible avec une population naturelle ;
- aspect hyalin (pas de contenu) ou présence d'un contenu (par exemple cytoplasme) distinct de l'ambre environnant.

**En cas de doute, l'observation a été écartée.**

La **contamination** par des micro-organismes récents pose problème : elle peut s'être produite sur le terrain, dans le gisement de l'ambre, ou, au laboratoire, pendant sa préparation. Toute roche est potentiellement contaminable (voir par exemple Cloud & Morrison, 1979) ; les contaminants eux-mêmes sont variés, depuis les procaryotes (Cloud & Morrison, 1979) jusqu'aux diatomées (Saint-Martin *et al.*, 2006). De nombreuses diatomées localisées dans l'épaisseur de morceaux d'ambre cénomaniens des Charentes appartiennent à des espèces actuelles, et proviennent d'une contamination récente. Les diatomées vivantes peuvent coloniser des microfissures, la population progresser vers le centre des morceaux d'ambre, et, éventuellement, les microfissures se refermer (Saint-Martin *et al.*, 2006).

Girard *et al.* (2009b) ont donc mis au point un traitement permettant de détruire la matière organique, le calcaire et la silice superficiels avant l'examen des morceaux d'ambre, ce qui permet d'éliminer les micro-organismes contaminants à squelette siliceux, calcaire ou organique, ou encore sans squelette. Ils ont également montré que la contamination, en particulier par les diatomées, est très forte si les morceaux d'ambre peuvent séjourner, même brièvement, en eau douce (carrières inondées) ou marine (affleurements littoraux), mais elle est pratiquement nulle pour les gisements de montagne. Dans cette étude de l'ambre de Douzens, dont les conditions de gisement sont bien plus proches de celles des gisements de montagne que de carrières inondées ou de bord de mer, nous n'avons pas systématiquement appliqué ce protocole de décontamination. La principale raison – triviale – est que les préparations examinées étaient faites avant que Girard *et al.* (2009b) ne découvrent l'intensité possible de cette contamination et ne mettent au point le protocole permettant de décontaminer le matériel. Les morceaux utilisés ici ont été nettoyés dans un bain détergent dans un bac à ultrasons. Une gangue marneuse adhérente a été éliminée à l'aide d'acide chlorhydrique dilué. Les morceaux, rincés à l'eau déminéralisée, ont été séchés après un bain d'éthanol. Conscient des possibilités de contamination, nous avons de plus examiné chaque microfossile isolé, vérifié qu'il se situait en profondeur dans l'ambre et non pas en surface. Nous l'avons examiné en contraste interférentiel, avec différents réglages du prisme, de telle sorte qu'une fissure, même refermée, soit détectée. Le microfossile n'est pas pris en compte s'il y a doute.

### 4) Le statut des tapis périphériques cyanobactériens et d'actinomycètes de l'ambre

La difficulté de discrimination entre un authentique microfossile et un micro-organisme contaminant récent concerne les micro-inclusions individuelles. Plusieurs ambres crétacés ou éocènes sont pourvus d'un tapis ou feutrage périphérique de micro-organismes filamenteux (Girard *et al.* 2008a) :

- Cénomaniens, Sarthe (France) : cyanobactérie gagnée *Paleocolteronema cenomanensis* Breton & Tostain, 2005 ;
- Cénomaniens, Schliersee (Allemagne) : bactérie gagnée *Leptotrichites resinatus* Schmidt & Schäfer, 2005 ;
- Albien supérieur – Cénomaniens, Charentes et Aude (France) : cyanobactérie gagnée *Paleocolteronema cenomanensis* et/ou bactérie gagnée *Leptotrichites resinatus* (Girard, 2008 ; Girard *et al.*, 2008a) ;
- Eocène, Aude et Oise : actinomycètes (ce travail).

Le statut taphonomique de tels feutrages a été brièvement discuté par Breton (2007, p. 132) qui pose la question : « Remarques sur les tapis cyanobactériens et d'actinomycètes dans l'ambre : piégeage ou colonisation ? ». Cette problématique est reprise et développée ci-dessous, dans le paragraphe « Discussion ». De la réponse à la question « piégeage ou colonisation » dépendra l'orientation de la colonie d'actinomycètes par rapport à son substratum, donc *in fine* l'appréciation de ce qui est filaments du substrat et de ce qui est filaments aériens (voir ci-dessus paragraphe 3.2). Il convient de remarquer que dans le cas de l'espèce où la différenciation entre les deux mycéliums est la plus accusée, la corrélation la plus plausible est la suivante : filaments robustes, noirs = mycélium aérien ; filaments ténus, clairs = mycélium du substrat. En effet, ce sont les filaments robustes dont la croissance est centripète qui colonisent l'ambre. L'ambre étant un milieu non aqueux, ces filaments sont plus facilement corrélés au mycélium aérien hydrophobe. Quelques autres caractères confirmeraient cette corrélation : fragmentation du mycélium plus fréquente sur le mycélium du substrat, formation de rameaux sporifères plus abondante sur le mycélium aérien (malgré l'illogisme biologique qu'il y a à élaborer des spores qui ne pourront pas être dispersées à cause de la viscosité du milieu – la résine – où elles se forment).

#### IV. — SYSTÉMATIQUE

Classe ACTINOBACTERIA Stackebrandt, Rainey & Ward-Rainey, 1997

Ordre ACTINOMYCETALES Buchanan, 1917

Famille THERMOMONOSPORACEAE Rainey, Ward-Rainey & Stackebrandt, 1997 *in* Stackebrandt *et al.*, 1997

Genre *Thermomonosporopsis* nov. gen.

**Étymologie** : Qui ressemble (suffixe d'origine grecque *-opsis*) au genre *Thermomonospora*. Substantif féminin.

Espèce-type : *Thermomonosporopsis waggeri* nov. sp.

**Diagnose** : Filaments robustes (diamètre : 0,5 – 1,2 µm) pigmentés, plusieurs fois ramifiés plus ou moins régulièrement, rameaux raides. Filaments grêles (0,5-0,8 µm) transparents, plusieurs fois ramifiés plus ou moins régulièrement, ramifications souvent dichotomes à 60°, rameaux raides. Rameaux fertiles sur les deux mycéliums, portés par un pédoncule ramifié ou non. Rameaux sporifères crépus, ramifiés, organisés en une touffe terminale compacte sphérique, hémisphérique ou en forme de parapluie ou encore en manchon cylindrique qui entoure l'apex de l'axe. Spores rondes, claires, mesurant 0,3 à 0,5 µm de diamètre. Fragmentation du mycélium robuste rare, en bâtonnets plus ou moins longs. Fragmentation du mycélium grêle fréquente en bâtonnets ou en cocci. Endosporulation peu fréquente, affectant principalement les filaments grêles.

**Différenciation des genres morphologiquement voisins** : le tableau I donne les principaux caractères morphologiques permettant de distinguer *Thermomonosporopsis* nov. gen. de quatre genres possédant des spores

isolées : *Thermomonospora*, *Thermomonosporites* n. gen., *Saccharomonospora* et *Thermoactinomyces*. On retiendra en particulier la compacité des grappes de spores formant une unité sphérique, en parapluie ou en manchon, qui n'est jamais réalisée à ce point dans les espèces des genres *Thermomonospora*, *Saccharomonospora* et *Thermoactinomyces*, dont certaines possèdent des grappes de spores, toujours plus petites et moins compactes.

*Thermomonosporopsis waggeri* nov. sp.

2007 Actinomycètes – Breton : p. 130, fig. 3, 4, 12  
Figures 2 – 13

**Étymologie** : L'espèce est dédiée à Benjamin M. Waggoner, dont les travaux sur la micropaléontologie de l'ambre font autorité, et pour son engagement contre les obscurantismes niant l'évolution.

**Type** : Préparation T 124, 532 x 188, figurée par Breton (2007, Fig. 3,4) et ce travail, Fig. 2, 4, 5.

**Origine géographique et stratigraphique du type** : Flanc nord de la montagne d'Alaric, commune de Douzens, Aude, France. Ambre déposé dans des sédiments littoraux sparnaciens.

**Autre matériel** : Sparnacien de Douzens, Aude, France : préparations B 10 ; T 04, 07, 08, 13, 31, 43, 48, 52, 54 (Fig. 10, 12), 58, 62, 68, 71, 73, 78, 94 (Fig. 7), 112, 115, 123, 130, 142 (Fig. 6), 143, 145 (Fig. 13), 161, 174, 175, 176, 177, 182 (Fig. 8, 9, 11) ; 250405-7-1, 250405-7-2. Sparnacien du Quesnoy, Oise, France : préparations Q 01.01, Q 03.

**Diagnose et description** : Mycélium robuste (diamètre des filaments : 0,6 – 1 – 1,2 µm) formant un tapis de 10 à 15 µm d'épaisseur. Filaments robustes pigmentés, foncés, plusieurs fois ramifiés plus ou moins régulièrement. Rameaux robustes raides. L'apex des filaments robustes peut être légèrement élargi en massue. Mycélium grêle (diamètre des filaments : 0,3 – 0,5 – 0,8 µm) formant un tapis continu de 10 à 20 µm d'épaisseur. Filaments grêles très transparents, plusieurs fois ramifiés plus ou moins régulièrement, ramifications à 60 – 90°, souvent dichotomes à 60°. Rameaux raides. Mycéliums robuste et raide presque toujours associés en périphérie du morceau d'ambre, très généralement avec les rameaux robustes vers le centre du morceau d'ambre (disposition centripète) et les rameaux grêles vers le sédiment entourant l'ambre. Rameaux fertiles sur les deux mycéliums, plus fréquents sur les rameaux robustes. Rameaux fertiles du mycélium robuste portés par un pédoncule ramifié ou non de 0,5 à 1,2 µm de diamètre pour la hampe, parfois localement dilatée, et d'une hauteur totale de 15 à 25 µm (Fig. 3). Les rameaux sporifères (diamètre des filaments 0,1 à 0,3 µm), incolores, crépus, ramifiés, s'organisent en une touffe terminale compacte, sphérique, hémisphérique ou en forme de parapluie de 3 à 15 µm de diamètre ; les spores sont terminales. Rameaux fertiles du mycélium grêle portés par un pédoncule de 6 à 10 µm de hauteur. Rameaux sporifères (diamètre 0,1 – 0,2 µm) flexueux, ramifiés dichotomiquement et organisés en une touffe terminale sphérique de 3 à 11 µm de diamètre (rarement 15 µm) ; les spores sont terminales. Spores rondes, claires, mesurant 0,3 à 0,5 µm de diamètre. Leur diamètre est supérieur à celui (≤ 0,3 µm) du rameau qui la porte. Fragmentation du mycélium robuste peu fréquent, en bâtonnets plus ou moins longs, parfois flexueux. Fragmentation du mycélium grêle fréquente, en petits éléments allongés, parfois ramifiés (Fig. 10) ou en cocci de 0,5 µm de diamètre. Endosporulation observée sur certains rameaux grêles, rarement sur les rameaux robustes (Fig. 11), endospores rondes, mesurant 0,3 à 0,5 µm de diamètre (rameaux grêles). L'endosporulation affecte un rameau dressé terminal ou bien une portion intermédiaire, avant la dernière ramification.

**Description complémentaire** : L'épaisseur totale du tapis de *Thermomonosporopsis waggeri* nov. sp. à la périphérie des morceaux d'ambre est assez constante, inférieure ou égale à 35 µm (Fig. 4, 5). Sa mesure nécessite des observations selon une incidence exactement perpendiculaire, ce qui est rarement le cas compte tenu des techniques de préparation. Vus en plan, ces actinomycètes

Famille ►	Thermomonosporaceae			Pseudonocardiaceae	?
Genres ► Caractères ▼	<i>Thermomonosporopsis</i> n. gen.	<i>Thermomonospora</i>	<i>Thermomonosporites</i> n. gen	<i>Saccharomonospora</i>	<i>Thermoactinomyces</i>
Spores isolées	+	+	+	+	+
Mycélium du substrat et mycélium aérien	+	+	?	+	+
Différenciation du diamètre des filaments du substrat / aériens	+ (1)	–	?	–	–
Pigmentation des filaments aériens (robustes)	+ ou –	+ ou – fréquemment	+	+ ou –	– (2)
Filaments cloisonnés	–	–	–	–	+
Axe ou mycélium disparaissant à maturité	–	–	+	–	+ ou –
Fragmentation du thalle	+	– (2)	–	+ ou – (3)	–
Sporophores ramifiés	+	+ ou –	+	–	+ ou –
Spores groupées en grappes	+	+ ou – (4)	+	–	+ (2 espèces)
Grappes compactes, sphériques ou en parapluie, spores nombreuses	+	–	–	–	–
Spores formées sur filaments aériens et filaments du substrat	+	+	?	–	+
Pédoncule ou axe de diamètre supérieur à celui des sporophores	+	–	+	–	–
Endosporulation	+ (5)	–	–	–	+
Thermophilie	–	+ (6)	–	+ ou –	+ (6)

Tabl. I. — Différenciation des genres morphologiquement voisins :

+ = oui – = non

(1) filaments grêles / robustes (2) sauf chez une espèce (3) le plus souvent non

(4) *T. fusca* McCarthy & Cross, 1984 a des grappes de spores denses

(5) voir les remarques dans la description de l'espèce. Semble affecter plus fréquemment les filaments grêles

(6) une espèce mésophile

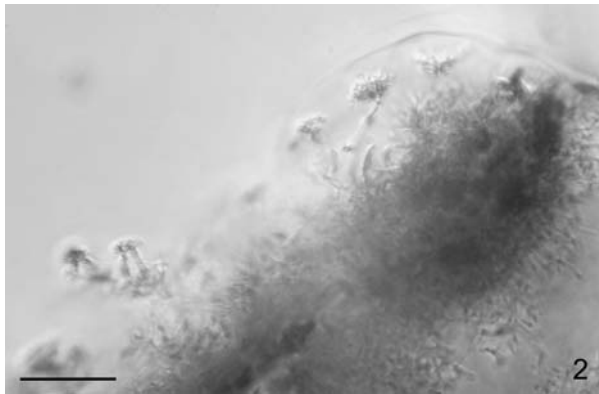


Fig. 2. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Holotype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 124 ; 532 x 188. Contraste interférentiel. Barre d'échelle : 20 µm.

Fig. 2. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Holotype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 124 ; 532 x 188. Differential interference contrast illumination. Scale bar: 20 µm.

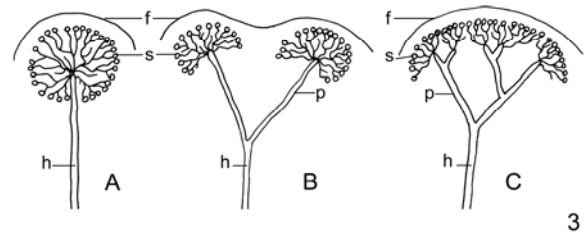


Fig. 3. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). Morphology of the spore-bearing ramifications. A: spherical. B, C: umbrella-shaped. A, B: simple. C: compound. Schematic. h: shaft. p: peduncle. s: spores. f: cupule-shaped fissures topping the spore-bearing ramifications.

Fig. 3. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). Morphology of the spore-bearing ramifications. A: spherical. B, C: umbrella-shaped. A, B: simple. C: compound. Schematic. h: shaft. p: peduncle. s: spores. f: cupule-shaped fissures topping the spore-bearing ramifications.

forment des touffes, elles-mêmes groupées en massifs. De légères ondulations de la surface de base font que l'on peut avoir, en vue en plan, pour une même mise au point, des massifs de mycéliums grêles alternant avec des massifs de mycéliums robustes. D'une manière générale, il est difficile d'avoir les deux mycéliums sur le même cliché (Fig. 7, 8, 9). Les rameaux fertiles sont organisés en boules ou en « parapluies » compacts à l'extrémité d'une hampe ramifiée ou

non. Un examen à grandissement insuffisant, inférieur à x 100 à l'immersion, pourrait conduire à la conclusion erronée de l'existence de sporanges, connus dans d'autres genres d'actinomycètes. Cette interprétation pourrait se trouver renforcée par l'existence quasi-constante de pseudo-fossiles sous la forme de micro-fractures en cupules qui « coiffent » les rameaux sporifères en boule ou en parapluie, à petite distance (Fig. 2, 13) ou bien au contact de ces

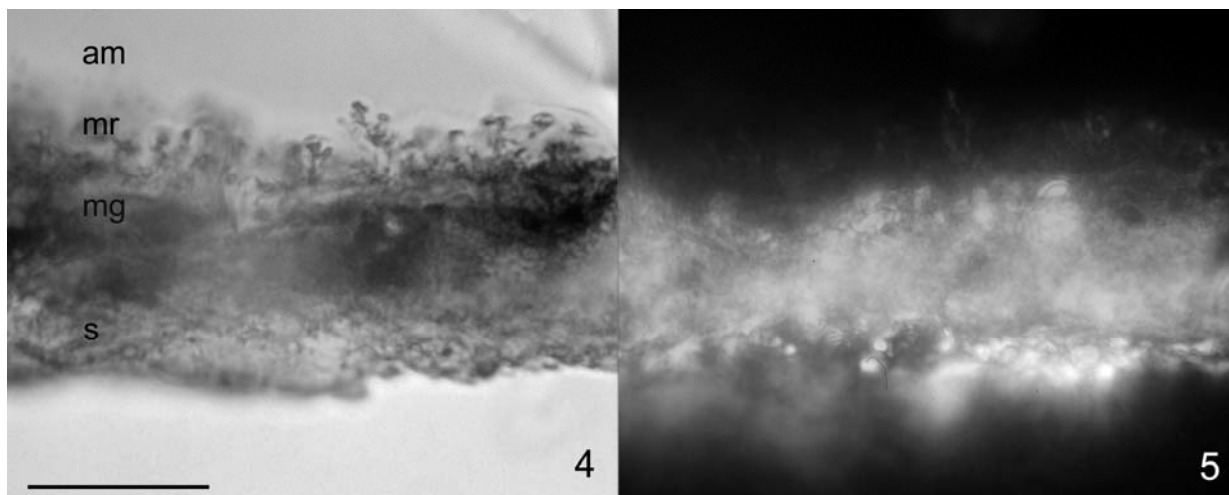


Fig. 4, 5. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Holotype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 124 ; 532 x 188. Coupe transversale, légèrement oblique, du tapis d'Actinomycètes avec la couche minérale matérialisant la périphérie du morceau d'ambre. Am : ambre clair ; mr : tapis d'Actinomycètes, mycélium robuste avec rameaux sporifères ; mg : niveau du mycélium grêle ; s : sédiment. Faible grandissement, figure 4, à gauche : fond clair ; figure 5, à droite : entre nicols croisés. Barre d'échelle : 50µm.

Fig. 4, 5. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Holotype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 124; 532 x 188. Transversal section of the actinomycete felting with the peripheral mineral layer of the amber piece. Am: transparent amber; mr: actinomycete felting, robust mycelium with spore-bearing ramifications; mg: level of the spindly mycelium; s: sediment. Low magnification; figure 4 (left): bright field; figure 5 (right) crossed polarized light. Scale bar: 50 µm.

Fig. 6. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 142 ; 523 x 222. Rameaux robustes et rameau sporifère. Contraste interférentiel. M.a.p. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 6. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 142; 523 x 222. Robust mycelium and spore-bearing ramification. Differential interference contrast illumination. M.a.p. Scale bar: 10µm.

Fig. 7. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 94 ; 461 x 174. Rameaux robustes (pigmentés) et grêles. Noter les extrémités des rameaux robustes en massue (flèche). Contraste interférentiel, frange noire. HF. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 7. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 94; 461 x 174. Robust (pigmented) and spindly mycelia. The arrow shows the club-shaped tips of the robust ramifications. Differential interference contrast illumination, black fringe. HF. Scale bar: 10 µm.

Fig. 8, 9. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 182 ; 484 x 176. Rameaux robustes et grêles. Figures 8 et 9 : même plage photographiée avec une mise au point différente, 8, plans profonds à gauche, 9 plans moins profonds à droite. Noter la fragmentation du mycélium grêle en cocci (flèche noire, plans profonds). Contraste interférentiel, frange noire. Barre d'échelle : 20 µm.

Fig. 8, 9. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 182; 484 x 176. Robust and spindly mycelia. 8 and 9: same field, with a different focus; 8: deeper focus than 9. Fragmentation in cocci of the spindly mycelium (black arrow). Differential interference contrast illumination, black fringe. Scale bar: 20 µm.

Fig. 10. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 54 ; 498 x 184. Fragmentation du mycélium en éléments ramifiés (flèche). Contraste interférentiel, frange noire. M.a.p. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 10. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 54; 498 x 184. Fragmentation of the mycelium into ramified elements. Differential interference contrast illumination, black fringe. M.a.p. Scale bar: 10 µm.

Fig. 11. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 182 ; 486 x 179. Endosporulation d'un mycélium robuste (flèche) et libération des spores. Contraste interférentiel, frange noire. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 11. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 182; 486 x 179. Endosporulation of a robust mycelium (arrow) and release of spores. Differential interference contrast illumination, black fringe. Scale bar: 10 µm.

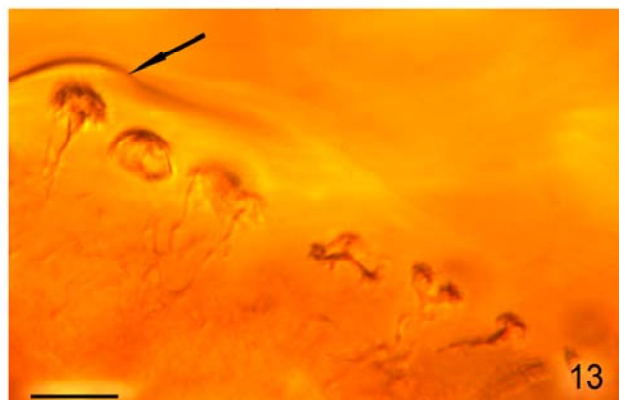
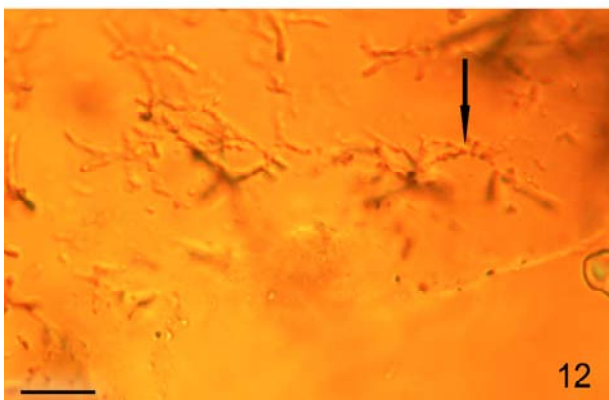
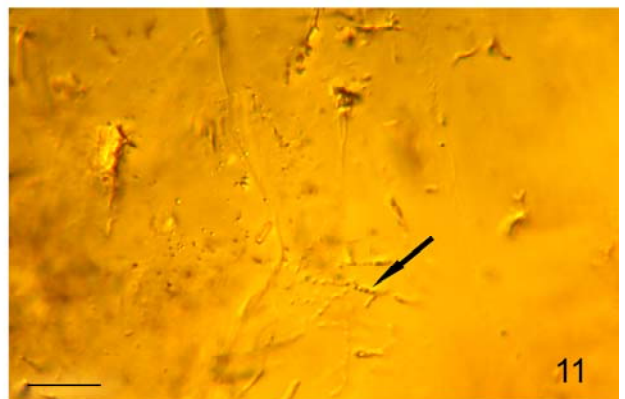
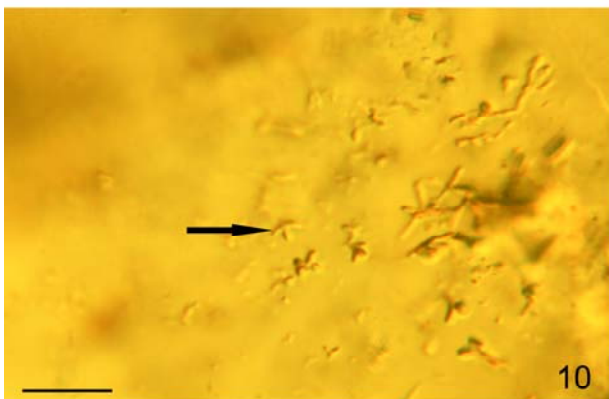
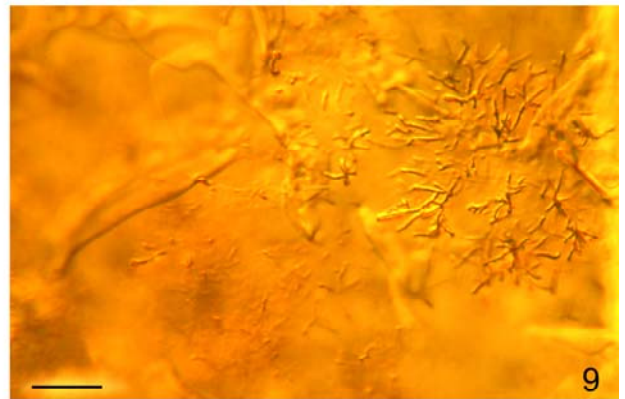
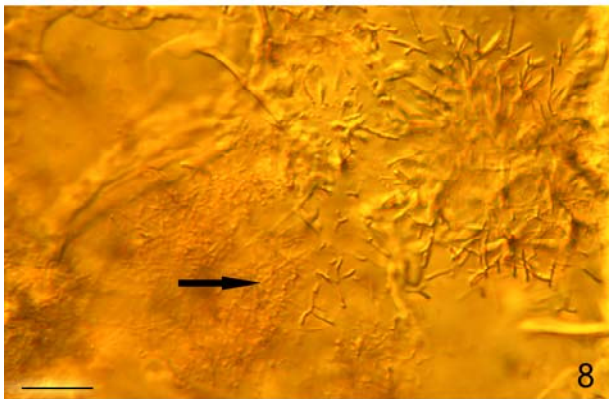
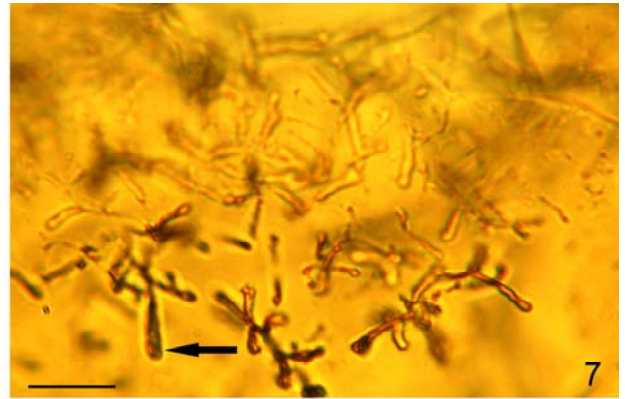
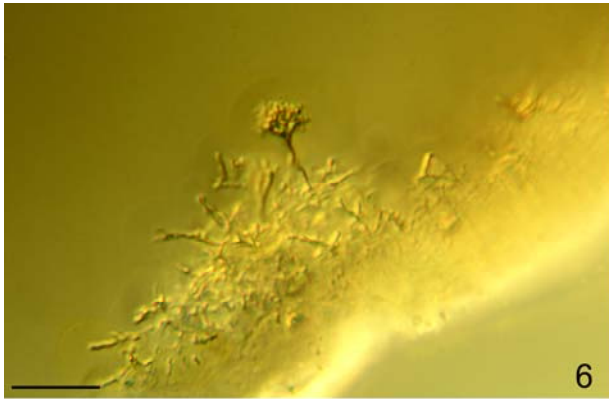
Fig. 12. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 54 ; 498 x 169. Endosporulation d'un mycélium grêle ou bien fragmentation du thalle en cocci ? (flèche). Contraste interférentiel. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 12. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 54; 498 x 169. Endosporulation of a spindly mycelium or fragmentation of the mycelium in cocci? (arrow). Differential interference contrast illumination. Scale bar: 10 µm.

Fig. 13. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 145 ; 400 x 189. Décollements en cupules au-dessus des rameaux fertiles (flèche). Contraste interférentiel. M.a.p. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 13. — *Thermomonosporopsis waggoneri* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 145; 400 x 189. Cupule-shaped fissures topping the fertile ramifications. Differential interference contrast illumination. M.a.p. Scale bar: 10 µm.





rameaux. L'endosporulation, qui conduit à des spores rondes, a été observée sur des rameaux dressés, et elle affecte quelques rameaux, ce qui permet de la distinguer d'une fragmentation du thalle en cocci qui affecte de plus grandes portions du mycélium. La distinction est parfois impossible (Fig. 12). La présence, en mélange, d'un *Streptomyces* sp. avec la sporulation caractéristique de ce genre affectant la partie distale de rameaux rectilignes serait indiscernable, dans nos conditions d'observation, de ce qui est interprété ici comme une endosporulation.

**Rapports et différences :** Différences avec *T. tenuis* nov. sp. : voir cette espèce.

**Répartition stratigraphique et distribution géographique :** Ces données sont pour l'instant limitées au matériel décrit ici : Eocène (Sparnacien), Bassin de Paris (Le Quesnoy, Oise : voir Nel *et al.*, 1999) et Corbières (Douzens, Aude), France.

*Thermomonosporopsis tenuis* nov. sp.

Figures 14, 15, 32 B

**Étymologie :** *Tenuis* (latin) : grêle.

**Type :** Préparation T 49, 504 x 202, figuré Fig. 14, 15, 32 B.

**Origine géographique et stratigraphique du type :** Flanc nord de la montagne d'Alaric, commune de Douzens, Aude, France. Ambre déposé dans des sédiments littoraux sparnaciens.

**Autre matériel :** Même origine, préparations T 49, 67, 145.

**Diagnose et description.** On insistera sur les différences avec l'espèce-type du genre *T. waggoneri* nov. sp. La différence entre les rameaux robustes (0,5 – 0,7 µm) et grêles (0,4 – 0,5 µm) est peu accentuée, d'autant plus que les rameaux sont peu colorés. Les ramifications ont la même apparence générale que chez *T. waggoneri* mais semblent très « raides ». Les rameaux fertiles varient d'une forme sphérique à celle d'un manchon cylindrique qui entoure l'axe, parfois incomplètement. Les dimensions de ces rameaux fertiles varient de 4 x 4 µm (sphériques) à 4 x 15 µm (en manchon). Le pédoncule se poursuit dans l'axe du manchon, sur toute sa longueur. Les spores, uniques et terminales, rondes, mesurent 0,4 – 0,5 µm de diamètre. Le diamètre des rameaux sporifères peu ramifiés, très inférieur à celui des spores, a été évalué à 0,1 µm. Une seule observation a montré une fragmentation du mycélium en bâtonnets. Une endosporulation a été observée une fois. La distinction entre des rameaux de *Thermomonosporopsis tenuis* et des rameaux grêles de *T. waggoneri* peut s'avérer impossible en l'absence de rameaux robustes colorés qui dénoteront *T. waggoneri*, ou de rameaux fertiles en manchon qui permettront d'identifier *T. tenuis*.

**Répartition stratigraphique et distribution géographique :** Ces données sont pour l'instant limitées au matériel - type: Eocène (Sparnacien), Corbières (Douzens, Aude, France).

Fig. 14. — *Thermomonosporopsis tenuis* nov. gen., nov. sp. Holotype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 49 ; 504 x 202. Contraste interférentiel, frange noire. HF. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 14. — *Thermomonosporopsis tenuis* nov. gen., nov. sp. Holotype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 49; 504 x 202. Differential interference contrast illumination, black fringe. HF. Scale bar: 10 µm.

Fig. 15. — *Thermomonosporopsis tenuis* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 67 ; 496 x 222. Vue apicale d'un rameau sporifère. Contraste interférentiel, frange noire. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 15. — *Thermomonosporopsis tenuis* nov. gen., nov. sp. Holotype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 67; 496 x 222. Apical view of a fertile ramification. Differential interference contrast illumination, black fringe. Scale bar: 10 µm.

Fig. 16. — *Thermomonospora corbarica* nov. sp. Holotype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 11 ; 508 x 200. Axe, sporophores et spores. Contraste interférentiel, frange noire. M.a.p. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 16. — *Thermomonospora corbarica* nov. sp. Holotype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 11; 508 x 200. Axis, sporophore and spores. Differential interference contrast illumination, black fringe. M.a.p. Scale bar: 10 µm.

Fig. 17. — *Thermomonospororites arcuatus* nov. gen., nov. sp. Holotype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 109 ; 439 x 200. Axes arqués, sporophores et spores terminales. Contraste interférentiel. M.a.p. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 17. — *Thermomonospororites arcuatus* nov. gen., nov. sp. Holotype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 109; 439 x 200. Arched axis, sporophores and terminal spores. Differential interference contrast illumination. M.a.p. Scale bar: 10 µm.

Fig. 18. — *Thermomonospororites arcuatus* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 51 ; 494 x 155. Axes ramifiés, sporophores courts et spores terminales. Contraste interférentiel, frange noire. M.a.p. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 18. — *Thermomonospororites arcuatus* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 51; 494 x 155. Ramified axis, short sporophores and terminal spores. Differential interference contrast illumination, black fringe. M.a.p. Scale bar: 10 µm.

Fig. 19. — *Thermomonospororites arcuatus* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 51 ; 494 x 155. Disparition de l'axe (flèche) dans la partie distale du rameau, alors qu'il est encore présent dans la partie proximale et dans les autres rameaux. Contraste interférentiel, frange noire. M.a.p. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 19. — *Thermomonospororites arcuatus* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 51; 494 x 155. Disappearance of the axis (arrow) in the distal part of the ramification, whereas the axis is still present in the proximal part and in the other ramifications. Differential interference contrast illumination, black fringe. M.a.p. Scale bar: 10 µm.

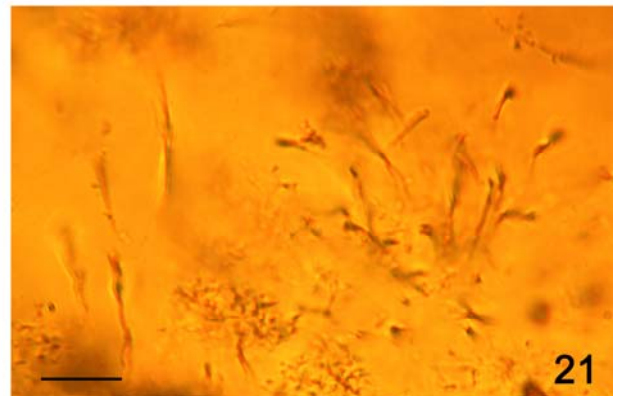
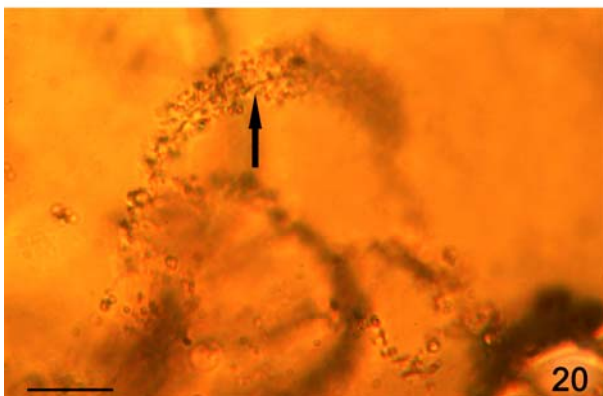
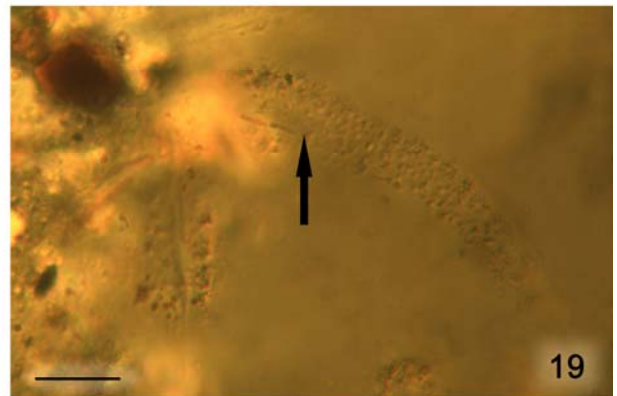
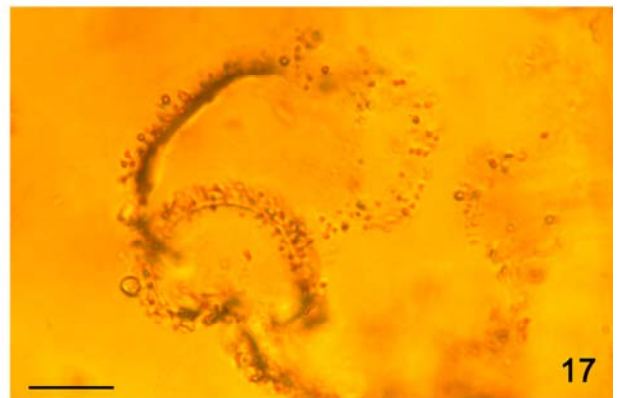
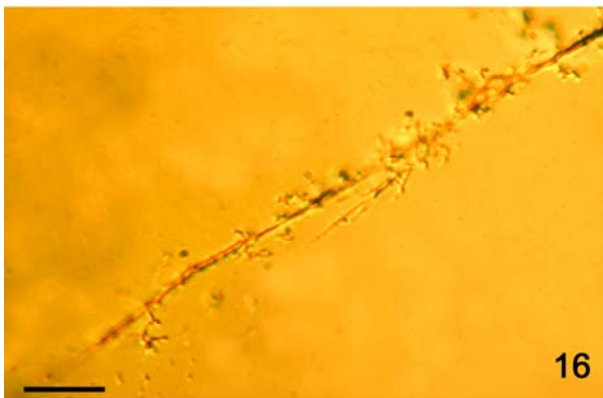
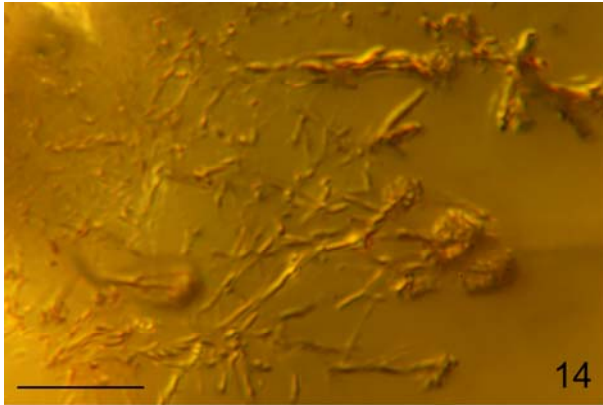
Fig. 20. — *Thermomonospororites arcuatus* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 45 ; 461 x 210. Sporophores ramifiés (flèche), spores ovales, terminales. Contraste interférentiel, frange noire. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 20. — *Thermomonospororites arcuatus* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 45; 461 x 210. Ramified sporophores (arrow), ovate terminal spores. Differential interference contrast illumination, black fringe. Scale bar: 10 µm.

Fig. 21. — *Nocardia ? cousini* nov. sp. Holotype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 109 ; 437 x 202. Hyphes aériens. Contraste interférentiel. M.a.p. Barre d'échelle : 5 µm.

Fig. 21. — *Nocardia ? cousini* nov. sp. Holotype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 109; 437 x 202. Aerial hyphae. Differential interference contrast illumination. M.a.p. Scale bar: 5 µm.





Genre *Thermomonospora* Henssen, 1957

Espèce-type : *Thermomonospora curvata* Henssen, 1957.

**Diagnose** : [excepté les caractères biochimiques] Mycélium végétatif ramifié, ne se fragmentant pas. Spores uniques, sur le mycélium aérien. Les spores, ovales ou sphériques, sont sessiles ou, plus souvent, portées à l'extrémité d'un sporophore ramifié ou non. Possibilité de grappes de spores par répétition de la ramification du sporophore. Les spores peuvent être formées aussi sur le mycélium du substrat. Les espèces du genre peuvent être thermophiles ou mésophiles.

*Thermomonospora corbarica* nov. sp.  
Figures 16, 32C

**Etymologie** : *corbaricus*, *a*, *um* (adjectif latin) : des Corbières, région géographique d'origine du type.

**Type** : Préparation T 11, 508 x 200, figuré Fig. 16, 32C

**Origine géographique et stratigraphique du type** : Flanc nord de la montagne d'Alaric, commune de Douzens, Aude, France. Ambre déposé dans des sédiments littoraux sparnaciens.

**Diagnose et description** : Autour d'un axe de 0,6 à 1,0 µm de diamètre, très peu ramifié (une seule ramification observée) se répartissent de manière espacée des sporophores ramifiés, tortueux :  
- diamètre des rameaux de certains sporophores inférieur à 0,3 µm, longueur 2 à 3 µm, spores terminales mesurant 1 µm ;  
- diamètre des rameaux des autres sporophores mesurant 0,3 à 0,4 µm, longueur jusqu'à 6 µm, spores terminales mesurant 0,5 µm.

**Remarque** : L'axe principal est remarquablement rectiligne. On pourrait invoquer un étirement dans le flux de la résine, mais la disposition des sporophores ne plaide pas en faveur de cette hypothèse. Par prudence, ce caractère très rectiligne de l'axe, inhabituel, n'est pas considéré ici comme un caractère du taxon, et n'est donc pas mentionné dans la diagnose.

**Rapports et différences** : Au sein du genre *Thermomonospora*, l'axe peu ou pas ramifié, les sporophores ramifiés, courts, espacés sur l'axe caractérisent l'espèce *T. corbarica*. Elle se distingue des espèces des genres actuels morphologiquement voisins et à spores uniques *Saccharomonospora*, *Thermoactinomyces* et *Micromonospora* par ses sporophores ramifiés. Il en va de même pour le *Paleomonospora tishomingoensis* Waggoner, 1994 du Turonien du Mississippi (USA) dont les sporophores, non ramifiés, sont très courts ou absents (Waggoner, 1994b : pl. 1, fig. 4). Contrairement aux *Thermomonosporopsis* spp., *Thermomonospora corbarica* n'a pas de sporophores organisés en structure plus ou moins compacte, sphérique, en parasol ou en manchon.

**Répartition stratigraphique et distribution géographique** : Ces données sont pour l'instant limitées au matériel décrit ici : Eocène (Sparnacien), Corbières (Douzens, Aude, France).

Genre *Thermomonosporites* nov. gen.

**Etymologie** : Le suffixe *-ites* est appliqué aux taxons fossiles ressemblant à un taxon actuel, ici le genre *Thermomonospora*. Substantif masculin.

Espèce-type : *Thermomonosporites arcuatus* nov. sp.

**Diagnose** : Comme pour l'espèce-type et seule espèce du genre.

**Différenciation des genres morphologiquement voisins** : Le tableau 1 donne les principaux caractères morphologiques permettant de distinguer *Thermomonosporites* nov. gen. de quatre genres possédant des spores isolées.

*Thermomonosporites arcuatus* nov. gen., nov. sp.  
2007 Actinomycètes – Breton : p. 130, fig. 5  
Figures 17 – 20, 32 D

**Etymologie** : *arcuatus*, *a*, *um*, (adjectif latin), arqué, allusion à la forme générale des colonies.

**Type** : Préparation T 109, 439 x 200, figuré Fig. 17.

**Origine géographique et stratigraphique du type** : Flanc nord de la montagne d'Alaric, commune de Douzens, Aude, France. Ambre déposé dans des sédiments littoraux sparnaciens.

**Autre matériel** : Sparnacien de Douzens, Aude, France : préparations T 51, 494 x 155 : Fig. 18, 19 ; T 45, 461 x 210 : Fig. 20 ; T 46, 524 x 191 et 509 x 194 ; T 47, 497 x 198 ; T 62, 500 x 171 ; T 73, 492 x 176.

**Diagnose et description** : Autour d'un axe courbe, coloré, peu densément ramifié, de 0,6 à 0,8 µm de diamètre (une observation à 1 µm de diamètre par « élargissement taphonomique ») s'organise une grappe de sporophores ramifiés ou non, de 0,2 µm de diamètre. L'ensemble peut atteindre 250 µm de longueur, le manchon de sporophores mesurant jusqu'à 15 µm de diamètre. La grappe de sporophores présente en général une extrémité effilée. Les sporophores peuvent être tous du même côté de l'axe, ils sont alors du côté convexe. Les spores, mesurant 0,3 à 0,5 µm de diamètre (0,5 µm à maturité), sont isolées à l'extrémité du sporophore, subsphériques à ovales (et alors leur grand axe est dans le prolongement du sporophore. L'axe de la grappe disparaît à maturité.

**Répartition stratigraphique et distribution géographique** : Ces données sont pour l'instant limitées au matériel décrit : Eocène (Sparnacien), Corbières (Douzens, Aude, France).

Famille NOCARDIACEAE Castelli & Chalmers, 1919  
1989 Nocardioform Actinomycetes – Holt : 2348-2350 ;  
2000 Group 22 – Holt *et al.* : 625-626]

Genre *Nocardia* Trevisan, 1889

Espèce-type : *Nocardia asteroides* (Eppinger) Blanchard,  
1896

**Diagnose** : [à l'exclusion des caractères biochimiques] Mycélium végétatif rudimentaire à extrêmement ramifié, de 0,5 – 1,2 µm de diamètre, se fragmentant en éléments non mobiles, bactéroïdes, bacilliformes ou coccoïdes. Mycélium aérien parfois visible seulement au microscope, mais toujours présent. Des conidies en chaînes courtes à longues, médiocrement à bien définies, peuvent occasionnellement être présentes sur le mycélium aérien ou plus rarement sur les deux mycéliums. Pas d'endospores, sporanges, sclérotés ni synnemata. Pas d'élément mobile.

*Nocardia ? cousini* nov. sp.  
Figures 21, 22, 32F

**Etymologie** : Je dédie cette espèce au paléontologue havrais Rémi Cousin, en témoignage d'amitié.

**Type** : Préparation T 109, 437 x 202, figuré Fig. 21, 22.

**Origine géographique et stratigraphique du type** : Flanc nord de la montagne d'Alaric, commune de Douzens, Aude, France. Ambre déposé dans des sédiments littoraux sparnaciens.

**Diagnose et description** : Mycélium ténu, représenté probablement par les hyphes du substrat, d'un diamètre de 0,2 – 0,4 µm, formant un tapis de 15 à 20 µm d'épaisseur, et se fragmentant en bâtonnets et en cocci. Mycélium robuste, probablement constitué par les hyphes aériens (diamètre des filaments 0,5 µm), élançés, très peu ramifiés, croissant perpendiculairement au substrat sur une longueur de 20 à

25 µm, parfois hélicoïdaux. L'extrémité des filaments robustes est fréquemment dilatée. Cette dilatation, ovale, mesure 1 x 2 µm.

**Remarque :** Le groupe des « Nocardioform Actinomycètes » rassemble des Actinomycètes qui forment un mycélium fugace qui se fragmente en éléments ayant la forme de bâtonnets ou de cocci (Holt, 1989). D'une part, des taxons inclus dans ce groupe peuvent ne pas présenter ce caractère, d'autre part, d'autres Actinomycètes peuvent, eux, le montrer. Le regroupement informel, sous ce terme, de taxons d'apparence semblable n'est donc pas satisfaisant et conduit certainement à un groupe hétérogène et polyphylétique, dont certains genres montrent une diversité morphologique extrême.

**Rapports et différences :** L'opposition entre un mycélium grêle touffu, très ténu et se fragmentant, et un mycélium robuste formé de filaments élancés aux ramifications rares, à l'apex dilaté et ne formant pas d'arthrospores constitue une originalité morphologique suffisante pour distinguer *Nocardia ? cousini* de toute autre morphospèce d'Actinomycète. Le genre *Nocardia* lui-même montre une assez grande diversité morphologique et se trouve donc mieux défini par ses caractères biochimiques que morphologiques. Dans ce contexte, le classement de la nouvelle espèce *N. cousini* dans le genre *Nocardia* est douteux et provisionnel, tous les caractères observables morphologiquement du genre *Nocardia* n'ayant pas été retrouvés dans le matériel examiné.

**Répartition stratigraphique et distribution géographique :** Ces données sont pour l'instant limitées au matériel décrit : Eocène (Sparnacien), Corbières (Douzens, Aude, France).

*Nocardia ? crispa* nov. sp.  
Figures 23-25, 32E

**Étymologie :** *crispus*, *a*, *um* (adjectif latin) : frisé, tordu, allusion à l'aspect crépu des filaments.

**Type :** Préparation T 109, 492 x 199, figuré Fig. 23, 24.

**Origine géographique et stratigraphique du type :** Flanc nord de la montagne d'Alaric, commune de Douzens, Aude, France. Ambre déposé dans des sédiments littoraux sparnaciens.

**Diagnose et description :** Filaments noirs ou sombres, mesurant 0,6 µm de diamètre, moyennement à très ramifiés et à parcours extrêmement sinueux, tortueux, donnant un aspect « crépu » caractéristique.

**Remarque :** L'attribution au genre *Nocardia* est encore plus incertaine que pour le taxon précédent, aucun caractère lié à la multiplication (fragmentation du mycélium, sporulation) n'ayant été observé.

**Répartition stratigraphique et distribution géographique :** Ces données sont pour l'instant limitées au matériel décrit : Eocène (Sparnacien), Corbières (Douzens, Aude, France).

Fig. 22. — *Nocardia ? cousini* nov. sp. Holotype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 109 ; 437 x 202. Hyphes du substrat. Contraste interférentiel. Barre d'échelle : 5 µm.

Fig. 22. — *Nocardia ? cousini* nov. sp. Holotype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 109; 437 x 202. Substrate hyphae. Differential interference contrast illumination. Scale bar: 5 µm.

Fig. 23. — *Nocardia ? crispa* nov. sp. Holotype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 109 ; 492 x 199. Fond clair. HF. Barre d'échelle : 20 µm.

Fig. 23. — *Nocardia ? crispa* nov. sp. Holotype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 109; 492 x 199. Bright field. HF. Scale bar: 20 µm.

Fig. 24. — *Nocardia ? crispa* nov. sp. Holotype, détail. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 109 ; 492 x 199. Contraste interférentiel. Barre d'échelle : 5 µm.

Fig. 24. — *Nocardia ? crispa* nov. sp. Holotype, detail. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 109; 492 x 199. Differential interference contrast illumination. Scale bar: 5 µm.

Fig. 25. — *Nocardia ? crispa* nov. sp. Autre spécimen. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 109 ; 492 x 199. Fond clair. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 25. — *Nocardia ? crispa* nov. sp. Other specimen. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 109; 492 x 199. Bright field. Scale bar: 10 µm.

Fig. 26. — *Actinoplanes ? girardi* nov. sp. Holotype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 178 ; 563 x 158. Sporange intact et sporange éclaté ayant libéré ses spores, ensemble donnant une impression trompeuse de sporange (à droite) en train de libérer ses spores (à gauche). Contraste interférentiel. HF. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 26. — *Actinoplanes ? girardi* nov. sp. Holotype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 178; 563 x 158. Intact sporangia and breaked up sporangia which released its spores, giving the misleading aspect of a sporangia (right) releasing its content (left). Differential interference contrast illumination. HF. Scale bar: 10 µm.

Fig. 27. — *Actinoplanes ? girardi* nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 171 ; 448 x 129. Sporangies et spores. Contraste interférentiel, frange noire. HF. Barre d'échelle : 10 µm.

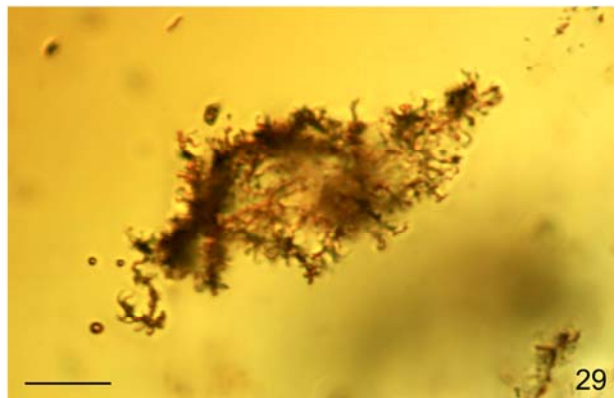
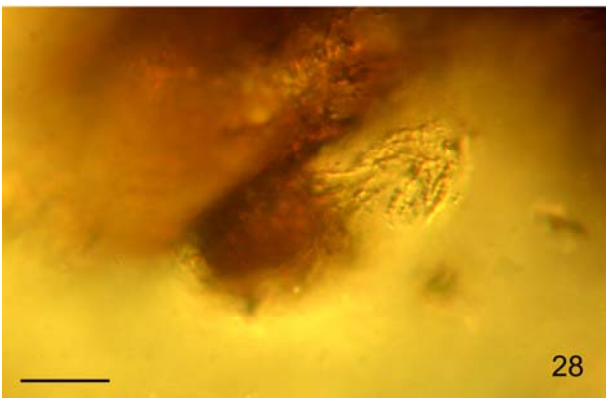
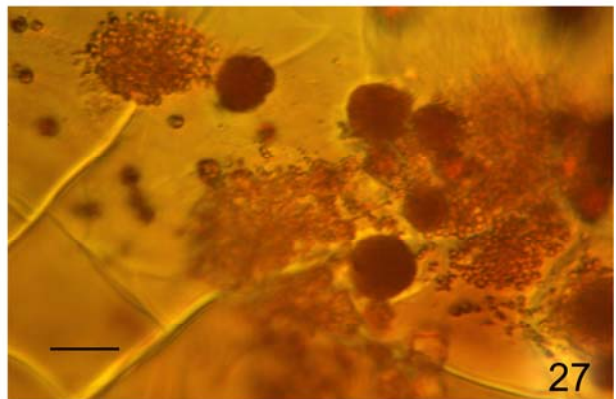
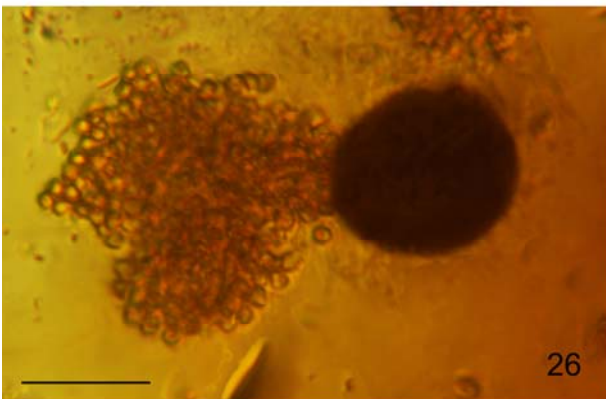
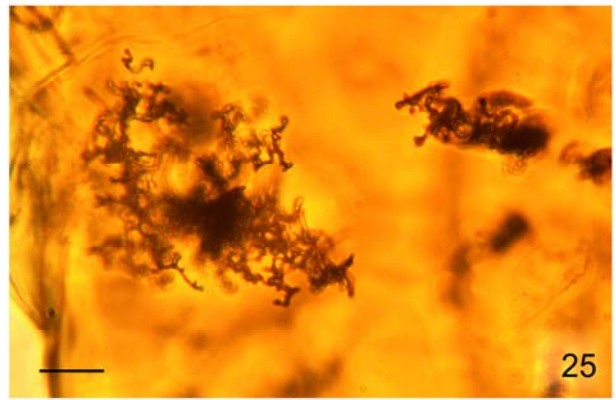
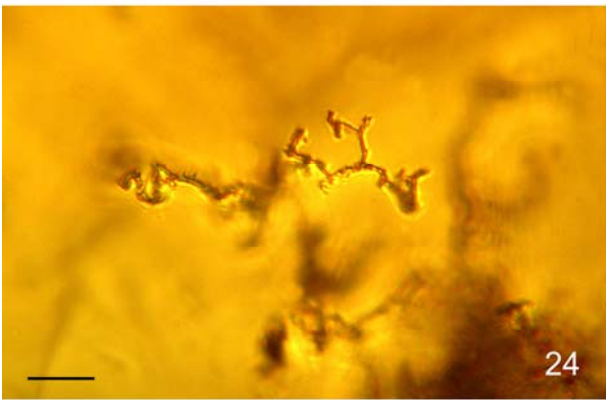
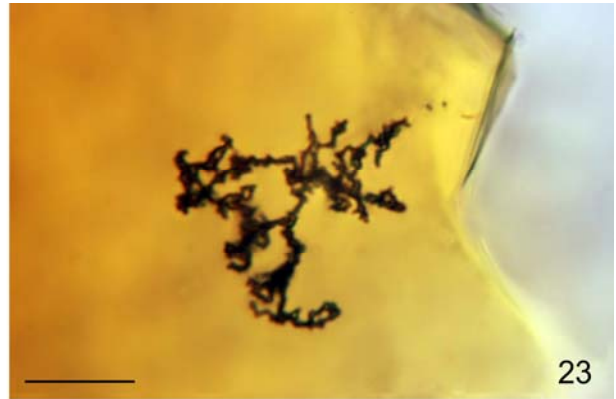
Fig. 27. — *Actinoplanes ? girardi* nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 171; 448 x 129. Sporangiae and spores. Differential interference contrast illumination, black fringe. HF. Scale bar: 10 µm.

Fig. 28. — *Streptomyces vizcainoi* nov. sp. Holotype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). Prep. 7.1.PM.A ; 493 x 82. Chaînes de spores de type *Rectiflexibiles*. Contraste interférentiel, frange noire. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 28. — *Streptomyces vizcainoi* nov. sp. Holotype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). Prep. 7.1.PM.A; 493 x 82. Rectiflexibiles-type chains of spores. Differential interference contrast illumination, black fringe. Scale bar: 10 µm.

Fig. 29. — *Streptomyces vizcainoi* nov. sp. Paratype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 171 ; 471 x 213. Colonie isolée dans l'ambre. Fond clair. HF. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 29. — *Streptomyces vizcainoi* nov. sp. Paratype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 171; 471 x 213. Colony isolated in amber. Bright field. Scale bar: 10 µm.





Famille ? MICROMONOSPORACEAE Krassilnikov, 1938,  
emend. Koch *et al.*, 1996  
1989 Section 28 Actinoplanetes – Holt : 2418 – 2450  
2000 Group 24: Actinoplanetes – Holt *et al.* : 653 - 666]

Genre *Actinoplanes* Couch, 1950

Espèce-type : *Actinoplanes philippinensis* Couch, 1950.

**Diagnose** : [hormis les caractères biochimiques] Mycélium fin, ramifié, ne se fragmentant pas. Spores produites au sein de sporanges sphériques ou subsphériques à très irréguliers, 3-20 x 6-30µm, portés par un court sporangiophore ou bien sessiles. Spores formées par fragmentation des hyphes à l'intérieur du sporange, sphériques, subsphériques ou en courts bâtonnets, mobiles.

*Actinoplanes ? girardi* nov. sp.  
Figures 26, 27, 32G

**Etymologie** : En l'honneur de Vincent Girard dont les travaux sur les micro-organismes de l'ambre sont de très haute qualité.

**Type** : Préparation T 178, 563 x 158, figuré Fig. 26.

**Origine géographique et stratigraphique du type** : Flanc nord de la montagne d'Alaric, commune de Douzens, Aude, France. Ambre déposé dans des sédiments littoraux sparnaciens.

**Autre matériel** : Préparations T 45, 461x210 ; T 49, 522x159 ; T57, 478x183 ; T 59 [non coordonné] ; T 171 : 448x128\* ; T178, 563x158.

**Diagnose et description** : Sporanges sphériques, dont le diamètre mesure 10 à 12 µm, à parois minces, et qui laissent échapper des spores très nombreuses, légèrement anguleuses à sphériques, mesurant 1 à 1,3 µm de diamètre.

**Description complémentaire** : La libération des spores de ces sporanges a été observée plusieurs fois. Les sporanges, localement abondants (on en a compté jusqu'à 10 dans une plage de 120 x 80 µm) n'ont jamais été observés en continuité avec un mycélium.

**Remarque** : Le terme « sporange » est utilisé ici dans son acception fonctionnelle « sac contenant des spores », selon l'usage anglo-saxon (Holt, 1989 ; Lechevalier, 1989, Holt *et al.*, 2000 ; Mijadon, 1997). Le fait que ces sporanges n'aient jamais été observés en relation avec le mycélium où ils ont été formés laisse planer une imprécision sur leur position systématique. L'attribution douteuse au genre *Actinoplanes* a été faite par élimination. Un certain nombre de genres d'Actinomycètes susceptibles de produire des sporanges ont été écartés sur le critère du nombre de spores (sporanges oligosporés), de la forme non sphérique des sporanges ou de la forme des spores. L'espèce *Actinoplanes ? girardi* aurait pu être placée au sein du groupe informel des Maduromycètes dans le genre *Streptosporangium* Couch, 1955. Néanmoins, les espèces connues compatibles avec la diagnose et les dimensions de notre nouvelle espèce possèdent soit une membrane du sporange épaisse avec des spores germant dans le sporange (par exemple Holt, 1989 : figures 30.30, 30.31 et 30.32) soit une membrane très fine et fragile qui éclate immédiatement dans l'eau ou bien ne peut pas être observée en microscopie optique (Holt, 1989 : p. 2545). De plus, le type de formation des spores par fragmentation (cloisonnement transversal) d'hyphes internes au sporange permet de comprendre qu'une spore immature puisse présenter un aspect légèrement anguleux tout en restant isodiamétrique. Enfin, la question d'un rapprochement avec le genre fossile *Streptosporangiopsis* Waggoner, 1994 (espèce-type *S. russelli* Waggoner, 1994 dans l'ambre du Crétacé supérieur du Mississippi) se pose. La description originale de ce taxon prend en compte les hyphes et le développement des sporanges, données dont nous ne disposons pas ici. De plus, les sporanges semblent, chez *S. russelli*, rester solidaires du sporangiophore, tandis qu'ils s'en séparent chez *A. ? girardi*, nov. sp.

**Répartition stratigraphique et distribution géographique** : Ces données sont pour l'instant limitées au matériel décrit : Eocène (Sparnacien), Corbières (Douzens, Aude, France).

Famille STREPTOMYCETACEAE Waksman & Henrici, 1943, emend. Rainey, Ward-Rainey & Stackebrandt, 1997  
1989 Section 29 Streptomycetes and related genera– Holt :  
2451 – 2508  
2000 Group 25: Streptomycetes and related genera – Holt  
*et al.* : 667 – 675]

Genre *Streptomyces* Waksman & Henrici, 1943

Espèce-type : *Streptomyces albus* (Rossi-Dora, 1891)  
Waksman & Henrici, 1943

**Diagnose** : [sans les caractères biochimiques] Mycélium végétatif (diamètre 0,5-2,0 µm) très ramifié qui se fragmente rarement. A maturité, le mycélium aérien forme des chaînes de trois à nombreuses spores.

*Streptomyces vizcainoi* nov. sp.  
Figures 28-30, 32H

**Etymologie** : Je dédie cette espèce au paléontologue audois Daniel Vizcaino, en témoignage d'amitié.

**Types** : Holotype : Préparation 7.1.PM.A : 493 x 82, figuré Fig. 28. Paratypes : Préparation T 171 : 471 x 213, figuré Fig. 29 et T 173 : 445 x 223 : figuré Fig. 30.

**Origine géographique et stratigraphique du type** : Flanc nord de la montagne d'Alaric, commune de Douzens, Aude, France. Ambre déposé dans des sédiments littoraux sparnaciens.

**Autre matériel** : Préparations T 165 : 496 x 163 et 426 x 191 ; T 169 : 462 x 132 ; T 173 : 546 x 226.

**Diagnose** : Hyphes mesurant 0,3 µm de diamètre, formant deux types de mycéliums : mycélium sombre, y compris en contraste de phase, avec des filaments ramifiés très tortueux, ne se fragmentant pas (mycélium du substrat possible) ; mycélium clair, peu tortueux, peu ramifié, droit et perpendiculaire au substrat au début du développement, formant des chaînes apicales droites ou flexueuses de plus de quinze arthrospores, de même diamètre (0,3 µm) que les filaments en fin de développement (mycélium aérien).

**Description complémentaire** : Aucune fragmentation du mycélium n'a été observée. En plus des chaînes d'arthrospores apicales du mycélium aérien, il a été rarement observé sur le mycélium du substrat la formation par endosporulation de spores intermédiaires de 0,3 µm de diamètre, ou bien (paratype T 171 : 471 x 213) une fois, des spores latérales rondes, sessiles, de 0,5 µm de diamètre.

*Streptomyces vizcainoi* est toujours observé dans des fragments d'ambre riches en débris végétaux. Les colonies de cet Actinomycète sont soit situées sur les débris végétaux, soit en paquets « flottant » dans l'épaisseur de l'ambre, et parfois étirés dans la direction de l'écoulement de la résine. Les débris végétaux de la préparation T 165 sont « polarisés ». S'ils portent des *S. vizcainoi*, le mycélium aérien clair, à filaments ténus, formant des chaînes de spores est situé d'un côté ; le mycélium du substrat sombre, tortueux, très ramifié, de l'autre. On peut penser à une microlitière végétale dont les éléments sont emportés par le flux de résine. L'un et l'autre mycéliums peuvent ainsi se retrouver en paquets isolés « flottant » dans l'épaisseur de l'ambre. En début de développement, le mycélium aérien est formé de filaments clairs, érigés, droits, peu ramifiés, perpendiculaires au support, de même longueur. Ils se ramifieront et formeront des chaînes de spores apicales ultérieurement.

**Rapports et différences** : L'attribution au genre *Streptomyces* se fonde sur la présence d'un mycélium du substrat ramifié, ne se

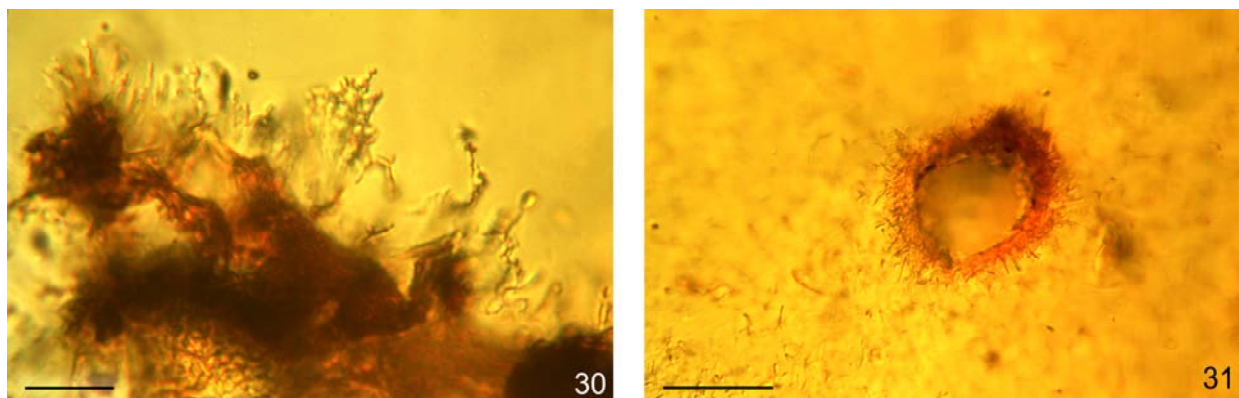


Fig. 30. — *Streptomyces vizcainoi* nov. sp. Paratype. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 173 ; 445 x 223. Colonie développée sur un fragment végétal (brun foncé). Contraste interférentiel, frange noire. M.a.p. Barre d'échelle : 10 µm.

Fig. 30. — *Streptomyces vizcainoi* nov. sp. Paratype. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 173; 445 x 223. Colony developed on a dark brown plant fragment. Differential interference contrast illumination, black fringe. M.a.p. Scale bar : 10 µm.

Fig. 31. — *Thermomonosporopsis waggeri* nov. gen., nov. sp. Ambre sparnacien, Douzens (Aude, France). T 177 ; 534 x 185. Croissance d'un tapis autour d'une perforation de l'ambre. Contraste interférentiel, frange noire. Barre d'échelle : 50 µm.

Fig. 31. — *Thermomonosporopsis waggeri* nov. gen., nov. sp. Sparnacian amber, Douzens (Aude, France). T 177; 534 x 185. Growth of a felting around a boring of the amber. Differential interference contrast illumination, black fringe. Scale bar : 50 µm.

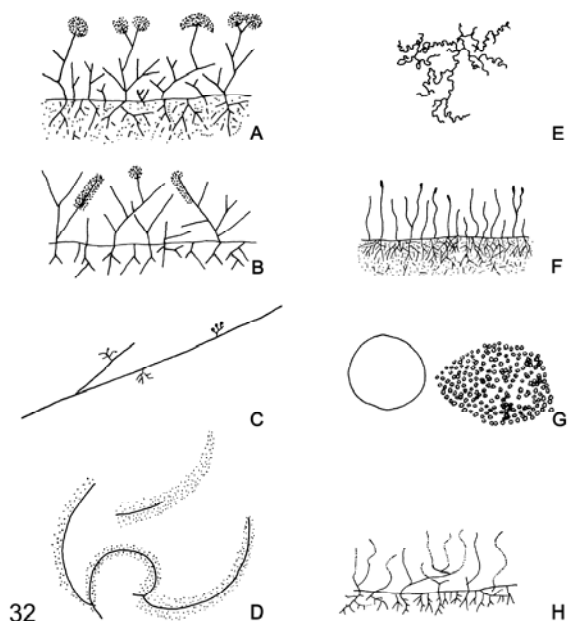


Fig. 32. — Les Actinomycétales de l'ambre de Douzens (Aude) : principaux caractères morphologiques. Schématique, non à l'échelle.

A : *Thermomonosporopsis waggeri* nov. gen., nov. sp. B :

*Thermomonosporopsis tenuis* nov. gen., nov. sp. C :

*Thermomonospora corbarica* nov. sp. D : *Thermomonosporites*

*arcuatus* nov. gen., nov. sp. E : *Nocardia ? crispa* nov. sp. F :

*Nocardia ? cousini* nov. sp. G : *Actinoplanes ? girardi* nov. sp. H :

*Streptomyces vizcainoi* nov. sp.

Fig. 32. — The Actinomycetales of the amber from Douzens (Aude) : main morphological characters. Schematic, not to scale. A :

*Thermomonosporopsis waggeri* nov. gen., nov. sp. B :

*Thermomonosporopsis tenuis* nov. gen., nov. sp. C :

*Thermomonospora corbarica* nov. sp. D : *Thermomonosporites*

*arcuatus* nov. gen., nov. sp. E : *Nocardia ? crispa* nov. sp. F : *Nocardia*

*? cousini* nov. sp. G : *Actinoplanes ? girardi* nov. sp. H : *Streptomyces*

*vizcainoi* nov. sp.

fragmentant pas et d'un mycélium aérien portant des chaînes terminales d'arthrospores. Celles-ci sont longues et simplement flexueuses (type morphologique *Rectiflexibles*). Le diamètre des filaments (0,3 µm) est plus faible que celui de la plupart des représentants du genre (0,5 – 2,0 µm). L'aspect du mycélium aérien en début de croissance – filaments peu ramifiés érigés perpendiculairement au substrat – peut évoquer celui de *Nocardia ? cousini* nov. sp. On retiendra chez ce dernier la fragmentation du mycélium du substrat et l'absence de chaînes d'arthrospores sur les filaments aériens. Waggoner (1993) a décrit, dans l'ambre éocène de l'État de Washington un Actinomycète cf. *Streptomyces* sp. Les spécimens qu'il décrit ont des hyphes et des spores de 1 – 2 µm de diamètre. Ce taxon, que Waggoner laisse en nomenclature ouverte, est donc probablement distinct de *S. vizcainoi* nov. sp. bien que de même âge (Eocène) et, comme lui, recueilli dans l'ambre.

#### AUTRES BACTÉRIES

L'ambre de Douzens contient parfois des microinclusions de très petite taille (0,3 – 2 µm), en forme de bâtonnets ou de cocci (Breton *et al.*, 1999). Leurs dimensions et la forme générale sont les seuls caractères disponibles : il serait donc vain de les décrire et de les nommer. En effet, s'il peut s'agir de bacilles ou de cocci appartenant à des groupes de bactéries autres que les Actinomycètes, ces inclusions peuvent aussi être des spores d'Actinomycètes ou résulter de la fragmentation de leur mycélium. Cette dernière possibilité est d'autant plus plausible que les Actinomycètes sont très abondants dans l'ambre de Douzens.

#### V. — DISCUSSION

##### 1) La diversité des Actinomycètes de l'ambre sparnacien de Douzens

Bien que la « richesse » des caractères morphologiques varie d'une espèce à l'autre, les neuf espèces décrites se répartissent pour moitié environ dans la famille des

Thermomonosporaceae, pour moitié entre trois autres familles. Compte tenu du « filtre taphonomique », et du fait que la définition de nos taxons est nécessairement strictement morphologique, cette diversité de la taphocénose traduit une forte diversité de la biocénose originelle. En effet, tous les taxons actinomycètes de la biocénose originelle n'ont pas été fossilisés (ou retrouvés, reconnus et étudiés !). De plus, la biodiversité, exprimée en nombre de morphoespèces, est inférieure à la biodiversité prenant en compte les espèces distinguées sur des critères biochimiques ou métaboliques.

Les Actinomycètes se trouvent aujourd'hui dans tous les milieux : marins (voir Weyland, 1986), eau douce, terrestres et parasites animaux ou végétaux. L'inventaire des autres micro-organismes de l'ambre sparnacien des Corbières a été établi par Breton *et al.* (1999) et Breton (2007) et comprend des :

- filaments mycéliens peu fréquents, et pouvant être le plus souvent rapportés à des Imperfecti ;
- algues : *Trentepohlia* sp. ; cf. *Chaetonemopsis pseudobulbochaete* Gauthier – Lelièvre, 1954 ; cf. *Dichotomosiphon* sp. ; Zygnemataceae avec zygospores *Ovoidites* sp. ; Chlorococcales ;
- protistes *incertae sedis* ;
- abondantes spores, rarement identifiables. Une spore ailée est possiblement un phycome de Prasinophyte cf. *Pterospermella* sp. ;
- métazoaires : spermatodesmes,
- fragments de végétaux supérieurs en décomposition.

L'ambre étudié a donc fossilisé des organismes susceptibles de vivre dans des milieux d'eau douce, terrestres ou marins. Seules les algues permettent une discrimination paléoenvironnementale : *Trentepohlia* sp. indique un milieu terrestre humide (sols, rochers, troncs) ; cf. *Chaetonemopsis pseudobulbochaete*, cf. *Dichotomosiphon* sp. et les Zygnemataceae indiquent un milieu dulcicole. Parmi les actinomycètes, *Thermomonosporopsis waggoneri* est de loin l'espèce la plus abondante dans l'ambre sparnacien des Corbières. Si l'espèce est proche du genre *Thermomonospora*, ce que laissent supposer les caractères morphologiques et reproductifs, et a des exigences écologiques comparables, elle peut être une espèce mésophile des sols et des végétaux en décomposition,

Les Actinomycètes de l'ambre sparnacien des Corbières se sont donc développés en milieu terrestre humide à dulcicole, pour certains associés à des végétaux en décomposition. En se fondant sur les résultats d'un travail de Lakshmanaperumalsamy *et al.* (1986) sur les Actinomycètes de l'estuaire du Vellar (Inde), et « avec toutes les réserves qu'impose cette transposition actualistique », Breton (2007) suggère que l'ambre sparnacien des Corbières, riche en Actinomycètes et relativement plus pauvre en autres bactéries (voir ci-dessus, le paragraphe « autres bactéries ») et en champignons correspond à une sécrétion estivale de résine, ce que tendrait à corroborer la possible mésophilie de l'espèce dominante.

## 2) Le statut taphonomique des Actinomycètes de l'ambre sparnacien des Corbières : piégeage ou colonisation ?

Breton (2007), en comparant les tapis cyanobactériens de l'ambre cénomaniens d'Ecommoy (Sarthe) aux tapis

d'Actinomycètes des Corbières pose la question « piégeage ou colonisation ? ». En effet, Néraudeau (in litt.) et Girard (2008) pensent que les *Palaeocolteronema cenomanensis* Breton & Tostain, 2005 (cyanobactérie filamenteuse à gaine) qu'ils observent dans l'ambre crétacé des Charentes (Archingey, Cadeuil, Charente-Maritime) ont colonisé des boules de résine préexistantes. Ils argumentent de la direction générale centripète de la propagation des filaments, de l'existence de nodules totalement enveloppés par une croûte très riche en *P. cenomanensis* et de l'observation par Schmidt & Schäfer (2005), lors d'expériences d'actuotaphonomie, de la croissance de bactéries gainées dans la résine fraîche en milieu aqueux.

Nous avons cependant (Breton, 2007) conclu que les cyanobactéries de l'ambre d'Ecommoy et les Actinomycètes de l'ambre de Douzens y avaient été piégés, collés à la surface d'une résine relativement fluide, éventuellement sous l'eau. De nouvelles observations nous conduisent à nuancer cette conclusion. En effet, si des observations plaident en faveur du piégeage, d'autres ne peuvent s'expliquer que par la colonisation de la surface et la croissance des Actinomycètes dans la résine. Nous pensons que ce sont des actinomycètes (dans le cas de l'ambre de Douzens), des cyanobactéries ou autres bactéries (dans les cas des ambres crétacés) piégés qui ont colonisé la surface du morceau de résine fraîche, pas encore polymérisée : piégeage et colonisation sont donc presque concomitants et ont pu survenir successivement au tout début de l'histoire taphonomique du morceau d'ambre.

### • Arguments en faveur du piégeage

Les Actinomycètes *Thermomonospora corbarica*, *Thermomonosporites arcuatus*, *Nocardia? cousini*, *Streptomyces vizcainoi*, et les sporanges de *Actinoplanes? girardi* sont toujours situés en profondeur dans l'ambre, soit isolés, soit associés à des débris végétaux. Les filaments peuvent être étirés dans le flux de la résine. Sur certains fragments végétaux en décomposition, fragments de feuilles vraisemblablement, les colonies de *Streptomyces vizcainoi* sont polarisées (préparation T 165 : voir le paragraphe « Systématique »). *Thermomonosporopsis waggoneri* peut aussi, mais plus rarement, se retrouver en paquets isolés dans l'ambre. Habituellement, il forme, ainsi que *T. tenuis*, un tapis fossilisé en surface de l'ambre. Dans plusieurs préparations, ce tapis comporte, de l'extérieur vers l'intérieur :

- une couche minérale représentant au moins pour partie le sédiment originel piégé puisqu'il contient le mycélium grêle ;
- le mycélium robuste portant les sporophores ;
- un ambre clair contenant, superposés à une certaine distance des gazons d'actinomycètes, les filaments cf. *Dichotomosiphon* sp. et des microinclusions isolées (voir Breton, 2007 : fig. 3 et 12).

Une telle disposition s'explique au mieux par un piégeage, le flux de résine ayant fossilisé sans déplacement la superposition observée sédiment / tapis de *Thermomonosporopsis* spp. fertiles / filaments algaires. Le piégeage explique également la présence évoquée plus haut des autres Actinomycètes à l'intérieur de l'ambre.

### • Arguments en faveur de la colonisation

Il convient d'abord d'observer que l'argument principal (et convaincant) invoqué par Néraudeau (in litt.) et par Girard

(2008) en faveur de la colonisation de nodules d'ambre, à savoir l'enveloppement intégral de certains nodules par les micro-organismes n'a pas pu être examiné à Douzens (non plus qu'à Ecommoy) où nous n'avons pas recueilli de nodule entier, l'ambre étant toujours fragmenté dans le gisement. Deux observations sont retenues en faveur de la colonisation. D'une part, on a observé un tapis homogène de *Thermomonosporopsis waggeri* sur la section d'une « larme » (ou « stalactite ») d'ambre sparnacien de Douzens, non déformée, et qui ne peut donc avoir piégé des actinomycètes sur tout son pourtour. D'autre part, un tapis de *T. waggeri* s'est développé autour d'une microperforation de l'ambre (de 40 – 60 µm de diamètre) aujourd'hui emplie de calcite : préparation T 177 ; 534 x 185, Fig. 31). Cela implique que la colonisation et la croissance des Actinomycètes aient eu lieu après un durcissement relatif de la résine, suffisant pour que cette perforation de se referme pas.

## VI. — CONCLUSIONS

Cette étude de l'ambre sparnacien de Douzens (Aude, France) met en évidence un processus taphonomique original. Si les autres taxons d'Actinomycètes se sont trouvés fossilisés par piégeage dans la résine, *Thermomonosporopsis waggeri* nov. gen., nov. sp. y a été inclus par un double processus : piégeage, mais aussi par colonisation de la surface de la résine, après un durcissement relatif, et croissance centripète.

Pour la première fois, une flore d'Actinomycètes diversifiée (huit morphoespèces) est décrite dans l'ambre. La préservation d'organes reproducteurs (sporophores, spores, sporanges) et l'observation de caractères liés à la croissance (dualité du mycélium) ou à la multiplication (fragmentation

du mycélium) ont permis de définir précisément ces huit espèces, répartis entre six genres dont deux nouveaux, et de proposer une hypothèse de placement au sein de familles actuelles. L'originalité de la morphologie des rameaux sporifères des deux espèces du genre *Thermomonosporopsis* nov. gen. et de l'espèce du genre *Thermomonosporites* nov. gen. justifient leur inclusion dans des genres nouveaux. Pour le reste, la morphologie des Actinomycètes du Sparnacien de Douzens est très comparable à celle des espèces actuelles, confirmant le conservatisme morphologique couramment admis chez les protistes, et en particulier chez les procaryotes. Dans le cas de l'ambre sparnacien des Corbières, la résine a coulé dans des collections d'eau douce ou bien sur la terre ou des rochers humides. Elle y a piégé, avec d'autres micro-organismes, des Actinomycètes, dont certains ont pu coloniser des nodules de résine après un durcissement relatif. Les nodules de résine durcie ont ensuite été remaniés, avec un très court trajet car ils ne présentent pas d'usure, dans des sédiments marneux très littoraux. Des indices laissent penser que la sécrétion de résine a été plutôt estivale. La méso- ou la thermophilie probable de certains taxons d'Actinomycètes indique un climat chaud, ou, au moins, une température moyenne à élevée au niveau des végétaux en décomposition dans lesquels ils se développaient.

**Remerciements.** — Mes remerciements les plus chaleureux vont à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont aidé, sur le terrain ou au laboratoire, m'ont approvisionné en matériel ou ont échangé des idées, ont étudié les flores et faunes d'accompagnement, ou ont participé aux premières recherches et en particulier Rémi Cousin, Céline Gauthier, Vincent Girard, Alain Havard, Didier Merle, Didier Néraudeau, Denise Pons, Hervé Sider, Florent Tostain, Daniel Vizcaino. Les critiques, très positives et pertinentes, apportées par les deux rapporteurs, Mme Christine Strullu-Derrien et M. Daniel Vachard, qui se sont penchés sur une première rédaction de cet article ont permis de l'améliorer grandement : ils en sont vivement remerciés. La publication de ce travail a été faite dans le cadre d'un partenariat entre l'auteur et Science Action Haute Normandie, le C.C.S.T.I. de Haute Normandie.

## BIBLIOGRAPHIE

- ASCASO C, WIERCHOS J, CORRAL C, LOPEZ R, ALONSO J. (2003). — New applications of light and electron microscopic techniques for the study of microbiological inclusions in amber. *Journal of Paleontology*, **77**: 1182 – 1192.
- BARGHOORN E S, TYLER S A. (1965). — Microorganisms from the Gunflint Chert. *Science*, **147**: 563 – 577.
- BECKENBACH A T (1995). — Age of bacteria from amber [technical comments]. *Science*, **270**: 2015 – 2016.
- BLUNCK G (1929). — Bakterieneinschlüsse im Bernstein. *Zentralblatt für Geologie, Mineralogie und Paläontologie*, **11**: 554 – 555.
- BRETON G (2007). — La bioaccumulation de micro-organismes dans l'ambre : analyse comparée d'un ambre cénomaniens et d'un ambre sparnacien et de leurs tapis algaires et bactériens. *Comptes rendus Palevol*, **6** : 125 – 133.
- BRETON G, GAUTHIER C, VIZCAÏNO D. (1999). — Land and freshwater microflora in a Sparnacian amber from the Corbières (South France) : first observations. *Estudios del Museo de Ciencias naturales de Alava*, **14**, núm. esp. 2 : 161 – 166.
- BRETON G, TOSTAIN F. (2005). — Les micro-organismes de l'ambre cénomaniens d'Ecommoy (Sarthe, France). *Comptes rendus Palevol*, **4**: 31 – 46.
- CANO R J, BORUCKI M K. (1995). — Revival and identification of bacterial spores in 25 to 40-millions-years-old Dominican amber. *Science*, **268**: 1060 – 1064.
- CLOUD P, MORRISON K. (1979). — On microbial contaminants, micropseudofossils and the oldest records of life. *Precambrian Research*, **9**: 81 – 91.
- DE FRANCESCHI D, DEJAX J, DE PLOËG G. (2000). — Extraction du pollen inclus dans l'ambre [Sparnacien du Quesnoy (Oise), Bassin de Paris] : vers une nouvelle spécialité de la paléo-palynologie. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des Planètes*, **330** : 227-233.
- DEJAX J, DE FRANCESCHI D, LUGARDON B, DE PLOËG G, ARNOLD V. (2001). — Le contenu cellulaire du pollen fossilisé dans l'ambre, préservé à l'état organique. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des Planètes*, **332** : 339 – 344.
- DE PLOËG G, DUTHEIL D, GHEERBRANT E, GODINOT M, JOSSANG A, NEL A, PAICHELIER J-C, PONS D, RAGE J-C. (1998). — Un nouveau gisement paléontologique Konservat-Lagerstätte à la base de l'Eocène dans la région de Creil (Oise). *Strata*, **1** : (9) : 108 – 110.



- ELLIS D. (1915). — Fossil micro-organisms from the Jurassic and Cretaceous rocks of Great Britain. *Proceedings of the Society of Edinburgh*, **35**: 110 – 133.
- GALIPPE V. (1920). — Recherche sur la résistance des microzymas à l'action du temps et sur leur survivance dans l'ambre. *Comptes rendus hebdomadaires de l'Académie des Sciences, Paris*. **170** : 856-858.
- GIRARD V. (2008). — Microcénoses des ambres médio-crétaqués français. Taphonomie, systématique, paléocéologie et reconstitution du paléoenvironnement. Thèse de doctorat, Université de Rennes I (02/12/2008) : 294 p.
- GIRARD V. (2009). — Evidence of Scenedesmeaceae (Chlorophyta) from 100 million-year-old amber. In : NÉRAUDEAU D, PERRICHOT V, (eds), Studies on middle Cretaceous deposits from southwestern France. *Geodiversitas*, **31**: 145-151.
- GIRARD V, BRETON G, BRIENT L, NÉRAUDEAU D. (2008). — Sheathed prokaryotic filaments, major components of mid Cretaceous French amber microcosmos. *Journal of Paleolimnology*, DOI 10.1007/s10933-008-9287-2.
- GIRARD V, NÉRAUDEAU D, BRETON G, SAINT-MARTIN S, SAINT-MARTIN J-P (2009). — Contamination of amber samples by recent microorganisms and remediation evidenced by mid-Cretaceous amber of France. *Geomicrobiology Journal*, **26** : (1) 21 – 30.
- GIRARD V, SAINT-MARTIN S, BRETON G, NÉRAUDEAU D, PERRICHOT V, SAINT-MARTIN J-P, SCHMIDT A. (2007). — An exceptional preservation of marine diatoms in late Albian French amber. Abstract book. III World Congress on the Amber Inclusions Fossils X3 (4 – 9May 2007) Vitoria-Gasteiz, Spain: 80.
- GIRARD V, SAINT-MARTIN S, SAINT-MARTIN J-P, SCHMIDT A R, STRUWE S, PERRICHOT V, NÉRAUDEAU D, BRETON G. (2009a). — Exceptional preservation of marine diatoms in upper Albian amber. *Geology*, **37** (1): 83 – 86.
- GIRARD V, SCHMIDT A R, SAINT-MARTIN S, STRUWE S, PERRICHOT V, SAINT-MARTIN J-P, GROSHENY D, BRETON G, NÉRAUDEAU D. (2008). — First evidence of marine microfossils from amber. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **105**, (45): 17425 – 17429.
- GIRARD V, SCHMIDT A R, STRUWE S, PERRICHOT V, BRETON G, NÉRAUDEAU D. (2009b). — Taphonomy and palaeoecology of mid-Cretaceous French amber-preserved microorganisms from South-western France. In : NÉRAUDEAU D, PERRICHOT V, (eds), Studies on middle Cretaceous deposits from southwestern France. *Geodiversitas*, **31**: 153-162.
- GOEPPERT H. R. (1883). — Von den Bernstein-Coniferen, insbesondere auch in ihren Beziehung zu den Coniferen der Gegenwart. Erster band in GOEPPERT H R, MENGE A (eds) Die Flora des Bernsteins und ihre Beziehungen zur Flora der Tertiär Formation und der Gegenwart. Vol. **1**, Dantzig: 140 p.
- GOEPPERT H R, BERENDT G C. (1845). — Der Bernstein und die in ihm befindlichen Pflanzenreste des Vorwelt. Nicolaischen Buchhandlung, Berlin: 125 p.
- GREENBLATT C L, BAUM J, KLEIN B Y, NACHSON S, KOLTUNOV V, CANO R J. (2004). — *Micrococcus luteus*: survival in amber. *Microbial Ecology*, **48**, 120 – 127.
- GREENBLATT C L, DAVIS A, CLEMENT B G, KITTS C L, COX T, CANO R J. (1999). — Diversity of microorganisms isolated from amber. *Microbial ecology*, **38**, 58 – 68.
- HOLT J G (editor-in-chief) (1989). — Bergey's manual of systematic bacteriology. Volume **4**. Williams & Wilkins, Baltimore, U.S.A.: 2299 – 2648.
- HOLT J G, KRIEG N R, SNEATH P H A, STALEY J T, WILLIAM S T. (2000). — Bergey's manual of determinative bacteriology. Ninth edition. Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, U.S.A.: xviii + 787 p.
- KENNEDY M J, READER S L, SWIERCZYNSKI L M. (1994). — Preservation records of micro-organisms: evidence of tenacity of life. *Microbiology*, **140** : 2513 – 2529.
- KNOLL A R (1977). — Paleomicrobiology, 9 – 29 in LASKIN A I, LECHEVALIER H A (eds). Handbook of microbiology; Vol. **1**: Bacteria. CRC Press, Cleveland, U.S.A.: 757 p.
- KOHRING R. (1995). — Fossile Bakterien und Pilzsporen aus dem Baltischen Bernstein. *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie. Monatshefte*, 1995, **6** : 321 – 335.
- LAKSHMANAPERUMALSANY P, CHANDRAMOHAN D, NATARAJAN R. (1986). — Seasonal variation of microbial population from sediments of Vellar estuary, South India. GERBAM – Deuxième colloque International de Bactériologie Marine, CNRS, Brest, 1 – 5 octobre 1984, IFREMER, Actes de colloques **3** : 43 – 54.
- LAMBERT L H, COX T, MITCHELL K, ROSSELLÓ-MORA R A, DELCUETO C, DODGE D E, ORKAND P, CANO R J. (1998). — *Staphylococcus succinus* sp. nov., isolated from Dominican amber. *International Journal of Systematic Bacteriology*, **48** : 511 – 518.
- LECHEVALIER M P. (1989). — Actinomycetes with multilocular sporangia, 2405 – 2417 in HOLT J G (editor-in-chief), Bergey's manual of systematic bacteriology. Volume 4. Williams & Wilkins, Baltimore, U.S.A.
- MARTÍN-GONZÁLES A, WIERZCHOS J, GUTTIÉREZ J C, ALONSO J, ASCASO C. (2008). — Morphological stasis of protists in Lower Cretaceous amber. *Protist*, **159** : 251 – 257.
- MIYADOH S (editor-in-chief). (1997). — Atlas of Actinomycetes, The Society for Actinomycetes Japan (publ), Asakura Publishing Company (impr): 224 p.
- MIYADOH S. (1997). — Morphology and phylogeny of Actinomycetes, 198 – 199 in MIYADOH S (editor-in-chief), Atlas of Actinomycetes, The Society for Actinomycetes Japan (publ), Asakura Publishing Company.
- NEL A, DE PLOËG G, DEJAX J, DUTHEIL D, DE FRANCESCO D, GHEERBRANT E, GODINOT M, HERVET S, MENIER J-J, AUGÉ M, BIGNOT G, CAVAGNETTO C, DUFFAUD S, GAUDANT J, HUA S, JOSSANG A, DE LAPPARENT DE BROIN F, POZZI J-P, PAICHELER J-C, BEUCHET F, RAGE J-C. (1999). — Un gisement sparnacien exceptionnel à plantes, arthropodes et vertébrés (Eocène basal, MP7) : Le Quesnoy (Oise, France). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris, Sciences de la Terre et des planètes*, **329**: 65 – 72.
- PLAZIAT J C. (1970). — Contribution à l'étude de la faune et de la flore du Sparnacien des Corbières Septentrionales. *Cahiers de Paléontologie* : 121 p.
- POINAR G O. (1994). — Fossils in amber. *Current Science*, **66**, (6): 417 – 420.
- POINAR G O, WAGGONER B M, BAUER U C, 1993. Terrestrial soft-bodied protists and other micro-organisms in Triassic amber. *Science*, **2159**: 222 – 224
- PRIEST F G. (1995). — Age of bacteria from amber [technical comments]. *Science*, **270** : 2015.
- SAINT-MARTIN J P, SAINT-MARTIN S, TOSTAIN F, PERRICHOT V, NÉRAUDEAU D, BRETON G. (2006). — L'ambre fossile du Crétacé inférieur : un piège pour les diatomées ? *Symbioses*, **14**: 26.

- SCHMIDT A R, RAGAZZI E, COPELLOTTI O, ROGHI G. (2006). — A microworld in Triassic amber. *Nature*, **444**: 835.
- SCHMIDT A R, SCHÄFER U. (2005). — *Leptotrichites resinatus* new genus and species: a fossil sheathed bacterium in alpine Cretaceous amber. *Journal of Paleontology*, **79** (1): 175 – 184.
- SCHMIDT A R, SCHÖNBORN W, SCHÄFER U. (2004). — Diverse fossil Amoebae in German Mesozoic amber. *Palaeontology*, **47** (2): 185 – 197.
- SMOOT E L, TAYLOR T N. (1983). — Filamentous micro-organisms from the Carboniferous of North America. *Canadian Journal of Botany*, **61**: 2251 – 2259.
- SNEATH P H A. (1962). — Longevity of micro-organisms. *Nature*, **195** (4842): 643-646.
- STACKEBRANDT E, RAINEY F A, WARD-RAINEY N L. (1997). — Proposal for a new hierarchic classification system, Actinobacteria, classis nov. *International Journal of Systematic Bacteriology*, **47** (2): 479 – 491.
- TAPPAN H. (1980). — The paleobiology of plant protists. W. M. Freeman & Company, San Francisco: 1028 p.
- VOBIS G. (1997). — Morphology of actinomycetes, 181 – 181 in MIYADOH S (editor-in-chief), Atlas of Actinomycetes, The Society for Actinomycetes Japan (publ), Asakura Publishing Company.
- WAGGONER B M. (1993). — Fossil Actinomycetes and other Bacteria in Eocene amber from Washington State, U.S.A. *Tertiary Research*, **14** (4): 155 – 160.
- WAGGONER B M. (1994a). — An aquatic microfossil assemblage from Cenomanian amber of France. *Lethaia*, **29**: 77 – 84.
- WAGGONER B M. (1994b). — Fossil micro-organisms from the Upper Cretaceous amber of Mississippi. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **80**: 75 – 84.
- WAGGONER B M. (1996). — Bacteria and protists from the Middle Cretaceous amber of Ellsworth County, Kansas. *Paleobios*, **17** (1): 20 – 26.
- WAGGONER B M, POINAR G O. (1992). — A fossil Myxomycete plasmodium from Eocene – Oligocene amber of the Dominican Republic. *Journal of Protozoology*, **39**: 639 – 642.
- WAKSMANN S A. (1950). — The Actinomycetes. *Annales Cryptogamici et Phytopathologici*, **9**: 230 p.
- WEYLAND H. (1986). — Actinomycetes of the bottom sediments of various seas. GERBAM – Deuxième colloque International de Bactériologie Marine, CNRS, Brest, 1 – 5 octobre 1984, IFREMER, Actes de colloques **3** : 73 – 79.



## COMPLEMENT A L'INVENTAIRE DE LA MACROFLORE DU MIOCENE SUPERIEUR DE LA DIATOMITE DE MURAT (CANTAL, MASSIF CENTRAL, FRANCE)

### *Addition to the inventory of the Upper Miocene macroflora from the diatomite of Murat (Cantal, Massif Central, France)*

par Philippe LEGRAND (\*)

(Planches I et II)

**Résumé.** — Le gisement de diatomite de Murat (Cantal : 02°52'50"E, 45°07'30"N), daté du Miocène final (Messinien), est connu depuis la fin du 19<sup>ème</sup> siècle. Il est particulièrement riche en végétaux fossiles, et notamment en feuilles. De nouvelles prospections ont été effectuées dans ce gisement de 2002 à 2009, et ont permis notamment d'inventorier le niveau de base de la formation qui n'avait jamais été exploité. L'ensemble des nouvelles récoltes permet de décrire une vingtaine de formes fossiles, et notamment 10 espèces qui n'étaient pas connues jusqu'alors dans ce gisement : 1 Pteridophyte, 3 Gymnospermes (avec une mention particulière pour *Pseudolarix schmidtgenii* Kräusel), 1 Angiosperme Monocotylédone et 5 Angiospermes Dicotylédones.

Le nombre total d'espèces connues du gisement de diatomite de Murat est maintenant de 83 espèces : 3 Pteridophytes, 11 Gymnospermes, 4 Angiospermes Monocotylédones et 65 Angiospermes Dicotylédones. Ceci en fait l'un des plus riches gisements en végétaux fossiles miocènes du Massif Central.

**Abstract.** — *The lacustrine diatom beds located near the small town of Murat (Cantal, Central France : 02°52'50"E, 45°07'30"N) are well known since the end of the 19<sup>th</sup> century. A rich macroflora occurs in these diatom beds dated near the Mio-Pliocene boundary (Messinian). New fossil samples were collected from 2002 to 2009, particularly in the lower diatom beds at the basis of this geological level. About twenty fossil forms were newly found, particularly 10 species unknown til now in this site : 1 Pteridophyta, 3 Gymnospermae (with special emphasis on Pseudolarix schmidtgenii Kräusel) and 6 Angiospermae.*

*The number of species described from the diatomite of Murat is now 83 in total : 3 Pteridophytae, 11 Gymnospermae and 69 Angiospermae. So, the diatomite of Murat is one of the richest site for Miocene flora in Central France.*

Mots-clés : macroflore fossile, diatomite, Miocène supérieur, Massif Central, France

Keywords : fossil macroflora, diatomite, Upper Miocene, Massif Central, France

### I. — INTRODUCTION

Le gisement de diatomite dit « de Murat » (Cantal), situé autour du point de coordonnées Lambert III : x = 642,80 ; y = 3314,00 (longitude 02°52'50"E, latitude 45°07'30"N), est connu depuis 1875 et exploité en grand depuis 1901. Il constitue une ellipse de 0,8x1,3 km, d'une épaisseur moyenne de 20 mètres ; il est recouvert de dépôts alluviaux ou périglaciaires et surtout d'une énorme accumulation de moraine de fond atteignant 25 mètres de puissance. Les exploitations ont par ailleurs rencontré trois intrusions basaltiques, dont l'une datée à 5,4 Ma, qui perturbent le fond du gisement et thermométamorphisent les diatomites. Le gisement de diatomite est donc daté du Messinien, et noté m3D sur la carte géologique (Durand et Rey, 1964 ; Goëer de Hervé et Tempier, 1988).

Les espèces fossiles de la macroflore livrée par ce gisement particulièrement riche ont été précédemment

mentionnées et/ou décrites par Marty in Piton et Théobald (1935), Privé-Gill (1987), Roiron (1991) et Legrand (2003).

De nouvelles récoltes de macroflore effectuées dans la diatomite de Murat nous amènent aujourd'hui à compléter l'inventaire précédent (Legrand, 2003).

### II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

Au cours de la période 2002-2009, nous avons poursuivi les récoltes de macroflore dans la carrière exploitée par la société CELITE, dans la continuité de notre précédent inventaire (Legrand, 2003). Par ailleurs, nous avons récolté des échantillons sur les tas de diatomite entreposés par la société CECA, qui exploite une carrière située sur le même gisement, mais à plusieurs centaines de mètres à l'Est-Sud-Est de la précédente.

(\*) 15 rue Federico Garcia Lorca, F-63370 Lempdes, France ; phlegrand.lempdes@laposte.net

Au cours de la période 2004-2009, le front de taille de la carrière exploitée par la société CELITE s'est déplacé vers l'Est-Sud-Est, en direction de la chapelle Sainte-Reine. A cette occasion, le niveau de base de la formation de diatomite, qui constituait le fond (plancher) de la carrière, a été mis en exploitation ; bien que déjà connu au moins par sondages, ce niveau n'avait jamais été exploité industriellement auparavant. Nous avons donc procédé à l'inventaire de la macroflore de ce niveau (exploité surtout au cours des premières années, puis stocké en tas dans la carrière) que nous nommerons dans la suite du texte « niveau de base à Synedra ». Ce niveau ne devrait d'ailleurs plus être exploité, car trop riche en argiles.

Dans cette partie exploitée du gisement, les couches de diatomites sont réparties de la façon suivante, de la base vers le sommet :

- niveau de base à Synedra : riche en argiles, contenant principalement des diatomées Synedra, quelques diatomées Cyclotella, et quelques autres espèces de diatomées, très riche en macroflore (notamment en feuilles d'*Alnus stenophylla* Saporta & Marion), et riche en insectes fossiles ;

- niveau à diatomées Synedra principalement, très fortement varvé, très pauvre en macroflore ;

- niveau à diatomées Melosira principalement, plus ou moins riche en macroflore ;

- niveau terminal à diatomées Cyclotella principalement, plus ou moins riche en macroflore, livrant aussi des insectes.

Ces niveaux à diatomées ne peuvent être appréciés de manière sûre qu'au microscope, le faciès de terrain pouvant être identique d'un niveau à l'autre. Ainsi, ces niveaux sont matérialisés par l'exploitant sur le terrain au fur et à mesure de l'exploitation. Il faut aussi noter que cette stratigraphie est celle de la carrière CELITE exploitée au cours de cette période, mais que cette stratigraphie n'est pas retrouvée sur l'ensemble du gisement de diatomite. Ainsi, le niveau à Cyclotella s'est rétréci au fur et à mesure de l'avancement de l'exploitation CELITE ; il disparaît totalement dans la carrière exploitée par CECA où ne subsiste principalement que le niveau à Synedra (A. Ferrand, société CELITE, comm. pers.) ; ceci est peut-être dû à un rabotage par les glaciers, l'ensemble du gisement de diatomite étant recouvert par une moraine de fond.

Dans cet article, nous mettrons l'accent sur deux points :

- la description de formes fossiles et d'espèces qui n'avaient pas été signalées jusqu'à présent, et qui ont été récoltées dans l'ensemble du gisement de diatomite de Murat ;

- l'inventaire de la macroflore du niveau de base à Synedra ; pour les autres niveaux, les formes fossiles de macroflore récoltées mais déjà connues ne seront pas traitées de nouveau, sauf précisions particulières apportées par les nouvelles récoltes.

Les méthodes relatives à l'étude des formes fossiles et à leur détermination sont identiques à celles utilisées pour l'inventaire initial (Legrand, 2003). Nous rappelons que :

- les espèces fossiles sont nommées telles que décrites dans la littérature, et les espèces actuelles sont suivies par convention du qualificatif *fossilis* lorsque la forme fossile rencontrée semble s'identifier à une espèce vivante actuelle ;

- la nomenclature botanique retenue pour les unités de rang supérieur au genre est celle préconisée par Judd *et al.* (2002).

### III. — NOUVELLES FORMES FOSSILES RÉCOLTÉES

Nous décrivons ci-dessous les nouvelles formes fossiles récoltées dans la diatomite de Murat, et apportons des précisions sur quelques formes précédemment décrites.

#### TRACHEOPHYTES A SPORES (PTERIDOPHYTES) Fougères leptosporangées POLYPODIACEAE s. l.

*Pteridium aquilinum* (Linné) Kuhn (= *Pteris aquilina* Linné)  
*fossilis*  
(Pl. I, fig. 1)

Un petit échantillon comportant deux penes de dernier ordre incomplètes a été récolté dans le niveau à Melosira. Les pinnules mesurent jusqu'à 1 cm de long, pour environ 3,5 mm de large à la base. Cet échantillon est rapporté à la fougère aigle actuelle.

Laurent et Marty (1927) avaient déjà signalé cette espèce dans le gisement de Cheylade (Cantal), qui est en partie contemporain de celui de Murat (Roiron, 1991).

#### SPERMATOPHYTES NON ANGIOSPERMES (« GYMNOSPERMES ») Conifères PINACEAE

*Piceoxylon* sp. et/ou *Pinuxylon* sp.

Une douzaine de bois fossilisés en lignite a été récoltée dans la diatomite de Murat ; ces bois ont fait l'objet d'une étude en lames minces par C. Privé-Gill (Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris). Ces bois sont en général de conservation très médiocre. Le spécimen PL-MUR11, et sans doute le spécimen PL-MUR13, appartiennent au genre *Piceoxylon* Gothan ou au genre *Pinuxylon* Gothan, bois fossiles de Pinaceae.

Le genre *Piceoxylon* désigne les bois fossiles voisins des actuels *Picea*, *Larix* et *Pseudotsuga*. Ce sont les deux premiers genres surtout qui sont délicats à distinguer par l'anatomie du bois ; le troisième est assez différent car muni d'épaississements spiralés sur les parois des trachéides. Le genre *Pinuxylon* est utilisé pour les bois fossiles rattachés aux seuls *Pinus* actuels. Les deux genres fossiles se distinguent par l'épaisseur des parois des cellules sécrétrices des canaux sécréteurs : parois épaisses chez *Piceoxylon*, minces chez *Pinuxylon*. Dans les bois de Murat, on peut voir des canaux sécréteurs horizontaux, mais les canaux verticaux sont assez obscurs, et il est impossible de décider si les parois des cellules sécrétrices sont épaisses ou minces. On ne peut non plus distinguer les détails nécessaires tels que les diverses ponctuations des trachéides, ni la présence et donc l'aspect des trachéides horizontales des rayons. Il est donc impossible

de trancher entre *Piceoxylon* et *Pinuxylon*, et d'aboutir à une détermination spécifique (Privé-Gill, comm. pers.).

Pour ce qui concerne des bois fossiles rapportés à ces deux genres :

— *Piceoxylon mosquense* (Kraus) Schönfeld, voisin de l'actuel *Picea abies* (Linné) Karsten, a été identifié dans le Miocène supérieur de La-Bastide-du-Fau (Cantal) et dans le Pliocène volcano-sédimentaire des Monts-Dore, vers La-Tour-d'Auvergne (Puy-de-Dôme) (Privé-Gill, 1987) ;

— *Pinuxylon parryoides* (Gothan) Kräusel emend. Van der Burgh, voisin de l'actuel *Pinus pinea* Linné, a été déterminé dans divers gisements du Miocène supérieur du Cantal (Privé-Gill, 1987).

*Abies sp.* et/ou *Cedrus sp.*

Des ailes de graine, dépourvues de leur graine et isolées, ont été rencontrées notamment dans le niveau de base à Synedra. Elles sont à rapprocher des genres *Abies* et *Cedrus* qui sont connus dans le gisement par d'autres macrorestes.

*Abies ramesi* Saporta  
(Pl. I, fig. 2)

Des aiguilles isolées d'*Abies ramesi* ont été précédemment signalées dans la diatomite de Murat (Roiron, 1991 ; Legrand, 2003).

Nous avons aussi récolté dans les déblais de la carrière un rameau feuillé, malheureusement de mauvaise conservation : rameau principal de 11 cm de long, comportant deux séries de rameaux opposés, le plus long atteignant une dizaine de centimètres (ramification verticillée dans un plan). Les aiguilles mesurent 17-19 mm de longueur, avec coussinet d'insertion sur le rameau bien visible.

*Cedrus sp.* et/ou *Picea sp.*

Des aiguilles isolées, courtes, aciculaires et à section quadrangulaire, sont rencontrées de manière dispersée dans la diatomite de Murat. Ces aiguilles sont à rapprocher des genres *Cedrus* et *Picea* qui sont connus dans le gisement par d'autres macrorestes.

*Pinus sp. 2*  
(Pl. I, fig. 7 et 8)

Nous avons précédemment décrit et figuré une graine de *Pinus sp.* (Legrand, 2003 ; planche V, figure 12) ; nous avons depuis récolté de nombreuses graines identiques en taille, dont de nombreuses graines microspermes, qui mesurent un total d'environ 1,5 cm de longueur de la pointe de la graine à l'extrémité de l'aile. Nous nommerons désormais ces graines « *Pinus sp. 1* ».

Par ailleurs, nous avons récolté trois graines microspermes du même genre botanique, mesurant au total 2,5-2,8 cm de longueur, avec une aile de 5-6 mm de large ; ces graines beaucoup plus grandes appartiennent très certainement à une espèce distincte, et nous les nommerons « *Pinus sp. 2* ». L'une de ces graines provient du niveau de base à Synedra, les deux autres des déblais de la carrière.

Par comparaison avec les espèces actuelles, on pourrait rapprocher les graines de *Pinus sp. 1* de *Pinus sylvestris* Linné, et les graines de *Pinus sp. 2* du groupe du *Pinus nigra* Arnold.

*Pinus sp.*  
(Pl. I, fig. 23)

Un cône femelle de mauvaise conservation, mesurant 3,5 cm de hauteur pour 2,5 cm de largeur a été récolté dans les déblais de la carrière.

*Pinus sp.*  
(Pl. I, fig. 11)

Un rameau feuillé, de mauvaise conservation, a été récolté dans le niveau de base à Synedra. Il correspond probablement à l'extrémité d'un rameau en cours d'élongation, et porte des aiguilles longues d'au moins 4,3 cm ; en raison du piètre état de conservation, il est impossible de préciser le nombre d'aiguilles par faisceau.

*Pinus sp.*  
(Pl. I, fig. 9 et 10)

Deux aiguilles isolées ont été récoltées dans le niveau de base à Synedra, l'une de 4,4 cm de long, l'autre de 5,5 cm.

*Pseudolarix schmidtgenii* Kräusel  
Synonyme : *Pseudolarix amabilis* (J. Nelson) Rehder *fossilis*  
(Pl. I, fig. 3, 4, 5 et 6)

Une douzaine de graines ailées à la forme typique et identique à l'espèce actuelle ont été récoltées principalement dans le niveau de base à Synedra, quelques-unes se trouvant dans les déblais de la carrière. Longueur totale (de la pointe de la graine à l'extrémité de l'aile) 2,7-2,8 cm ; largeur de l'aile 7-8 mm, la loge de la graine faisant environ 5x3,5 mm.

Florschütz (1925) a été le premier à reconnaître des macrorestes fossiles pliocènes de ce genre en Europe, qu'il a rapportés à la seule espèce actuelle qui vit en Chine : *Pseudolarix amabilis* (J. Nelson) Rehder (anciennement *P. kaempferi* [Ldl.] Gordon). Ensuite, Hickel (1932) a décrit des écailles de cône et une graine ailée dans le Pliocène d'Alsace (France), qu'il a aussi rapprochées de l'espèce actuelle. Enfin, Kräusel (1938) a décrit des graines ailées miocènes comme holotype de *Pseudolarix schmidtgenii*, d'une morphologie tout à fait identique à l'espèce actuelle.

A la suite, plusieurs auteurs ont signalé d'autres macrorestes (graines ailées et écailles de cônes) dans le Mio-Pliocène d'Europe, qui ne diffèrent pas morphologiquement de l'espèce actuelle. Ces macrorestes ont été rapportés à l'espèce fossile de Kräusel et/ou à l'espèce actuelle ; on peut citer notamment : Mädler (1939), Martinetto (2001 ; avec, géologiquement parlant, les derniers macrorestes fossiles datés du Pliocène terminal au Pléistocène inférieur, avant la disparition de ce genre botanique d'Europe), Kunzmann et Mai (2005), Kvacek et Teodoridis (2007).

La distribution des fossiles de *Pseudolarix* dans l'hémisphère Nord au cours des temps géologiques a été compilée par Manchester *et al.* (2009) et surtout par LePage

et Basinger (1995). Ces derniers indiquent que, parmi tous les fossiles du genre en Amérique du Nord et Eurasie (et qui ont reçu divers noms selon leur provenance géographique ou géologique), seules deux espèces peuvent être distinguées sur la morphologie de la bractée de l'écaille du cône : une espèce secondaire représentant une lignée éteinte d'ampleur limitée *P. wehrlii* Gooch, et une espèce principale très stable morphologiquement tout au long de son évolution et tout à fait similaire à l'espèce actuelle *P. amabilis* ; ils déclarent ainsi que rien ne justifie de distinguer ces restes fossiles comme une espèce différente de l'espèce actuelle.

Les pollens de *Pseudolarix* peuvent être confondus avec ceux du genre *Pinus* (Ferguson, 1967), et nous ne retiendrons donc comme mention en France que celle de Zanni et Ravazzi (2007), basée sur de nouvelles investigations permettant de les différencier ; ces auteurs établissent ainsi la présence de pollens de *Pseudolarix* dans des sédiments lacustres âgés d'environ 3 Ma à La Gratade (massif des Monts Dore, Massif Central).

En dehors des pollens, le genre *Pseudolarix* n'a, à notre connaissance, été signalé en France que dans le Pliocène d'Alsace, sous la forme d'écailles de cônes et de graines ailées (Hickel, 1932 ; Geissert, 2005) ; les graines récoltées à Murat sont donc les plus anciens macrorestes connus en France.

*Tsuga europaea* Menzel

(Pl. I, fig. 12 et 13)

Un rameau feuillé, comportant trois ramifications apparemment non verticillées, et un cône en position terminale d'un rameau, a été récolté dans le niveau à Melosira. Seul le cône est bien conservé, une grande partie de la matière organique des axes et feuilles ayant malheureusement disparu de l'empreinte et de la contre-empreinte. Les aiguilles sont aplaties avec nervure centrale bien marquée, de 11-18 mm de long sur 2-2,5 mm de large, à extrémité apparemment arrondie sur les empreintes ; leur insertion sur le rameau est très peu visible mais semble se faire par un court pédicelle. Le cône femelle mesure 2,4 cm de long sur 1,2 cm de large ; il est inséré à l'extrémité d'un rameau court d'environ 12 mm ; les écailles du cône sont arrondies et les bractées non visibles. Ce fossile (détermination L. Kunzmann) est rapporté à *Tsuga europaea* Menzel.

Les espèces actuelles du genre *Tsuga* habitent l'Amérique du Nord et l'Asie (Debazac, 1964 ; Gaussen, 1966), mais ce genre est connu en Europe depuis le Crétacé supérieur jusqu'au Pléistocène (Ferguson, 1967). En dehors des pollens, différentes formes fossiles de *Tsuga* ont été décrites en Europe, notamment *Tsuga europaea* Menzel qui est un cône du Mio-Pliocène (Gaussen, 1966, 1967 ; Kunzmann et Mai, 2005) ; des feuilles ont aussi été rattachées à cette espèce (Mädler, 1939).

Le cône récolté dans la diatomite de Murat est d'une taille assez proche de celle de l'holotype et d'autres spécimens rapportés à cette espèce (Kunzmann et Mai, 2005), bien qu'il s'agisse très probablement d'un cône immature puisqu'attaché à son rameau, les cônes de *Tsuga* étant caducs à maturité (Kunzmann, comm. pers.).

A noter que des pollens de *Tsuga* avaient déjà été signalés dans la diatomite de Murat (Durand et Rey, 1964).

**ANGIOSPERMES**

Graines indéterminées

(Pl. I, fig. 14)

Des graines isolées ou en amas, de forme arrondie ou légèrement ovale, et de 1 à 1,5 mm de diamètre sont très nombreuses dans le niveau de base à Synedra. Il est possible que la forme fossile que nous avons précédemment rapportée avec doute à une inflorescence de *Vitis sp. ?* (Legrand, 2003 ; planche X, figure 7) soit en fait à rapprocher de ces graines indéterminées ; dans les deux cas, la fossilisation ne permet pas une détermination plus précise.

**Monocotylées**

ALISMATALES

**POTAMOGETONACEAE**

*Potamogeton crispus* Linné fossilis

(Pl. I, fig. 18 et Pl. II, fig. 3)

Nous avons précédemment décrit une feuille entière ovale oblongue rapportée au genre *Potamogeton* (Legrand, 2003, p. 30 et pl. V fig. 14). Nous avons trouvé d'autres spécimens fossiles différents que nous rapportons à l'actuel *Potamogeton crispus* L., à feuilles toutes submergées, largement répandu sur le globe (Coste, 1937). Ces tiges feuillées ont été récoltées dans le niveau de base à Synedra, et sont souvent de mauvaise conservation.

Tiges rameuses comprimées larges de 1 à 2 mm. Feuilles sessiles, longueur 3-4,5 cm, largeur 7-8 mm ; nervures parallèles longitudinales : une nervure principale centrale souvent bien marquée, et deux nervures de chaque côté de la nervure principale ; entre ces nervures parallèles, présence de nervures secondaires formant des échelons obliques entre les nervures parallèles, bien visibles sur l'un des spécimens récoltés.

Teodoridis (2007) a passé en revue un certain nombre de formes fossiles de *Potamogeton*, qui sont d'une manière générale assez rares dans le Tertiaire. Laurent et Marty (1923) avaient par ailleurs souligné qu'il est délicat d'aboutir à une spécification des feuilles fossiles de *Potamogeton*.

**« Complexe des magnoliidées »**

LAURALES

**LAURACEAE**

*Sassafras ferretianum* Massalongo

(Pl. II, fig. 1)

Nous avons précédemment figuré une feuille entière provenant de la diatomite de Murat (Legrand, 2003 ; planche IX, figure 11).

Nous avons depuis trouvé deux feuilles trilobées et tout à fait caractéristiques de l'espèce, l'une dans le niveau à Cyclotella, l'autre dans les déblais de la carrière.

**Tricolpées (dicotylées vraies)**

PROTEALES et autres « Tricolpées primitives »  
*PLATANACEAE*

*Platanus aceroides* Goeppert  
(Pl. I, fig. 19)

Une feuille incomplète (la base manque) récoltée dans le niveau de base à Synedra ; les 3 lobes supérieurs sont conservés, au moins en partie. Nervation principale visible, des nervures latérales aboutissant au niveau de grosses dents peu nombreuses et peu prononcées du bord du limbe. En l'absence d'éléments particulièrement discriminants, mais en raison de la présence de grosses dents sur le bord du limbe du lobe terminal (le seul bien conservé), nous préférons attribuer cette feuille de Murat aux platanes avec doute plutôt qu'aux érables (genre *Acer*).

*Platanus aceroides* est une forme fossile polymorphe qui regroupe les caractères de divers platanes actuels (Laurent, 1908 ; Depape, 1922) et signalée par Laurent (1908) dans le gisement de Niac (Cantal), daté du Tortonien et donc à peine plus ancien que Murat (Roiron, 1991). Pour les espèces actuelles, il faut d'ailleurs remarquer l'extraordinaire polymorphie foliaire, ainsi que la présence d'hybrides, ce qui entraîne des difficultés importantes voire l'impossibilité d'une détermination spécifique sur les seuls caractères foliaires (Jovet et Kerguelen, 1990).

**SAXIFRAGALES**  
*HALORAGIDACEAE*

*Myriophyllum* sp.  
(Pl. II, fig. 9 et 10)

Tiges feuillées immergées récoltées dans le niveau de base à Synedra, avec des feuilles atteignant au moins 2,5 cm de longueur.

Forme fossile proche des différentes espèces actuelles du genre *Myriophyllum*, déjà signalé dans la diatomite de Murat par Marty (in Piton et Théobald, 1935), mais que nous n'avons pas retrouvé précédemment.

**SANTALALES**  
*VISCACEAE*

*Viscophyllum pliocaenicum* (Engelhardt) Mädler  
(Pl. I, fig. 17 et 22)

Feuilles entières linéaires-rubanées, de 2,6-6 cm de long et 6-8 mm de large, à sommet arrondi et base tronquée, comportant 3-5 nervures principales plus ou moins parallèles bien visibles, avec nervures secondaires peu visibles.

Mädler (1939), après étude des cuticules, a attribué aux Viscaceae, sous le nom *Viscophyllum pliocaenicum*, des feuilles de 1,4-4,6 cm de long et 1,5-4 mm de large, précédemment rapportées au genre *Potamogeton* (Potamogetonaceae). En France, cette espèce a été identifiée dans le Pliocène d'Alsace, sous la forme de feuilles de 2,1-3,5 cm de long et 5-8 mm de large (Kvacek *et al.*, 2008). Bien que les feuilles de Murat soient d'une dimension supérieure à celles précédemment décrites, et en l'absence d'une étude des

cuticules permettant de confirmer cette attribution, nous les rapportons à l'espèce fossile *Viscophyllum pliocaenicum*.

**MALPIGHIALES**  
*SALICACEAE*

*Populus nigra* Linné *fossilis*  
(Pl. I, fig. 21)

Deux chatons lâches associés à une grande feuille repliée en deux (hauteur du limbe supérieure à 12 cm ; demi-largeur de 5 cm) ont été récoltés dans le niveau de base à Synedra. Ces chatons mesurent environ 2,5 cm de longueur, plus un pédoncule d'au moins 1 cm.

**FABALES**  
*FABACEAE* (= *LEGUMINOSAE*)

Fabaceae : fruit  
(Pl. I, fig. 20)

Une gousse de Légumineuse a été récoltée dans le niveau à Cyclotella. Elle mesure 7 mm de largeur pour 8 cm de longueur (une petite partie d'une extrémité manque) ; elle contient 5 ou 6 graines visibles par transparence, ovales, d'une dimension de 5-7x2-4 mm (étant donné la fossilisation, il est difficile de dire si la plus grosse graine est unique ou si deux graines sont superposées).

Pour mémoire, des feuilles de *Cercis* sp. aff. *Cercis siliquastrum* Linné *fossilis* étaient les seuls restes de Légumineuses signalés jusqu'à présent dans la diatomite de Murat (Legrand, 2003).

**ROSALES**  
*ROSACEAE*

cf. *Photinia* sp.  
(Pl. II, fig. 4)

Une feuille récoltée dans le niveau de base à Synedra présente un pétiole de 1,7 cm de long, et un limbe de 5,5 cm de hauteur, 2,1 cm de largeur, en coin à la base, acuminé au sommet, bordé de petites dents dirigées vers le haut, surtout dans la moitié supérieure du limbe.

Nous rapportons cette feuille au genre *Photinia* avec réserves, genre déjà signalé par Roiron (1991) dans la diatomite de Murat. Il faut en effet noter que les feuilles des Rosacées présentent à la fois des caractères communs aux différents genres et une grande variabilité dans le genre ; ceci rend difficile la comparaison et l'attribution des feuilles fossiles à un genre vivant ou à une forme fossile déjà décrite (Laurent, 1904-1905).

*Prunus pereger* Unger  
(Pl. II, fig. 2)

Une feuille au pétiole incomplet, avec un limbe de 8,3 cm de haut pour 5 cm environ de large, récoltée dans le niveau de base à Synedra, est conforme au spécimen figuré et décrit par Laurent (1904-1905), provenant des cinérites du Pas-de-la-Mougudo (Cantal), gisement en partie contemporain de celui de Murat (Roiron, 1991).



Cette forme fossile est proche de différentes espèces actuelles de *Prunus* d'Amérique, d'Europe et d'Asie ; la feuille est plus particulièrement proche de celle de l'actuel merisier *Prunus avium* L., mais ne possède pas les deux glandes situées sur le pétiole à la base du limbe (Laurent, 1904-1905).

FAGALES  
BETULACEAE

*Alnus* sp.  
(Pl. I, fig. 15)

Chatons mâles récoltés dans le niveau de base à Synedra, d'une longueur de 1,7-2,5 cm, pour une largeur de 4-5 mm.

*Betula* sp.  
(Pl. I, fig. 16)

Graines ailées de petite taille (environ 4 ou 5 mm de diamètre, aile comprise), récoltées dans le niveau de base à Synedra.

SAPINDALES  
SAPINDACEAE (y compris ACERACEAE)

*Acer pseudoplatanus* Linné *fossilis*  
(Pl. II, fig. 6 et 7)

Une dizaine de feuilles typiques à cinq lobes dentés, proches de l'érable sycomore actuel, récoltées dans le niveau de base à Synedra ; hauteur du limbe 8-12 cm, largeur 10,5-15 cm ; pétiole pouvant atteindre une longueur supérieure ou égale à 8 cm.

*Acer tricuspidatum* Bronn = *Acer trilobatum* Al. Braun  
(Pl. II, fig. 5)

Une feuille incomplète (la base manque) a été récoltée dans le niveau de base à Synedra. Elle est constituée de 3 lobes séparés par des sinus aigus. Malgré la base manquante, nous rapprochons cette feuille de l'*Acer tricuspidatum*, déjà signalé à Murat par Roiron (1991). Comme indiqué par Brice (1965), le bord du limbe est finement denté (petites dents inégales, aiguës, dirigées vers l'avant sur notre spécimen). Cette espèce est aussi donnée comme polymorphe (Brice, 1965 ; Roiron, 1991).

CORNALES  
CORNACEAE

*Cornus sanguinea* Linné *fossilis*  
(Pl. II, fig. 8)

Une feuille incomplète (le haut manque) mais suffisamment typique a été récoltée dans le niveau de base à Synedra ; sa demi-largeur est de 2 cm, et la longueur du limbe est estimée à 7 cm ; 4 paires de nervures secondaires sont visibles : les trois premières s'insèrent sur la nervure médiane dans la moitié inférieure du limbe, et la dernière paire, très écartée des précédentes, s'insère dans la moitié supérieure.

Cette feuille est rapportée au cornouiller sanguin actuel. Chez le cornouiller mâle (*Cornus mas* Linné), toutes les

nervures secondaires sont situées dans la partie inférieure de la feuille, avec un espacement régulier entre paires, et manquent totalement dans la moitié supérieure (Laurent, 1908). L'espèce fossile *Cornus distans* N. Boulay possède un nombre de nervures secondaires plus important (Grangeon, 1956).

AQUIFOLIALES  
AQUIFOLIACEAE

*Ilex geissertii* Kvacek, Teodoridis & Wang

Roiron (1991) avait rapproché des feuilles de houx de la diatomite de Murat de l'actuelle espèce chinoise *Ilex cornuta* Lindl. & Paxt., tandis que d'autres feuilles semblaient se rapprocher aussi de l'actuelle espèce européenne *Ilex aquifolium* L. (Legrand, 2003).

Par ailleurs, la forme fossile *Ilex boulei* Saporta avait été décrite par Laurent (1904-1905, 1908), dans le Mio-Pliocène du Cantal, comme une variété d'*I. aquifolium* portant un champignon parasite observé sur des *Ilex* chinois. Legrand (2003) avait donc suggéré d'utiliser la dénomination *Ilex boulei* pour les houx fossiles mio-pliocènes voisins d'*I. aquifolium* mais pouvant aussi recouvrir d'autres espèces euro-asiatiques.

Tout récemment, Kvacek *et al.* (2009) ont décrit une nouvelle forme fossile, *Ilex geissertii*, à partir de matériel fossile mio-pliocène précédemment attribué à *I. cornuta* et à *I. aquifolium*. Ils ont de plus figuré et rattaché à cette espèce des feuilles provenant de la diatomite de Murat.

Nous substituons donc cette nouvelle espèce *Ilex geissertii* aux anciennes dénominations (*Ilex boulei* et *Ilex* sp. aff. *I. cornuta*).

APIALES  
APIACEAE (= UMBELLIFERAE ; y compris ARALIACEAE)

*Hedera helix* Linné *fossilis*

Nous avons signalé précédemment dans la diatomite de Murat la présence d'une feuille de lierre, entière, à la morphologie des feuilles de rameau florifère de lumière (Legrand, 2003). Nous avons retrouvé plusieurs feuilles identiques dans le gisement de diatomite, ainsi que deux feuilles arrondies et une feuille triangulaire, toutes présentant des amorces de lobes, dans le niveau de base à Synedra.

IV. — MISE À JOUR DE L'INVENTAIRE DE LA  
MACROFLORE

Dans le tableau I, nous donnons :

- d'une part, l'inventaire des formes fossiles rencontrées dans le niveau de base à Synedra, avec le nombre d'échantillons récoltés pour chaque forme fossile ; ce nombre est uniquement indicatif ; en effet, de nombreux fragments plus ou moins identifiables n'ont pas été récoltés lorsqu'il s'agissait de formes fossiles déjà connues ;

- d'autre part, la liste complète des formes fossiles rencontrées jusqu'à présent dans le gisement de diatomite de Murat, avec la référence bibliographique des mentions (citation seule des espèces ou citation avec illustration).

Si l'on compare l'inventaire du niveau de base à Synedra avec l'inventaire précédent (Legrand, 2003), on constate que certains taxons sont absents du niveau de base, d'autres du niveau supérieur. Il est difficile de dire s'il s'agit d'une véritable absence ou d'un manque de fossilisation, les récoltes effectuées (et soumises à l'avancement d'une carrière en exploitation) ayant montré que la présence de végétaux n'est pas homogène au sein d'un même niveau. Par ailleurs, en paléontologie « l'absence de preuve ne vaut pas preuve d'absence », et il apparaît par conséquent hasardeux, avec les données actuelles, de rechercher une évolution de la macroflore pendant la durée de formation du gisement (estimée à 50000 ans par Fournier, 1965) et liée par exemple à des modifications environnementales. En effet, une telle discussion devrait impérativement prendre en compte la paléopalynologie. Or les données palynologiques restent très fragmentaires sur le gisement de Murat (bibliographie in Legrand, 2003), et aucune étude niveau par niveau n'y a été menée ; ces données seront de plus maintenant très difficiles à établir en raison de l'avancement de l'exploitation du gisement et de la disparition de certains niveaux.

## V. — CONCLUSIONS

Le « niveau de base à Synedra » qui constitue la base du gisement de diatomite apparaît très riche à la fois en nombre de fossiles qu'il renferme et en nombre d'espèces, puisqu'il a livré 67 formes fossiles différentes, représentant un total de 52 espèces : 6 Gymnospermes, 2 Angiospermes Monocotylédones et 44 Angiospermes Dicotylédones.

La description d'une vingtaine de nouvelles formes fossiles récoltées dans l'ensemble du gisement de diatomite de Murat nous permet d'ajouter 10 nouvelles espèces à la flore du gisement : 1 Ptéridophyte, 3 Gymnospermes, 1 Angiosperme Monocotylédone et 5 Angiospermes Dicotylédones. Parmi celles-ci, les graines de *Pseudolarix*

*schmidtgenii* Kräusel, espèce fossile similaire à l'actuel *Pseudolarix amabilis* (J. Nelson) Rehder de Chine, apparaissent comme un élément remarquable.

L'inventaire de la macroflore fossile de la diatomite de Murat est donc maintenant au total de 83 espèces : 3 Ptéridophytes, 11 Gymnospermes (dont 1 bois fossile), 4 Angiospermes Monocotylédones (en comptabilisant deux espèces fossiles de *Bambusa*) et 65 Angiospermes Dicotylédones (dont 1 bois fossile, et en comptabilisant deux espèces de *Carpinus*, l'espèce de forme *C. suborientalis* Saporta recouvrant les deux espèces *C. orientalis* Miller *fossilis* et *C. betulus* Linné *fossilis*). Avec l'abondance des spécimens récoltés, ceci en fait sans nul doute l'un des plus riches gisements en végétaux fossiles miocènes du Massif Central.

**Remerciements.** — Nous remercions tout particulièrement Mme Catherine Privé-Gill (Paléobiodiversité et Paléoenvironnements, Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris) pour l'étude des bois fossiles, M. Lutz Kunzmann (Senckenberg Naturhistorische Sammlungen Dresden, Museum für Mineralogie und Geologie, Dresden, Allemagne) et M. Aljos Farjon (Royal Botanic Gardens, Kew, Royaume-Uni) pour les échanges d'informations sur les conifères fossiles et les déterminations de *Pseudolarix* et *Tsuga*, ainsi que M. James F. Basinger (University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada) et M. David K. Ferguson (Institut für Paläontologie, Université de Vienne, Autriche) pour leur aide bibliographique. Nous remercions enfin Melle Denise Brice (Société géologique du Nord) et M. Paul Roiron (Institut de Botanique, Université de Montpellier) pour la relecture et l'amélioration du manuscrit.

Nous remercions vivement les sociétés CELITE et CECA qui nous ont accordé les autorisations de prospection et de récolte sur le gisement en exploitation et plus particulièrement M. Yves Aufauvre et M. Pierre Bila, directeurs successifs de CELITE, M. Alain Ferrand, responsable de l'exploitation CELITE, qui nous a toujours accueilli très cordialement et fait partager sa connaissance du gisement, et M. Henri David, directeur de CECA.

Nous remercions aussi Mme Nathalie Peynon-Legrand pour son aide lors des récoltes.

Formes fossiles récoltées	Diatomite de Murat Références bibliographiques	Niveau de base à Synedra Nombre de fossiles récoltés
<b>Ptéridophytes</b>		
<i>Asplenium viride</i> Huds. <i>fossilis</i> (penne avec pinnules)	4	
<i>Equisetum</i> sp. aff. <i>E. fluviatile</i> L. <i>fossilis</i> (tige)	4	
<i>Pteridium aquilinum</i> (L.) Kuhn <i>fossilis</i> (penne avec pinnules)	5	
<b>Gymnospermes</b>		
<i>Abies</i> sp. ? ou <i>Cedrus</i> sp. ? (base de cône)	4	
<i>Abies</i> sp. et/ou <i>Cedrus</i> sp. (aile de graine)	5	8
<i>Abies ramesi</i> Saporta (graine, aile de graine)	3	
<i>Abies ramesi</i> Saporta (aiguille isolée)	3, 4	
<i>Abies ramesi</i> Saporta (rameau feuillé)	5	
<i>Cedrus</i> sp. et/ou <i>Picea</i> sp. (aiguilles)	4, 5	+
<i>Cedroxylon</i> sp. Kraus (bois)	2	
<i>Cedrus miocenica</i> Lauby (graine ailée)	4	1
<i>Cedrus miocenica</i> Lauby (écaille de cône femelle)	4	
<i>Cedrus miocenica</i> Lauby (chaton mâle)	4	2
<i>Cedrus miocenica</i> Lauby (rameau défeuillé)	4	
<i>Glyptostrobus europaeus</i> (Brongniart) Heer (rameau feuillé)	3	
<i>Juniperus</i> sp. section <i>sabina</i> (rameau)	4	4
<i>Picea</i> sp. (graine ailée)	3, 4	15
<i>Picea</i> sp. (cône femelle)	3, 4	1
<i>Picea</i> sp. (aiguille)	3	
<i>Piceoxylon</i> sp. et/ou <i>Pinuxylon</i> sp. (bois)	5	
<i>Pinus</i> sp. 1 aff. <i>P. sylvestris</i> L. <i>fossilis</i> (graine ailée)	3, 4, 5	23
<i>Pinus</i> sp. 2 aff. <i>P. nigra</i> Arn. <i>fossilis</i> (graine ailée)	5	1
<i>Pinus</i> sp. (cône femelle)	5	
<i>Pinus</i> sp. (rameau feuillé)	5	1
<i>Pinus</i> sp. (aiguille isolée)	5	2
<i>Pseudolarix schmidtgenii</i> Kräusel (= <i>P. amabilis</i> [J. Nelson] Redher <i>fossilis</i> ) (graine ailée)	5	9

Formes fossiles récoltées	Diatomite de Murat Références bibliographiques	Niveau de base à Synedra Nombre de fossiles récoltés
<i>Sequoia langsdorfii</i> (Brongniart) Heer (rameau feuillé)	3	
<i>Tsuga europaea</i> Menzel (rameau feuillé avec cône femelle)	5	
<b>Angiospermes</b>		
Graines indéterminées, isolées ou en amas	5	15
<b>Angiospermes Monocotylédones</b>		
Monocotylédones (feuilles)	3, 4	nb
<i>Bambusa</i> sp. (feuille)	3	
<i>Bambusa lugdunensis</i> Saporta & Marion (feuille)	4	7
<i>Potamogeton</i> sp. (feuille ovale-oblongue)	4	
<i>Potamogeton crispus</i> L. <i>fossilis</i> (tige feuillée submergée)	5	5
<b>Angiospermes Dicotylédones</b>		
<i>Acer</i> sp. (samare)	3, 4	3
<i>Acer decipiens</i> Al. Braun (feuille)	4	3
<i>Acer laetum pliocenicum</i> Saporta & Marion = <i>Acer integerrimum</i> (Viv.) Mass. (feuille)	1, 3, 4	15
<i>Acer opalus</i> Mill. (= <i>Acer opulifolium</i> Vill.) <i>fossilis</i> (feuille)	3	
<i>Acer palmatum</i> Thunberg <i>fossilis</i> = <i>Acer sanctae-crucis</i> Stur (feuille)	3, 4	5
<i>Acer platanoides</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4	
<i>Acer pseudocampestre</i> Unger = <i>Acer campestre</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4	
<i>Acer pseudoplatanus</i> L. <i>fossilis</i>	5	10
<i>Acer tricuspidatum</i> Bronn (= <i>Acer trilobatum</i> Al. Br.) (feuille)	3, 5	1
<i>Alnus</i> sp. (strobile femelle)	3, 4	13
<i>Alnus</i> sp. (chaton mâle)	5	4
<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertner <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4	
<i>Alnus kefersteinii</i> Unger (feuille)	3, 4	2+1?
<i>Alnus stenophylla</i> Saporta & Marion = <i>Alnus hoernesii</i> Stur (feuille)	1, 3, 4	nb
<i>Alnus viridis</i> D.C. <i>fossilis</i> (feuille)	3	
<i>Berberis</i> sp. cf. <i>B. regaliana</i> Koehne <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4	2
<i>Betula</i> sp. (écaille de chaton femelle)	3	
<i>Betula</i> sp. (graine ailée)	5	8
<i>Betula macrophylla</i> (Goepfert) Heer (feuille)	3, 4	8
<i>Betula subpubescens</i> Goepfert (feuille)	4	7
<i>Buettneria tiliaefolia</i> (Al. Braun) Depape (feuille)	4	
<i>Carpinus betulus</i> L. <i>fossilis</i> (fruit avec involucre)	3, 4	1
<i>Carpinus orientalis</i> Mill. <i>fossilis</i> (fruit avec involucre)	3, 4	3
<i>Carpinus suborientalis</i> Saporta (feuille)	3, 4	7
<i>Carya minor</i> Saporta & Marion (feuille ; foliole)	3, 4	1
<i>Cedrela</i> sp. (graine)	4	
<i>Cedrela</i> sp. (feuille)	3	
<i>Celtis australis</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4	2
<i>Ceratophyllum demersum</i> L. <i>fossilis</i> (tige feuillée)	3, 4	1
<i>Cercis</i> aff. <i>Cercis siliquastrum</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	4	1
<i>Cornus sanguinea</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	5	1
<i>Corylus avellana</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	4	8
<i>Crataegus</i> sp. série Crus-Galli et Punctata (feuille)	4	1
<i>Crataegus</i> sp. cf. <i>C. douglasii</i> Lindl. <i>fossilis</i> (feuille)	3	1 ?
<i>Dombeyopsis lobata</i> Unger (feuille)	3, 4	
Fabaceae (fruit : gousse de Légumineuse)	5	
<i>Fagus pliocenica</i> Saporta (feuille)	4	
<i>Fraxinus</i> sp. (feuille)	4	
<i>Hedera helix</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4, 5	8
<i>Ilex geissertii</i> Kvacek, Teodoridis & Wang (feuille ; rameau avec feuilles et fruits)	3, 4, 5	2
<i>Juglans regia</i> L. <i>fossilis</i> (foliole)	1, 3, 4	13
<i>Laurus azorica</i> (Seub.) J. Franco <i>fossilis</i> (feuille)	4	2+2 ?
<i>Myrica</i> sp. (feuille)	4	1
<i>Myriophyllum</i> sp. (tiges feuillées)	1, 5	10
<i>Persea indica</i> Spr. <i>fossilis</i> (feuille)	4	1 ?
<i>Phellodendron</i> sp. cf. <i>P. amurense</i> Rupr. <i>fossilis</i> (feuille)	3	
Cf. <i>Photinia</i> sp. (feuille)	3, 5	1
<i>Platanus aceroides</i> Goepfert (feuille)	5	1
<i>Populus alba</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	4	
<i>Populus x canescens</i> (Ait.) Sm. <i>fossilis</i> (feuille)	4	1
<i>Populus nigra</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	4, 5	1
<i>Populus nigra</i> L. <i>fossilis</i> (chaton)	5	2
<i>Populus tremula</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4	7
<i>Prunus acuminata</i> Al. Br. (feuille)	3	
<i>Prunus microdonta</i> N. Boulay (feuille)	4	3+2 ?
<i>Prunus pereger</i> Unger (feuille)	5	1
<i>Pterocarya denticulata</i> Heer (foliole)	4	
<i>Quercocoxylon böckhianum</i> (Felix) Müller-Stoll & Mädler (bois)	2	
<i>Quercus hispanica</i> Rérolle (feuille)	1, 3, 4	2
<i>Quercus kubinyi</i> (Kov.) Berger (= <i>Castanea kubinyi</i> Kov.) (feuille)	3	
<i>Quercus</i> sp. cf. <i>Quercus macranthera</i> Fisch. & Mey. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4	
<i>Rosa</i> sp. cf. <i>Rosa californica</i> Cham. & Schlecht. <i>fossilis</i> (foliole)	3, 4	
<i>Salix</i> sp. à feuilles étroites (feuille)	4	1
<i>Sapindus falcifolius</i> Al. Braun (foliole)	4	1
<i>Sassafras ferretianum</i> Massalongo (feuille entière, feuille trilobée)	4, 5	

Formes fossiles récoltées	Diatomite de Murat Références bibliographiques	Niveau de base à Synedra Nombre de fossiles récoltés
<i>Sorbus aria</i> (L.) Crantz <i>fossilis</i> (feuille)	4	3
<i>Tilia</i> sp. (bractée florale)	3, 4	
<i>Tilia tomentosa</i> Moench. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4	
<i>Ulmus</i> sp. (samare)	3, 4	1
<i>Ulmus braunii</i> Heer (feuille)	1, 3, 4	10
<i>Ulmus</i> sp. cf. <i>Ulmus fulva</i> Michx. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4	2
<i>Viscophyllum pliocenicum</i> (Engelh.) Mädlér	5	2
<i>Vitis</i> sp. ? (inflorescence)	4	
<i>Vitis praevinifera</i> Sap. (feuille)	4	
<i>Vitis vivariensis</i> N. Boulay aff. <i>Vitis vinifera</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	4	1
<i>Zelkova ungeri</i> Kovats aff. <i>Z. carpinifolia</i> (Pall.) K. Koch <i>fossilis</i> (feuille)	1, 3, 4	1
<i>Zelkova ungeri</i> Kovats aff. <i>Z. serrata</i> (Thunb.) Mak. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4	1

Tabl. I. — Inventaire de la macroflore de la diatomite de Murat

Première colonne : inventaire des formes fossiles rencontrées dans le gisement ; Deuxième colonne : références bibliographiques des espèces citées 1= Marty in Piton et Théobald, 1935 ; 2= Privé-Gill, 1987 ; 3= Roiron, 1991 ; 4= Legrand, 2003 ; 5= Legrand, cet article ; Troisième colonne : inventaire des formes fossiles du niveau de base à Synedra, avec le nombre de spécimens récoltés ; + = présence ; nb = nombreux échantillons

Table I. — Inventory of the fossil flora from the diatom beds at Murat

First column : inventory of the fossil forms in this site ; Second column : bibliographical references of the cited species : 1= Marty in Piton et Théobald, 1935 ; 2= Privé-Gill, 1987 ; 3= Roiron, 1991 ; 4= Legrand, 2003 ; 5= Legrand, (this paper) ; Third column : inventory of the fossil forms collected in the Synedra diatom bed located at the basis of the geological level, with the number of specimens collected (+ = present ; nb = a lot of specimens)

## BIBLIOGRAPHIE

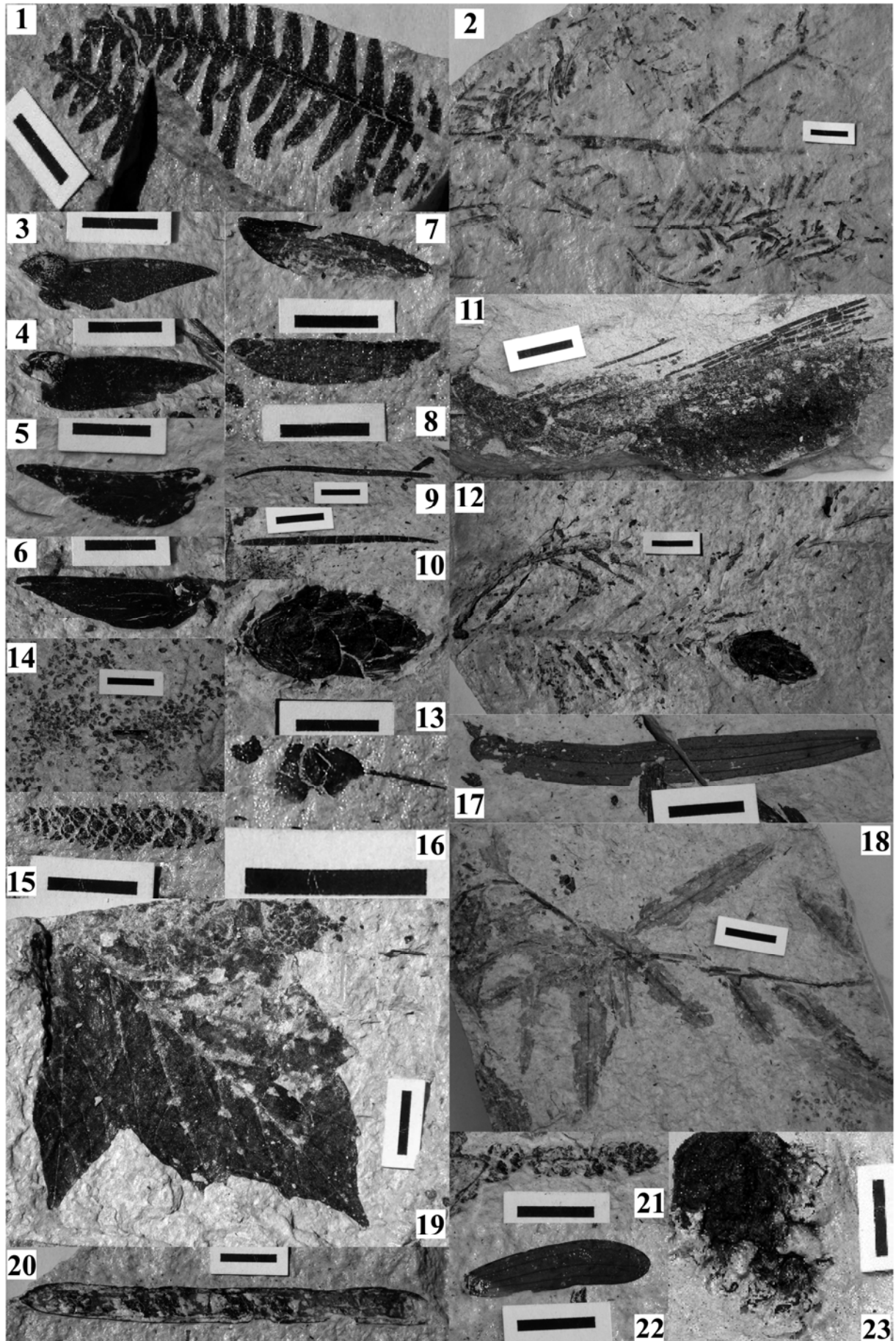
- BRICE D. (1965). — Recherches sur la flore mio-pliocène de la montagne d'Andance (Coiron, Ardèche). *Annales de la Société géologique du Nord*, **LXXXV** : 189-239, pl. XVII-XX.
- COSTE H. (1937). — Flore descriptive et illustrée de la France, de la Corse et des contrées limitrophes. *Librairie scientifique et technique Albert Blanchard*, Paris, 3 vol., 416 + 627 + 807 p.
- DEBAZAC E.-F. (1964). — Manuel des conifères. *ENGREF*, Nancy, 172 p. (2<sup>ème</sup> éd. 1991).
- DEPAPE G. (1922). — Recherches sur la flore pliocène de la vallée du Rhône. Flores de Saint-Marcel (Ardèche) et des environs de Thézières (Gard). *Annales des Sciences naturelles (Botanique)*, 10<sup>ème</sup> sér., **IV** : 73-265, 15 pl.
- DURAND S. et REY R. (1964). — Le dépôt de la diatomite de Sainte-Reine (Cantal) débute au Pliocène supérieur et permet de déceler les traces du refroidissement prétiligien. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, **259** : 1978-1980.
- FERGUSON D. K. (1967). — On the phytogeography of Coniferales in the European Cenozoic. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **3** : 73-110.
- FLORSCHÜTZ F. (1925). — On *Pseudolarix kaempferi* Gord. from the clay of Reuver. *Recueil des Travaux botaniques néerlandais*, **22** (3/4) : 269-273.
- FOURNIER F. (1965). — Étude de quelques gisements diatomifères d'Auvergne. *Diplôme d'Études supérieures*, Orsay, 80 p.
- GRANGEON P. (1956). — Contribution à l'étude de la paléontologie végétale du massif du Coiron (Sud-Est du Massif Central Français). *Thèse*, Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand, 302 p., VII pl. (impr. G. de Bussac, 1958), et *Mémoires de la Société d'Histoire Naturelle d'Auvergne*, n° 6.
- GAUSSEN H. (1966). — Les Gymnospermes actuelles et fossiles. Fascicule VIII : chap. XI, genre *Tsuga*. *Faculté des Sciences de Toulouse*, p. 637-661.
- GAUSSEN H. (1967). — Les Gymnospermes actuelles et fossiles. Fascicule IX : chap. XI, additions et corrections aux Abiétacées. *Faculté des Sciences de Toulouse*, p. 681, p. 704-705.
- GEISSERT F. (2005). — Éléments remarquables dans les flores néogènes des environs de Haguenau. *Bulletin annuel de l'Association des Amis du Jardin botanique du Col de Saverne*, **2005** : 5-17.
- GOËR DE HERVE A. DE et TEMPIER P. (1988). — Notice explicative, feuille Saint-Flour. *Carte géologique de la France (1:50000)*, Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, 92 p.
- HICKEL R. (1932). — Note sur un gisement de végétaux pliocènes dans le Bas-Rhin. *Bulletin de la Société dendrologique de France*, **83** : 43-48.
- JOVET P. et KERGUELEN M. (1990). — Flore descriptive et illustrée de la France par l'abbé H. Coste : septième supplément (révision du 4<sup>e</sup> supplément). *Librairie scientifique et technique Albert Blanchard*, Paris, p. 747-875.
- JUDD W. S., CAMPBELL C. S., KELLOGG E. A. et STEVENS P. (2002). — Botanique systématique : une perspective phylogénétique. *Ed. De Boeck Université*, Paris, Bruxelles, 467 p.
- KRÄUSEL R. (1938). — Die tertiäre Flora der Hydrobienenkalken von Mainz-Kastel. *Paläontologische Zeitschrift*, Berlin, **20** : 9-103.
- KUNZMANN L. et MAI D. H. (2005). — Die Koniferen der Mastixioideen-Flora von Wiesa bei Kamenitz (Sachs, Miozän) unter besonderer Berücksichtigung der Nadelblätter. *Palaeontographica B*, **272** : 67-135.
- KVACEK Z. et TEODORIDIS V. (2007). — Tertiary macrofloras of the Bohemian Massif : a review with correlations within Boreal and Central Europe. Czech Geological Survey, Prague : *Bulletin of Geosciences*, **82** (4) : 383-408.
- KVACEK Z., TEODORIDIS V. et GREGOR H.-J. (2008). — The Pliocene leaf flora of Auenheim, Northern Alsace (France). *Documenta naturae*, **155** (10) : 1-108.
- KVACEK Z., TEODORIDIS V. et WANG Q. (2009). — *Ilex geissertii* sp. n. (Aquifoliaceae), a fossil ancestor of *Ilex* sect. *Ilex* in the upper Miocene and Pliocene of Europe. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **157** : 192-210.

- LAURENT L. (1904-1905). — Flore pliocène des cinérites du Pas-de-la-Mougudo et de Saint-Vincent-la-Sabie (Cantal), avec une introduction géologique et paléontologique par P. Marty. *Annales du Musée d'Histoire naturelle de Marseille*, Géologie, **IX** : 313 p., tabl., XX pl.
- LAURENT L. (1908). — Flore plaisancienne des argiles cinéritiques de Niac (Cantal), avec une introduction géologique par P. Marty. *Annales du Musée d'Histoire naturelle de Marseille*, Géologie, **XII** : 88 p., tabl., IX pl.
- LAURENT L. et MARTY P. (1923). — Flore pliocène des argiles de Reuver et des gisements synchroniques voisins (Limbourg hollandais). *Mededeelingen van's Rijks geologischen Dienst*, ser. B, **1** : 80 p., 14 pl.
- LAURENT L. et MARTY P. (1927). — Flore pliocène des cinérites des hautes vallées de la Petite-Rhue et de la Véronne (Cantal). *Annales du Musée d'Histoire naturelle de Marseille*, **XXI** : 132 p.
- LEGRAND Ph. (2003). — Inventaire de la macroflore du Miocène supérieur de la diatomite de Murat (Cantal, Massif Central, France). *Annales de la Société géologique du Nord*, **10** (2<sup>ème</sup> série) : 25-55, pl. V-X.
- LePAGE B. A. et BASINGER J. F. (1995). — Evolutionary history of the genus *Pseudolarix* Gordon (Pinaceae). *International Journal of Plant Sciences*, **156** (6) : 910-950.
- MÄDLER K. (1939). — Die pliozäne Flora von Frankfurt am Main. *Abhandlungen der senckenbergischen naturforschenden Gesellschaft*, **446** : 202 p., 13 pl.
- MANCHESTER S. R., CHEN Z.-D., LU A.-M. et UEMURA K. (2009). — Eastern Asian endemic seed plant genera and their paleogeographic history throughout the Northern Hemisphere. *Journal of Systematics and Evolution*, **47** (1) : 1-42.
- MARTINETTO E. (2001). — Studies on some exotic elements of the Pliocene floras of Italy. *Palaeontographica*, B, **259** : 149-166.
- PITON L. et THEOBALD N. (1935). — La faune entomologique des gisements mio-pliocènes du Massif Central. *Revue des Sciences naturelles d'Auvergne*, **1** (2) : 65-104, 5 pl.
- PRIVE-GILL C. (1987). — Les flores ligneuses tertiaires du Massif Central français : étude anatomique, implications paléoclimatiques et phytogéographiques. *Thèse de Doctorat d'Etat*, Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris : 149-153.
- ROIRON P. (1991). — La macroflore d'âge miocène supérieur des diatomites de Murat (Cantal, France) ; implications paléoclimatiques. *Palaeontographica*, B, **223** (4-6) : 169-203, 6 pl.
- TEODORIDIS V. (2007). — Revision of *Potamogeton* fossils from the Most Basin and their paleoecological significance (Early Miocene, Czech Republic). Czech Geological Survey, Prague : *Bulletin of Geosciences*, **82** (4) : 409-418.
- ZANNI M. et RAVAZZI C. (2007). — Description and differentiation of *Pseudolarix amabilis* pollen. Palaeoecological implications and new identification key to fresh bisaccate pollen. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **145** : 35-75.

EXPLICATIONS DE LA PLANCHE I  
EXPLANATIONS OF PLATE I

(barre d'échelle = 1 cm ; scale bar = 1 cm)

- Fig. 1.- *Pteridium aquilinum* (Linné) Kuhn *fossilis* (penne)      Fig. 15.- *Alnus* sp. (chaton mâle)
- Fig. 2.- *Abies ramesi* Saporta (rameau feuillé)      Fig. 16.- *Betula* sp. (graine)
- Fig. 3, 4, 5 et 6.- *Pseudolarix schmidtgenii* Kräusel (graines)      Fig. 17.- *Viscophyllum pliocaenicum* (Engelh.) Mädler (feuille)
- Fig. 7 et 8.- *Pinus* sp. 2 cf. *Pinus nigra* Arnold *fossilis* (graines)      Fig. 18.- *Potamogeton crispus* Linné *fossilis* (tige feuillée)
- Fig. 9 et 10.- *Pinus* sp. (aiguilles isolées)      Fig. 19.- *Platanus aceroides* Goeppert
- Fig. 11.- *Pinus* sp. (rameau feuillé)      Fig. 20.- Fabaceae (fruit)
- Fig. 12.- *Tsuga europaea* Menzel (rameau feuillé avec cône femelle)      Fig. 21.- *Populus nigra* Linné *fossilis* (chaton)
- Fig. 13.- *Tsuga europaea* Menzel (détail du cône de la fig. 12)      Fig. 22.- *Viscophyllum pliocaenicum* (Engelh.) Mädler (feuille)
- Fig. 14.- graines indéterminées      Fig. 23.- *Pinus* sp. (cône femelle)



EXPLICATIONS DE LA PLANCHE II  
EXPLANATIONS OF PLATE II

(barre d'échelle = 1 cm ; *scale bar = 1 cm*)

Fig. 1.- *Sassafras ferrettianum* Massalongo (feuille)

Fig. 2.- *Prunus pereger* Unger (feuille)

Fig. 3.- *Potamogeton crispus* Linné *fossilis* (tige feuillée)

Fig. 4.- cf. *Photinia* sp. (feuille)

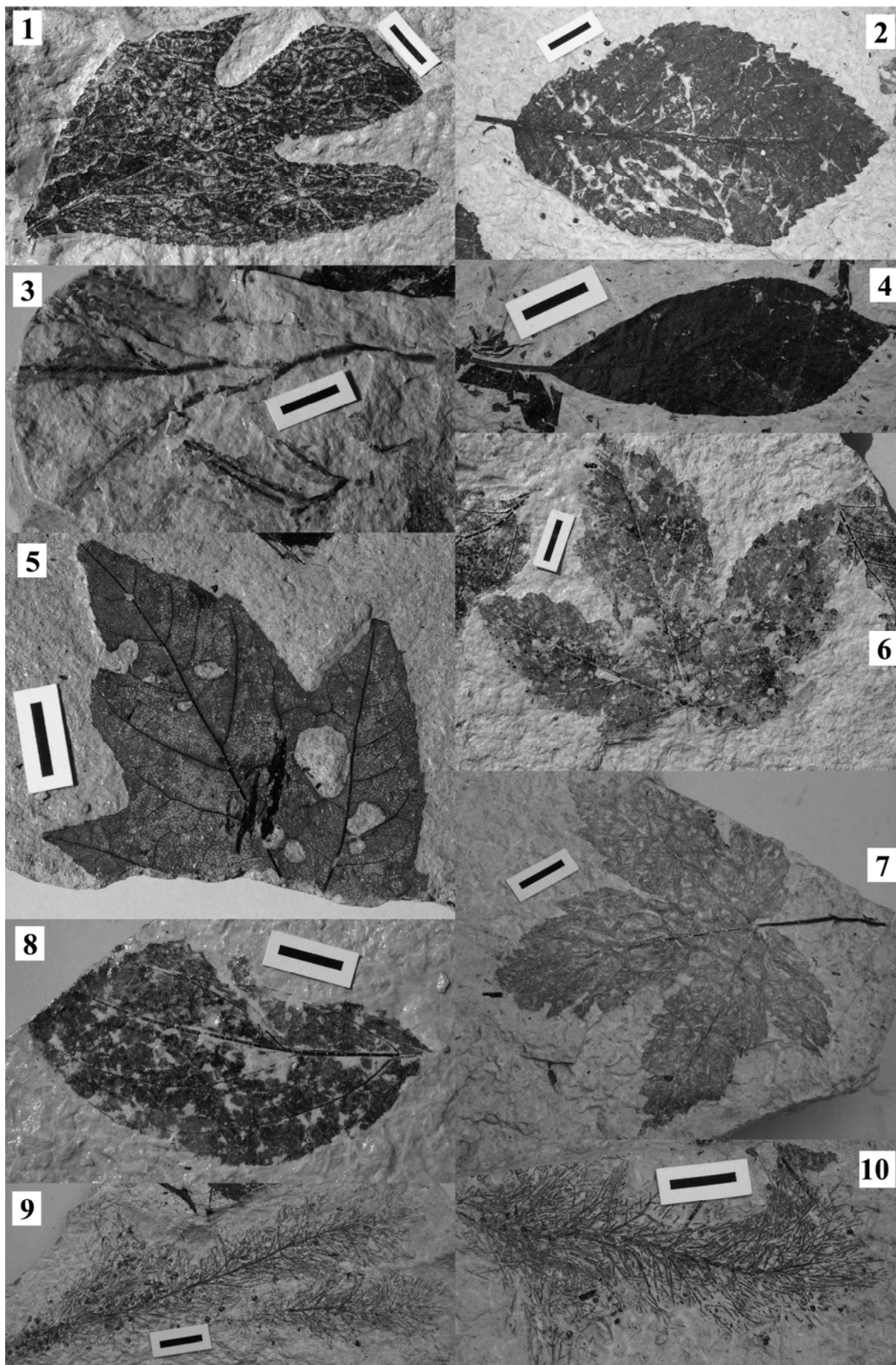
Fig. 5.- *Acer tricuspidatum* Bronn = *Acer trilobatum* Al.  
Braun (feuille)

Fig. 6 et 7.- *Acer pseudoplatanus* Linné *fossilis* (feuilles)

Fig. 8.- *Cornus sanguinea* Linné *fossilis* (feuille)

Fig. 9 et 10.- *Myriophyllum* sp. (tiges feuillées)









## ORIGINE DES TETRAPODES, SCENARIOS, THEORIES ERRONEES ET EVENEMENTS EVOLUTIFS

### *Origin of tetrapods, scenarios, erroneous theories and evolutionary events*

par Alain BLIECK (\*)

*Résumé.* — Le problème de l'origine des tétrapodes connaît un regain d'intérêt depuis plusieurs années. Il porte entre autres sur l'âge du plus ancien de ses représentants et sur le milieu de vie des espèces du Dévonien. D'après les découvertes les plus récentes (traces et pistes de l'Eifélien de Pologne), il semble que l'on puisse faire remonter l'âge du plus ancien tétrapode à environ – 397 Ma, voire plus si l'on prend en compte une trace fossile d'Australie datée de la base du Dévonien vers – 416 Ma. Ceci vieillit l'origine des tétrapodes de quelques 30 Ma par rapport à ce qui était supposé il y a quelques années. Les analyses paléoenvironnementales réalisées, soit sur les sédiments renfermant des restes de tétrapodes dévoniens, soit à partir d'analyses des ichthyofaunes du Dévonien moyen et supérieur, au sein desquelles ont été récoltés des tétrapodes, indiquent des environnements marins côtiers de faible profondeur d'eau ou des environnements de transition entre mer et terre (intertidaux, lagunaires, « lagoonal-marins »). L'analyse critique des publications les plus récentes sur ces sujets amène à émettre des considérations générales sur les « événements » en paléontologie évolutive, sur le devenir des scénarios en paléontologie, et sur la persistance de théories erronées.

*Abstract.* — A renewal of interest has been led to the problem of origin of tetrapods for several years. It is concerned, among other topics, with the age of their oldest representative and the life environment of their Devonian species. After the most recent discoveries (Eifelian tracks and traces from Poland), it seems that we can date the most ancient tetrapod at ca. – 397 My, or even older when taking into account an earliest Devonian trace fossil from Australia at ca. – 416 My. This makes the origin of tetrapods some 30 My older than what was thought some years ago. Palaeoenvironmental analyses which have been made either on Devonian fossil tetrapod-bearing sediments or on Middle to Late Devonian ichthyofaunal assemblages with tetrapod remains do conclude to shallow water coastal marine to land-sea transitional environments (intertidal, lagoonal, « lagoonal-marine »). A critical analysis of most recent publications on this matter leads to some general considerations about « events » in evolutionary palaeontology, about the fate of scenarios in palaeontology, and about the persistence of erroneous theories.

*Mots-clés.* — Tétrapodes, Dévonien, paléoenvironnements, évolution, théories.

*Key words.* — Tetrapods, Devonian, palaeoenvironments, evolution, theories.

### I. — INTRODUCTION

Il y a quelques années, plusieurs découvertes de fossiles nouveaux, des descriptions paléoanatomiques détaillées, des précisions sur l'âge des fossiles récoltés et sur l'environnement (les environnements) des organismes ont conduit plusieurs auteurs à émettre ce qui apparaissait comme le nouveau paradigme en matière d'origine des tétrapodes. Cet ensemble de travaux a trouvé l'une de ses expressions les plus achevées dans l'ouvrage de synthèse de Jennifer A. Clack, paléontologue de l'Université de Cambridge en Angleterre, bien connue pour ses travaux, entre autres, sur le tétrapode *Acanthostega* récolté dans le Famennien du Groenland oriental (Clack, 2002 ; voir aussi Blom *et al.*, 2007). La révision critique de l'âge des plus anciens tétrapodes connus, tous du Dévonien, amenait à proposer une origine du groupe

au plus tard au début du Dévonien supérieur vers – 385 Ma, voire au Givétien (- 385 à – 392 Ma ; Clack, 2002, 2006, 2007 ; Blicke *et al.*, 2007, 2010 ; Clément & Letenneur, 2009 ; voir Gradstein *et al.*, 2004 pour l'échelle des temps géologiques). Eu égard aux différences de vues en ce qui concerne l'interprétation du milieu de vie originel de ces tétrapodes dévoniens, une sorte de consensus mou était en train de s'installer en la matière : on envisageait toute une série d'environnements depuis le marin jusqu'au terrestre (voir par ex. la revue de Clément & Letenneur, 2009) ou on considérait simplement la situation comme non résolue (« unclear » *in* Clack, 2006). Certains auteurs, tout particulièrement ceux de langue anglaise, préféraient nettement des environnements continentaux depuis les environnements saumâtres des lagunes côtières jusqu'aux environnements dulcicoles à terrestres (par exemple

(\*) Université Lille 1 – Sciences et Technologies, UFR Sciences de la Terre, FRE 3298 du CNRS « Géosystèmes », F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex ; Alain.Blicke@univ-lille1.fr

Clack, 2002 ; Retallack *et al.*, 2009). Cette école de pensée est l'héritière du scénario dit du « Drying Pond » (la mare en voie d'assèchement) ou du « Desert Pond » (la mare en cours de désertification) proposé par Romer (1933, 1958). Ce scénario a cependant été critiqué dès qu'il a été émis (voir *in* Romer, 1958) et a donné ultérieurement naissance à une autre école de pensée où la « transition des poissons aux tétrapodes » s'est réalisée dans des environnements marins ou des environnements de transition entre mer et terre (tidaux, intertidaux, lagunaires). Cette théorie est plutôt le fait d'auteurs européens (« continentaux » au sens des Anglais) et russes (par ex. Schultze, 1997, 1999 ; Lelièvre, 2002 ; Lebedev, 2004). Elle gagne cependant du terrain parmi les auteurs de langue anglaise ou formés à l'école « anglo-saxonne » (par ex. Carr & Jackson, 2009 ; Ahlberg *in* Niedzwiedzki *et al.*, 2010). Le présent article propose de passer en revue ces aspects du problème de l'origine des tétrapodes, aussi appelée « terrestrialisation des vertébrés », « transition des poissons aux tétrapodes », « passage de la vie aquatique à la vie terrestre », et quelques-unes des questions qu'il soulève dans les domaines de la paléontologie (paléobiologie) évolutive et de la persistance de certaines théories scientifiques.

Dans cet article il est plusieurs fois fait mention ou référence à la « transition des poissons aux tétrapodes » ou à l'utilisation du mot « poissons ». En fait strictement, l'idée soutenue par cette expression est à bannir, ne serait-ce que parce que les « poissons » constituent un groupe résolument paraphylétique (cf. par exemple Janvier, 1996 ; Lecointre & Le Guyader, 2009). Il n'y a jamais eu de transition entre des clades, *a fortiori* il ne peut y en avoir entre un groupe paraphylétique, les « poissons », et les tétrapodes qui est un clade. Cette expression, si elle représente une vision simplificatrice d'un épisode de l'histoire évolutive des vertébrés, est néanmoins bien connue du public, mais il ne faut pas en abuser. Certains auteurs parlent même de la transformation de la nageoire en patte dans la « transition des poissons aux tétrapodes », ce qui est incorrect. Ce que les modèles de développement nous disent c'est que les cellules embryonnaires à l'origine des nageoires sont les mêmes que celles (= constituent le même tissu embryonnaire) qui chez les tétrapodes sont à l'origine de la constitution des membres (voir des résumés *in* Laurin, 2008 et Steyer, 2009). Il s'agit donc de bien préciser ce que signifie cette expression parce que personne n'a jamais pu constater une quelconque transformation d'un organe en un autre. Enfin, je tiens à faire la précision suivante : il ne s'agit pas de régler des comptes avec qui que ce soit, mais d'émettre une opinion personnelle dans un champ de recherche particulièrement actif et attractif pour les jeunes chercheurs, afin de les alerter sur certains aspects du contexte dans lequel sont menées ces recherches au niveau mondial en 2010.

## II. — AGE DES PREMIERS TETRAPODES ET DEVENIR DES SCENARIOS EN PALEONTOLOGIE

Niedzwiedzki *et al.* (2010) viennent d'annoncer et d'illustrer la découverte de nombreuses traces et pistes de tétrapodes (plus de 200 spécimens et 9 pistes) d'âge éoéifélien dans le nord de la région de Lysogory des Monts de Sainte Croix, en Pologne, dans la carrière abandonnée de Zachelmie « within the Wojciechowice Formation, some 20m below the level where a conodont sample showing a

characteristic *costatus* Zone assemblage (Eifelian) was taken » (*ibid.*, p. 43). Cette découverte confirme ou tout au moins n'infirme pas le paradigme actuel selon lequel les premiers tétrapodes doivent être recherchés avant le Dévonien supérieur, c'est-à-dire dans le Dévonien moyen ou même encore plus tôt. En effet, une trace d'âge silurien ? – éodévonien d'Australie, si elle est bien datée et s'il s'agit bien d'une trace de tétrapode, impliquerait une origine dès la base du Dévonien voire même au Silurien (Warren *et al.*, 1986 ; Clack, 1997 ; Gouramanis *et al.*, 2003 ; Young, 2006 ; Blicek *et al.*, 2010). Cette dernière éventualité est très brièvement évoquée par Niedzwiedzki *et al.* (2010, p. 46 : « More problematic is the Glenisla trackway from Australia, which appears to be no later than Late Silurian » ; et p. 47 : « For the present the timing of the fish-tetrapod transition is best regarded as uncertain, though it clearly pre-dates the early Eifelian; an Early Devonian date seems most likely, but even earlier potential tetrapod ichnofossils such as the Silurian Glenisla track should not be dismissed out of hand ») qui ne cite que Clack (1997) et Gouramanis *et al.* (2003) mais pas l'article à l'origine de la découverte (Warren *et al.*, 1986).

Cet épisode constitue un exemple typique de ce qui arrive aux scénarios en paléontologie. Niedzwiedzki *et al.* (2010, p. 47) parlent de leur nouveau scénario pour l'apparition des tétrapodes comme d'un scénario qui « has considerable explanatory power. » Il y a quelques années (15 ans ?), nous étions convaincus que les plus vieux tétrapodes étaient d'âge famennien (- 374 à - 359 Ma ; *Ichthyostega* et *Acanthostega* du « Strunien » de l'est du Groenland ; Blom *et al.*, 2007). Puis des restes frasniens ont été trouvés. En tenant compte de ces plus vieux restes osseux, on suppose donc que les tétrapodes sont apparus au Dévonien supérieur (- 385 à - 359 Ma *in* Gradstein *et al.*, 2004) ou un peu plus tôt au Dévonien moyen (- 397 à - 385 Ma). Des collègues polonais trouvent des traces de tétrapodes supposées dans le Dévonien moyen (je dis « supposées » parce que tant que l'organisme réel n'est pas trouvé en connexion avec ces traces, il reste supposé) et ceci est censé « confirmer » l'hypothèse de départ. Cependant, si la trace de Glenisla en Australie est (1) confirmée comme étant celle d'un tétrapode et (2) confirmée comme étant d'âge silurien-éodévonien (âge qui en fait ne fait guère de doute), nous changerons de nouveau le scénario en faveur d'une origine silurienne des tétrapodes (la limite Silurien / Dévonien étant datée à - 416 Ma). Dans ce cas, nous aurons une « lignée fantôme » de plus de 30 Ma pour les tétrapodes et les elpistostégides, le groupe-frère des tétrapodes qui n'est connu que du Givétien terminal-Frasnien (- 385 à - 374 Ma) pour l'instant (Fig. 1) [une « lignée fantôme » est une lignée phylogénétique qui est supposée avoir existé mais pour laquelle nous n'avons pas d'enregistrement fossile]. Que pouvons-nous donc faire ? D'abord essayer de découvrir des elpistostégides plus anciens ; deuxièmement essayer de découvrir davantage de traces de tétrapodes du Dévonien inférieur ou mieux des restes osseux ; troisièmement essayer de découvrir des restes encore plus vieux de tétrapodes. Le processus est sans fin.

Un test possible consisterait à comparer les âges géologiques des fossiles avec les phylogénies moléculaires. Cependant, cette procédure est incorrecte parce qu'il n'y a pas de donnée temporelle dans les phylogénies des moléculaires. Les données temporelles sont localisées aux nœuds des arbres issus d'analyses phylogénétiques (cladistiques), qu'ils soient des nœuds intermédiaires ou des nœuds terminaux (âge des taxons). Les arbres moléculaires ne

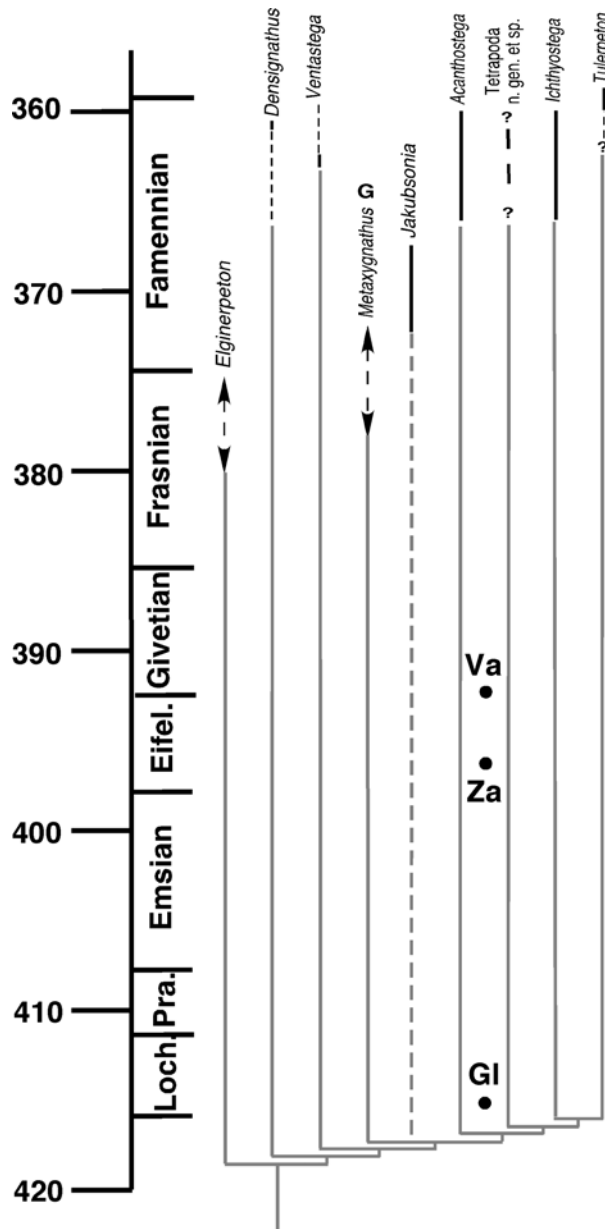


Fig. 1. — Contexte chronologique et relations phylogénétiques des tétrapodes dévoniens d'après Ahlberg *et al.* (2008, in Blicek *et al.*, 2010) avec ajout de trois des traces fossiles connues : Gl- Glenisla (Australie), Va- Valentia Island (Irlande), Za- Zachelmie (Pologne), d'après Niedzwiedzki *et al.* (2010, fig. 5b) et Young (2006). Autre abréviation : G- Gondwana Est (Australie) ; tous les autres taxons proviennent du Continent des Vieux Grès Rouges.

**Fig. 1.** — Chronological context and phylogenetic relationships of Devonian tetrapods after Ahlberg *et al.* (2008, in Blicek *et al.*, 2010) with addition of three of the known trace fossils : Gl- Glenisla (Australia), Va- Valentia Island (Ireland), Za- Zachelmie (Poland), after Niedzwiedzki *et al.* (2010, fig. 5b) and Young (2006). Other abbreviation : G- Gondwana Est (Australia) ; all other taxa come from the Old Red Sandstone Continent.

proposent pas de données fiables quant aux datations des événements parce que celles-ci reposent sur l'« horloge moléculaire ». En effet cette « horloge » est établie à partir des phylogénies moléculaires avec des repères datés, ces

repères datés étant fondés sur les restes fossiles les plus vieux et les mieux datés de chacun des clades des phylogénies. Nous sommes ici face à un cas typique de raisonnement circulaire. L'hypothèse de l'« horloge moléculaire » repose donc sur des prémices fausses. Et de toute façon nous serions incapables d'extraire des restes d'acides nucléiques ou de protéines d'elpistostégides. Aussi, que faire ? Continuer et essayer de trouver davantage de fossiles. [Des méthodes différentes de comparaison entre données phylogénétiques et données stratigraphiques ont été développées, comme par exemple le Hierarchical Fit Index (HIFI : Lelièvre, 2002) qui est fondé sur le concept de paralogie temporelle (Lelièvre *et al.*, 2008). Ces méthodes sont critiquées en particulier en ce qui concerne la notion de lignée fantôme (voir in Lelièvre *et al.*, 2008).]

Qui est « convaincu » de l'âge eifélien ou siluro-dévonien des plus vieux tétrapodes ? Certainement les collègues qui, comme tous les autres, ont besoin de faire un coup médiatique dans le but de rechercher et obtenir davantage de fonds pour leurs propres recherches. C'est probablement l'une des raisons pour lesquelles tant de paléontologues se sont mis à travailler sur les plus vieux tétrapodes au cours de la dernière décennie. La terrestrialisation des vertébrés (de même que celle des plantes et des invertébrés) est en effet l'un des sujets les plus « sexy » de la paléontologie moderne (« sexy » dans le sens des médias). Aussi, un conseil : travaillez sur ce sujet, trouvez « le plus vieux », obtenez des crédits de recherche, et publiez (ou périssez). C'est dans ce contexte qu'a été récolté puis reconnu un fragment de mandibule de tétrapode du Famennien du Condroz en Belgique, attribué à un ichthyostégidé (« *Ichthyostega-like* » in Clément *et al.*, 2004, p. 412 ; Clément & Letenneur, 2009), au sein d'une ichthyofaune riche connue dans plusieurs sites du massif ardennais (Clément, 2002 ; Clément & Boisvert, 2006 ; Clément & Prestianni, 2009 ; Clément *et al.*, 2009 ; Janvier & Clément, 2005) (Fig. 2). Notons cependant que l'expression « *Ichthyostega-like* » est taxinomiquement incorrecte et semble pouvoir être attribuée à une erreur des relecteurs de la revue *Nature* qui auraient dû demander aux auteurs d'en proposer une autre, plus conforme aux règles de la nomenclature zoologique. En effet, ou bien il s'agit du genre *Ichthyostega*, ou bien il ne s'agit pas d'*Ichthyostega*. Il est donc suggéré ici de rebaptiser la mandibule du Famennien de Belgique *Ichthyostega* ? sp. (Tableau I), en accord avec certaines des règles de nomenclature ouverte (par exemple Matthews, 1973). Rappelons enfin que les circonstances de cette découverte ont été inhabituelles : ce tétrapode avait été originellement déterminé comme un « poisson » (Lohest, 1888b) tandis que la première mention d'un tétrapode dévonien en Belgique (Lohest, 1888a) s'est révélée être celle d'un dipneuste (Clément & Boisvert, 2006).

### III. — ENVIRONNEMENT DES PREMIERS TETRAPODES ET PERSISTANCE DE THEORIES ERRONEES

Un deuxième problème apparaît à la lecture de l'article de Niedzwiedzki *et al.* (2010). Les auteurs déclarent en effet dès l'introduction de leur article : « Our discovery of diagnostic and securely dated tetrapod tracks from the marine Eifelian ... of Poland shows that the current consensus based on body fossils is substantially mistaken in both the timescale and, probably, the environmental setting of the fish-tetrapod



Fig. 2. — La carrière de Strud, Gesves, Province de Namur, Belgique, qui a fourni un ichthyostégidé ; Formation d'Evieux ou de Souverain-Pré, Famennien moyen (Clément & Prestianni, 2009) ; avec de gauche à droite G. Clément, F. Thirion et S. Olive le 10 juin 2009 [photo A. Blicck].

**Fig. 2.** — Strud quarry, Gesves, Namur Province, Belgium, that has yielded an ichthyostegid ; Evieux or Souverain-Pré Formation, middle Famennian (Clément & Prestianni, 2009) ; with, from left to right : G. Clément, F. Thirion and S. Olive on 10 June 2009 [photo by A. Blicck].

transition » (Niedzwiedzki *et al.*, 2010, p. 43). Autrement dit, ce serait leur découverte dans la Formation Wojciechowice (sédimentation argilo-dolomitique d'environnement marin restreint : Niedzwiedzki *et al.*, 2010, Supplementary Information, p. 1) qui impliquerait que l'hypothèse courante (= en fait celle d'une partie des spécialistes, par exemple Clack, 2002 ; voir ci-dessus) d'un environnement dulcicole pour la transition poisson-tétrapode doit être abandonnée. Ceci est un raccourci audacieux qui fait fi de plus de 30 années de débat au cours desquelles plusieurs auteurs ont déjà mis en doute l'origine dulcicole des tétrapodes. Je ne prendrai que quelques exemples. Spjeldnaes (1982, p. 340) conclut que la transition poisson-tétrapode « probably took place in large coherent water bodies which may have been connected with the sea, but was not typically marine ... ». H.-P. Schultze quant à lui, plaide depuis les années 1980 pour une origine marine, en particulier dans la zone tidale, par analogie entre les adaptations des elpistostégides et des premiers tétrapodes et celles des périophthalmes, et en se fondant sur l'interprétation de certains des sites fossilifères néodévonien à elpistostégides et tétrapodes (références *in* Schultze & Cloutier, 1996 ; Schultze, 1997, 1999 ; De Ricqlès, 2000).

Ces auteurs sont ignorés dans l'article de Niedzwiedzki *et al.* (2010).

Un autre biais est apparu à la lecture du « News and Views » de présentation de l'article de Niedzwiedzki *et al.* (2010), signé par Janvier & Clément (2010). En effet, ces auteurs vont au-delà des conclusions de Niedzwiedzki *et al.* (2010) en ce qui concerne l'environnement des traces fossiles de l'Eifélien de Pologne : ils attribuent cet environnement à un lagon corallien : « [Niedzwiedzki and colleagues] show that the first tetrapods thrived in the sea, trampling the mud of coral-reef lagoons » (Janvier & Clément, 2010, p. 41). Cette assertion n'est pas en accord avec l'opinion de Niedzwiedzki *et al.* (2010) qui parlent de "marine tidal flat" (*ibid.*, résumé), "marine intertidal and/or lagoonal zone" (*ibid.*, p. 47), "extremely shallow water lagoonal-marine environment with elevated salinity" with "occasional more open marine influence", et de "an extensive shallow-marine carbonate shelf of uniformly flat topography, located hundreds of km from nearest continental areas" (*ibid.*, Supplementary Information, p. 3). A aucun moment ils n'évoquent un lagon corallien. Une plate-forme épicontinentale marine de très faible profondeur peut en effet être séparée de la haute mer par une barrière filtrante sous la forme d'une barrière récifale sans qu'il s'agisse pour autant d'une barrière corallienne. D'où peut bien venir cette idée de Janvier & Clément (2010) ? Peut-être de certains articles tel que celui de Lucifora & Vassallo (2002, p. 40) : « Walking has evolved many times among different lineages of benthic fishes ... In epaulette sharks, walking is said to be adaptive for a living in a structurally complex habitat such as coral reefs ... » Cependant, dans le cas qui nous intéresse ici, rien ne permet de supposer une relation entre le milieu lagunaire corallien et l'origine des pattes des tétrapodes.

Malgré toutes ces discussions, quelques collègues restent adeptes de la théorie dulcicole en matière de milieu de vie des premiers tétrapodes. Ce problème dépasse celui de l'origine des tétrapodes puisqu'il concerne l'ensemble des faciès de type Vieux Grès Rouges ayant livré des restes de vertébrés aquatiques (cf. par exemple Goujet, 1984 ; Blicck, 1985 ; Lelièvre *et al.*, 1988). Le cas qui est discuté ici est celui de l'environnement supposé par Retallack *et al.* (2009) pour les tétrapodes du Famennien de la localité de Red Hill, près d'Hyner en Pennsylvanie (Duncannon Member, Catskill Formation ; *Hynerpeton* et *Densignathus* + quelques autres restes de tétrapodes : Daeschler, 2000 ; Daeschler *et al.*, 1994). Retallack *et al.* (2009) décrivent en effet les niveaux qui ont livré ces tétrapodes comme des « Tetrapod-bearing Farwell paleosols » (*ibid.*, p. 1152). Ces paléosols sont « comparable with soils of the Murray River floodplain in New South Wales, Australia » (*ibid.*, p. 1153). Le milieu invoqué est le suivant : « Wet-season wooded floodplains would have offered Hyner tetrapods food, shelter and spawning grounds » (Martin, 2004 cité par Retallack *et al.*, 2009). On serait donc en présence de tétrapodes récoltés dans des paléosols de plaine d'inondation en bordure de rivière, des circonstances qui sont supposées refléter leur milieu d'origine. [De la même façon, des environnements dulcicoles de deltas alluviaux au sein de systèmes de plaines d'inondation boueuses, riches en paléosols, sont reconstitués pour les tétrapodes du Dévonien du Groenland, par exemple *in* Astin *et al.*, 2010.] Ceci présente néanmoins quelques problèmes vis-à-vis de certains des éléments de l'ichtyofaune et des autres organismes qui accompagnent ces tétrapodes (Tableau IA) :

A- Red Hill, près de Hyner	B- Strud, commune de Gesves
<p><b>Plantes</b>                      cf. <i>Protobarinophyton</i> sp.  <b><i>Barinophyton</i></b> <i>obscurum</i>  <b><i>Barinophyton</i></b> <i>sibericum</i>  <i>Otzinachsonia beerboweri</i>                      cf. <i>Lepidodendropsis</i> sp.  <b><i>Rhacophyton</i></b> <i>ceratangium</i>  <i>Gillespiea randolphensis</i>  <b><i>Archaeopteris</i></b> <i>halliana</i>  <b><i>Archaeopteris</i></b> <i>hibernica</i>  <b><i>Archaeopteris</i></b> <i>macilenta</i>  <b><i>Archaeopteris</i></b> <i>obtusa</i>                      cf. <i>Aglosperma quadripartita</i>  <i>Duodimidia pfefferkornii</i></p>	<p><b>Plantes</b>  <b><i>Rhacophyton</i></b> sp.  <b><i>Archaeopteris</i></b> <i>roemeriana</i>  <i>Condrusia rumex</i>  <i>Pseudosporogonites hallei</i>  <i>Moresnetia zalesskyi</i>  <b><i>Barinophyton</i></b> <i>condrusorum</i>                      cf. <i>Calathiops</i> sp.  <i>Sphenopteris flaccida</i>  <i>Sphenopteris modavensis</i></p>
	<p><b>Crustacés</b>                      « <i>Triops</i>-like tadpole shrimp »                      smooth ostracods indet.                      Malacostraca large specimens indet.</p>
<p><b>Arthropodes</b>  <i>Orsadesmus rubecollus</i>                      millipede sp. indet.  <i>Gigantocharinus szatmaryi</i>                      scorpion sp. indet.</p>	<p><b>Arthropodes</b>                      large Eurypterida indet.</p>
<p><b>Vertébrés</b>  <b><i>Groenlandaspis</i></b> <i>pennsylvanica</i>  <i>Turrisaspis elektor</i>  <b><i>Phyllolepis</i></b> <i>rosimontina</i>  <i>Ageleodus pectinatus</i>  <i>Ctenacanthus</i> sp.  <i>Gyracanthus</i> sp. cf. <i>G. sherwoodi</i>  <i>Limnomis delaneyi</i>  <b><i>Holoptychius</i></b> sp.                      Dipnoi sp. indet.                      Megalichthyidae gen. et sp. indet.  <i>Hyneria lindae</i>                      cf. <b><i>Glyptopomus</i></b> sp.                      cf. <i>Sauripterus</i> sp.  <b>rhizodontid</b> sp. indet.  <i>Densignathus rowei</i>  <i>Hynerpeton bassetti</i>                      Tetrapoda sp. indet.                      Whatcheeriidae gen. et sp. indet.</p>	<p><b>Vertébrés</b>  <b><i>Phyllolepis</i></b> <i>undulata</i>  <b><i>Groenlandaspis</i></b> <i>thorezi</i>  <i>Bothriolepis</i> sp.                      acanthodian indet.                      actinopterygian indet.  <b><i>Holoptychius</i></b> <i>flemingi</i>  <b><i>Holoptychius</i></b> <i>nobilissimus</i>                      ‘<i>Dipterus</i>’ sp.  <i>Soederberghia</i> sp. cf. <i>S. groenlandica</i>  <i>Jarvikia</i> sp.  <b><i>Glyptopomus</i></b> sp.                      cosmone-covered osteolepidid (Megalichthyidae ?)                      Tristichopteridae gen. et sp. indet.  <b><i>Rhizodontida</i></b> indet.  <i>Ichthyostega</i> ? sp.</p>

Tabl. I. — Listes des organismes fossiles qui ont été récoltés et déterminés dans les localités famenniennes de : (A) Red Hill, près de Hyner (Pennsylvanie, USA) et (B) Strud, commune de Gesves (Province de Namur, Belgique), d’après Retallack *et al.* (2009, Table 1 ; corrigé suivant Cressler, 2006 et Cressler *et al.*, 2010) et Clément & Prestianni (2009, Appendix, légèrement modifié). En caractères gras : les genres communs aux deux localités.

**Table I.** — List of organisms which have been sampled and determined in the Famennian localities of : (A) Red Hill, near Hyner (Pennsylvania, USA) and (B) Strud, municipality of Gesves (Namur Province, Belgium), after Retallack *et al.* (2009, Table 1, corrected according to Cressler, 2006 and Cressler *et al.*, 2010) and Clément & Prestianni (2009, Appendix, slightly modified). In bold characters : genera which are common to both localities.

— le placoderme *Groenlandaspis*, représenté par l’espèce *G. pennsylvanica* (Daeschler *et al.*, 2003), a une vaste

répartition géographique au Dévonien supérieur, imputée à un milieu de vie et de dispersion marin et non pas continental

dulcicole (Carr & Jackson, 2009, p. 13 et fig. 5-8) ; [Notons que le terme « dispersion » est souvent utilisé quand les auteurs montrent qu'aucun phénomène de vicariance ne peut être mis en évidence, ou simplement quand ce processus n'a pas été envisagé. Cependant, l'absence de vicariance ne signifie rien d'autre qu'il n'y a pas de tel phénomène dans le cas étudié. A coup sûr il ne signifie pas que les taxons se sont alors dispersés, car la dispersion n'est pas testable parce qu'aléatoire et donc elle n'est pas un modèle en biogéographie (H. Lelièvre, comm. pers.)]

— le chondrichtyen *Ageleodus*, représenté par l'espèce *A. pectinatus* (Downs & Daeschler, 2001), serait « probably freshwater because there are no other hints of marine influence in the fauna ... » (Retallack *et al.*, 2009, p. 1152), sauf qu'*Ageleodus* est généralement considéré comme marin ; en dehors du Dévonien de Pennsylvanie, ce genre a été récolté dans le Calcaire carbonifère d'Ecosse (Burdiehouse Limestone, in Zangerl, 1981, p. 102) et dans le Rhétien marin côtier d'Angleterre (Rhaetic Bone Bed, Aust Cliff, Westbury Formation, Pernarth Group, in PBD, 2010) ;

— la présence d'organismes terrestres à Red Hill (scorpions, myriapodes, plantes vasculaires) ne permet pas de caractériser le milieu de vie des tétrapodes qui vivaient vraisemblablement dans l'eau et non pas sur terre (Retallack *et al.*, 2009, p. 1153), si bien que leur présence n'est pas significative en matière de milieu aquatique et que par conséquent elle n'est pas plus indicatrice d'un milieu dulcicole que d'un milieu marin (cf. Schultze, 2009, conclusion 1, p. 133) ; soit dit en passant, le fait d'avoir récolté les tétrapodes dans des paléosols n'est en rien révélateur du fait qu'ils puissent avoir été terrestres : Retallack *et al.* (2009, p. 1152) précisent en effet que « most fish and tetrapods at Hyner are disarticulated ... with cracks, exposed spongy bone, and displaced splinters », ce qui montre bien leur état allochtone par rapport aux paléosols ;

— l'absence apparente d'organismes typiquement marins à Red Hill (tels que les myxines, les brachiopodes articulés, les céphalopodes, les coraux ... — mais voir ci-dessus le cas de *Groenlandaspis* et *Ageleodus*) n'indique pas que les sédiments du milieu de vie originel des tétrapodes étaient non-marins mais seulement que ces organismes sont absents pour diverses raisons (environnement hostile, conditions de dépôt défavorables, diagenèse, ...) (Schultze, 2009, conclusion 3, p. 133).

Le deuxième exemple qui est abordé ici concerne la localité de Strud, commune de Gesves, Province de Namur, en Belgique (Formation d'Evieux ou de Souverain-Pré, Famennien moyen ; « *Ichthyostega*-like » : Clément *et al.*, 2004 ; Clément & Prestianni, 2009). Sa liste floristique et faunique présente un certain nombre de taxons en commun avec ceux de Red Hill, au niveau générique (Tableau IB). La proportion est de 23% dans le cas de Red Hill (23% des genres de Red Hill en commun avec ceux de Strud) et de 30% dans le cas de Strud (30% des genres de Strud en commun avec ceux de Red Hill — un taxon 'indet.' étant compté comme un genre distinct). Pour des localités qui, au Dévonien supérieur, étaient éloignées de quelques milliers de kilomètres, ces proportions me semblent bizarrement élevées si on a à faire à des sites continentaux dulcicoles. L'hypothèse traditionnelle qui est retenue pour Strud est celle d'une « very low energy river or [ ] a calm but abandoned channel » au sein d'un « large lagoonal system developed along the south

of the Euramerican continent » (Clément & Prestianni, 2009, p. 108). Il est cependant précisé que « the Upper Famennian environments were diversified and included a large range of ecosystems » (*ibid.* ; voir Thorez *et al.*, 1977) ce qui laisse la place à une interprétation différente pour les couches à tétrapode et à poissons. Les sédiments de la carrière de Strud sont attribués soit à la Formation de Souverain-Pré à cause de leur âge, soit à la Formation d'Evieux à cause de leur lithofaciès (Clément *et al.*, 2004 ; Clément & Prestianni, 2009). La Formation de Souverain-Pré est considérée classiquement comme correspondant à une faible pulsation marine transgressive sur une plate-forme peu profonde en bordure du Continent des Vieux Grès Rouges tandis que la Formation d'Evieux correspond à des environnements marins plus restreints puis continentaux vers le haut de la série (Thorez *et al.*, 1988 ; Boulvain, 2010). Ceci signifie que l'hypothèse « very low energy river or [ ] a calm but abandoned channel » n'est pas fermement établie. En effet :

— la remarque faite ci-dessus à propos de *Groenlandaspis*, présent à Strud avec l'espèce *G. thorezi*, est valable ici aussi : *Groenlandaspis* vivait dans un milieu de vie et de « dispersion » marin et non pas continental dulcicole (Carr & Jackson, 2009, p. 13 et fig. 5-8) ;

— la carrière de Strud n'a jusqu'à présent fourni aucun organisme manifestement terrestre (myriapodes, scorpions) en dehors des plantes vasculaires (mais cf. Schultze, 2009 : cette présence n'est en rien significative d'un milieu terrestre) ;

— la remarque faite ci-dessus à propos de l'absence d'organismes typiquement marins est également applicable à Strud ; cependant cette constatation est caduque si l'on considère que *Groenlandaspis* est marin (Carr & Jackson, 2009) ;

— la présence d'*Ichthyostega* spp. au Groenland oriental (Blom *et al.*, 2007) et d'*Ichthyostega*? sp. à Strud (« *Ichthyostega*-like », distants de près de 1 500 km l'un de l'autre (Clément *et al.*, 2004), n'est pas en faveur d'une « dispersion » par voie continentale fluviale ou lacustre, mais plutôt en faveur d'une « dispersion » par voie marine côtière ; à ce propos, je suis en total désaccord avec l'opinion de Marshall *et al.* (2010, p. 13) selon laquelle « the global distribution of Devonian fish is not an appropriate method to infer sedimentary environment. » Une distribution paléobiogéographique large à l'échelle du globe n'est pas, à elle seule, la preuve que l'organisme en question était marin plutôt que continental, mais c'est un argument pertinent parmi d'autres (Blicek, 1985 ; Schultze, 2009).

Comme le disent Carr & Jackson (2009, p. 14) : « The vertebrate faunas of the late Devonian (Givetian-Frasnian, Schultze and Cloutier, 1996; Famennian, Lelièvre, 2003 [*sic*, en fait 2002]) are suggestive of a marine or marginal marine interpretation for the sediments in which they are preserved » et les données fournies par Retallack *et al.* (2009) et Clément & Prestianni (2009) ne permettent pas d'infirmer cette proposition. Suivant la même tendance critique, Laurin & Soler-Gijón (2010, p. 171) arrivent à la conclusion que, parmi les tout premiers stégocéphales (= tétrapodes basaux), le genre *Metaxygnathus* du Dévonien supérieur d'Australie (voir Fig. 1) « may therefore have tolerated saltwater » et que la majorité de ces stégocéphales vivait en milieu marin ou saumâtre (Laurin & Soler-Gijón, 2010, fig. 4 ; à l'exception

bizarre d'*Acanthostega* et *Ichthyostega*, les deux stégocéphales « iconiques » du Dévonien supérieur du Groenland — voir ci-dessus, Astin *et al.*, 2010). Ceci a bien entendu une conséquence importante qui nous ramène à la conclusion de Niedzwiedzki *et al.* (2010) : « This is an important consideration since it implies that tetrapods originated in a marine influenced habitat and that fully freshwater faunas are a product of the Carboniferous Period » (Carr & Jackson, 2009, p. 14). Il est cependant étrange que les publications de Carr & Jackson (2009) et Schultze (2009) aient pu échapper à la sagacité de Niedzwiedzki *et al.* (2010).

#### IV. — LES « EVENEMENTS » EN PALEONTOLOGIE EVOLUTIVE

En matière d'évolution en général et d'évolution des vertébrés en particulier, qu'est-ce qu'un « major event » ? Est-ce que le passage de la vie aquatique à la vie terrestre est un « major event », qu'il s'agisse des vertébrés, des invertébrés ou des plantes ? Ou ne s'agit-il pas tout simplement d'un choix arbitraire dans la suite ininterrompue de la radiation des formes de vie sur Terre ? C'est ainsi que Janvier & Clément (2010, p. 41) qualifient la découverte de Zachelmie de « grenade into that picture » (= that « There was a consensus that the divergence between some elpistostegalians ... and tetrapods might have occurred during the Givetian ... »). C'est ainsi également que Niedzwiedzki *et al.* (2010, p. 46) parlent de « evolutionary event ». Cet effet d'annonce de la revue *Nature* est même relayé dans la presse, par exemple *The Guardian* du 6 janvier 2010 (site Web) : « Fossil footprints in an old quarry lead to a radical rethink of the evolution of the first four-legged animals or 'tetrapods' ... Ph. Janvier in Paris 'said the finding was as significant as the first footprint of Neil Armstrong on the moon' and described its effect as akin to 'lobbing a grenade' into the previous consensus of when the shift from water to land occurred. » Le même auteur (Janvier, 2010) déclare que « The transition from water to land is perhaps the most dramatic event in the history of life after the rise of photosynthesis, sexuality and predation. » Cependant Niedzwiedzki *et al.* (2010) reconnaissent que le remplacement des elpistostégides par les tétrapodes dans le registre des restes osseux fossiles ('changeover') n'était qu'un artefact causé par un enregistrement fossile incomplet.

Comme le montrent toutes les études anciennes et récentes sur le passage des poissons aux tétrapodes, cet « événement » est en fait une succession de nombreuses étapes évolutives s'échelonnant au moins du Dévonien moyen au Carbonifère inférieur, c'est-à-dire sur une durée d'environ 70 Ma, depuis l'apparition des premiers tétrapodes à l'Eifélien (hypothèse « basse ») jusqu'aux premiers reptiles confirmés du Viséen (Clack, 2002 ; Laurin, 2008 ; Steyer, 2009). Dans ce contexte, qualifier la découverte du plus ancien tétrapode fossile de « grenade évolutive » et le passage à la vie terrestre d'« événement dramatique » paraît pour le moins abusif et relève manifestement du journalisme. En ce qui concerne le passage des poissons aux tétrapodes, qu'est-ce qui est le plus significatif : les changements anatomiques, les changements dans le mode de locomotion (nage / marche sous l'eau), les changements écologiques ou d'environnement, le passage à la vie terrestre (réalisée seulement au Carbonifère) ? Ces réflexions me remettent en

mémoire l'article de Chaline *et al.* (1999) qui prétendaient que l'arbre de la vie avait une structure fractale. Plusieurs auteurs critiques (Lecointre, 1999 ; Picq, 1999 ; Tassy, 1999) ont montré que cette supposition était en fait fondée sur le choix arbitraire de quelques événements évolutifs au sein des différents exemples traités par Chaline *et al.* (1999 : arbre global de la vie, dinosaures, rongeurs, équidés, primates). Autrement dit, il est tentant en paléontologie de mettre en lumière un petit nombre d'événements évolutifs choisis et qualifiés de « majeurs ». Mais qu'est-ce qu'un événement en évolution ? Pourquoi et comment choisir des événements particuliers (cf. le débat sur le « poids » des caractères en analyse cladistique) ? Dans le cas de Chaline *et al.* (1999), les événements ont-ils été choisis à dessein afin de faire coller les événements à la « loi » (Lecointre, 1999) ? Sans vouloir répondre à toutes ces questions dans un article aussi court, il reste que ce sont souvent les auteurs eux-mêmes qui qualifient leurs propres découvertes de « majeures » (avec l'aide de quelques supports médiatiques), celles-ci s'insérant *in fine* dans l'arbre touffu des innovations évolutives « mineures ».

#### V. — CONCLUSION

Comme annoncé dans l'introduction, il ne s'agissait pas ici de montrer du doigt tel ou tel auteur ou telle ou telle découverte, mais de mettre en évidence, à partir de l'exemple de la découverte des plus anciens restes de tétrapode, d'une tendance certaine vers des dérives de type médiatique dans les publications scientifiques : nécessité absolue de « faire des coups médiatiques » en utilisant des méthodes et un vocabulaire plus près du journalisme que de la science. Cette tendance est probablement à mettre en relation, en première approximation, avec la dépendance croissante des scientifiques vis-à-vis de modes de financements de leurs recherches soit privés soit temporaires (financements sur projets), d'où le besoin de « se faire mousser » en permanence pour être plus efficaces que les concurrents dans la chasse aux crédits, aux sponsors, aux subventions ... Ce type de dérive apparaît dans les secteurs de recherche qui sont décriés comme étant plus intéressants pour le grand public par un nombre restreint de supports médiatiques tels que quelques grandes revues scientifiques généralistes à facteur d'impact élevé (*Nature*, *Science*, *PNAS*), quelques revues de vulgarisation scientifique (*La Recherche*, *Pour la Science* en France), voire quelques journaux quotidiens ou hebdomadaires ou des chaînes de télévision. Ces secteurs de recherche ne sont pas très nombreux, ils incluent « l'explosion cambrienne », l'origine des vertébrés, l'origine et la terrestrialisation des tétrapodes, la grande crise du Permien/Trias, « mère de toutes les crises biologiques », l'origine des angiospermes (plantes à fleurs), la crise du Crétacé/Cénozoïque (anciennement dénommée « Crétacé/Tertiaire ») et la disparition des dinosaures, la radiation des mammifères, l'origine des primates et des hominidés (dont le sens et le contenu varient en fonction des auteurs), l'origine et l'évolution « de l'homme » (aussi appelée « lignée humaine » : hominidés, homininés ou hominini ?). La plupart de ces thèmes ont d'ailleurs un fort contenu émotif/irrationnel : « explosion », « crise », « disparition », « monstres préhistoriques » ; ou sont purement et simplement anthropocentriques (« lignée humaine »). Dans un tel cadre, il est cependant permis de



« positiver » puisque certains collègues, s'ils admettent que ce programme est terriblement réductionniste, considèrent que ces quelques « produits d'appel » permettent d'attirer l'attention du public sur les travaux des paléontologues, d'attirer de jeunes élèves vers la paléontologie et d'entraîner d'autres recherches sur des sujets beaucoup moins « sexy » mais tout compte fait beaucoup plus utiles pour la société : recherches en micropaléontologie pour aider à la prospection et à la découverte de nouveaux gisements d'hydrocarbures — pétrole et gaz ; recherches en paléobotanique et en palynologie pour aider à la prospection et à la découverte de gisements de charbon ; recherches en palynologie dans le cadre des thématiques sur le réchauffement climatique ; pour ne citer que quelques exemples (cependant ces sujets de recherche ont leur dynamique propre qui est directement liée aux commandes soit de l'industrie soit de structures internationales comme le GIEC). *In fine*, ces réflexions relèvent des diverses opinions que l'on est amené à émettre sur les « compromissions » des paléontologues en particulier et des scientifiques en général vis-à-vis des milieux et des pouvoirs industriels et médiatiques. Ce phénomène est perceptible en particulier dans des disciplines proches de la paléontologie, comme l'archéologie, la préhistoire ou l'ethnologie où, comme le dit Plumet (2004, p. 140), il faut

« Publier pour exister », ce qui entraîne une « inflation et dévaluation de l'information scientifique. »

**Remerciements.** — Je voudrais remercier D. Goujet (MNHN, Paris) qui m'a initié de façon critique aux questions sur les environnements des premiers vertébrés ; G. Clément (MNHN, Paris) qui m'a incité à travailler sur les premiers tétrapodes, à la suite de sa découverte d'un ichthyostégide dans les collections de l'Université de Liège (Belgique), en m'invitant à chacune des campagnes de fouilles et de prospection qu'il organise annuellement dans le Famennien du Condroz (massif ardennais) ; G. Clément et O. Lebedev (Académie des Sciences de Russie, Moscou) pour m'avoir invité à participer au Projet International de Coopération Scientifique (PICS) entre le CNRS et la Russian Foundation for Basic Research (RFBR) sur « Origine, écologie, et environnements des premiers tétrapodes du Dévonien supérieur (Frasnien) et paléogéographie de l'est du "Continent des Vieux Grès Rouges" » (2009-2011). Mes remerciements vont également à H.-P. Schultze (University of Kansas, Lawrence, Kansas, USA) pour les discussions que nous avons eues sur le problème du milieu de vie des premiers tétrapodes, et à D. George (St Peter's Engineering College, Chennai, Tamil Nadu, Inde) pour m'avoir questionné sur l'origine des tétrapodes, ce qui a eu pour résultat une collaboration entre un biomoléculariste et un paléontologue, qui illustre l'un des aspects des recherches actuelles sur l'évolution. Enfin, merci aux deux rapporteurs, F. Amédéo (Calais) et H. Lelièvre (MNHN, Paris) pour leurs remarques critiques constructives.

## BIBLIOGRAPHIE

- AHLBERG P.E., CLACK J.A., LUKSEVICS E., BLOM H. & ZUPINS I. (2008). — *Ventastega curonica* and the origin of tetrapod morphology. *Nature*, **453** (7199) : 1199-1204 ; + Supplementary Informations : 20 p., 5 fig.
- ASTIN T.R., MARSHALL J.E.A., BLOM H. & BERRY C.M. (2010). — The sedimentary environment of the Late Devonian East Greenland tetrapods. *In* : VECOLI M., CLEMENT G. & MEYER-BERTHAUD B. (eds), *The Terrestrialization Process : Modelling Complex Interactions at the Biosphere-Geosphere Interface*. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, **339** : 93-109.
- BLIECK A. (1985). — Paléoenvironnements des Hétérotracés, Vertébrés agnathes ordoviciens à dévoniens. *In* : FISCHER J.-C. (organ.), *Journées d'étude sur les indicateurs paléobiologiques de milieux* (RCP 641, Paris, 26-27 mars 1984). *Bull. Mus. nat. Hist. nat.*, 4e sér., **7**, C (2) : 143-155.
- BLIECK A., CLEMENT G., BLOM H., LELIEVRE H., LUKSEVICS E., STREEL M., THOREZ J. & YOUNG G.C. (2007). — The biostratigraphical and palaeogeographical framework of the earliest diversification of tetrapods (Late Devonian). *In* : BECKER R.T. & KIRCHGASSER W.T. (eds.), *Devonian Events and Correlations*. *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, **278** : 219-235.
- BLIECK A., CLEMENT G. & STREEL M. (2010). — The biostratigraphical distribution of earliest tetrapods (Late Devonian) — a revised version with comments on biodiversification. *In* : VECOLI M., CLEMENT G. & MEYER-BERTHAUD B. (eds), *The Terrestrialization Process : Modelling Complex Interactions at the Biosphere-Geosphere Interface*. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, **339** : 129-138.
- BLOM H., CLACK J.A., AHLBERG P.E. & FRIEDMAN M. (2007). — Devonian vertebrates from East Greenland: a review of faunal composition and distribution. *Geodiversitas*, **29** (1) : 119-141.
- BOULVAIN F. (2010). — *Une introduction à la géologie de la Wallonie*. Université de Liège, Département de Géologie ; World Wide Web address : <http://www2.ulg.ac.be/geolsed/geolwal/geolwal.htm>
- CARR R.K. & JACKSON G.L. (2009). — The vertebrate fauna of the Cleveland Member (Famennian) of the Ohio Shale. *In* : *Guide to the Geology and Paleontology of the Cleveland Member of the Ohio Shale* (68th Annual Meeting Soc. Vert. Paleont., Cleveland, Ohio, Oct. 15-18, 2008). *Ohio Geol. Surv. Guidebook*, **22**, chapter 5 : 17 p.
- CHALINE J., NOTTALE L. & GROU P. (1999). — L'arbre de la vie a-t-il une structure fractale ? *C. R. Acad. Sci. Paris, Sci. Terre & Planètes*, sér. II, **328** (11) : 717-726.
- CLACK J.A. (1997). — Devonian tetrapod trackways and trackmakers; a review of the fossils and footprints. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, **130** : 227-250.
- CLACK J.A. (2002). — *Gaining Ground : The Origin and Evolution of Tetrapods*. Indiana University Press, Bloomington and Indianapolis : ix + 369 p.
- CLACK J.A. (2006). — The emergence of early tetrapods. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, **232** (2-4) : 167-189.
- CLACK J.A. (2007). — Devonian climate change, breathing, and the origin of the tetrapod stem group. *Integr. Compar. Biol.*, **47** (5) : 510-523.
- CLEMENT G. (2002). — Large Tristichopterygidae (Sarcopterygii, Tetrapodomorpha) from the Late Famennian Evieux Formation of Belgium. *Palaeontology*, **45** (3) : 577-593.
- CLEMENT G., AHLBERG P.E., BLIECK A., BLOM H., CLACK J.A., POTY E., THOREZ J. & JANVIER P. (2004). — Devonian tetrapod from western Europe. *Nature*, **427** (6973) : 412-413.
- CLEMENT G. & BOISVERT C. (2006). — Lohest's true and false 'Devonian amphibians': evidence for the rhynchodipterid lungfish *Soederberghia* in the Famennian of Belgium. *Jl. Vert. Paleont.*, **26** (2) : 276-283.
- CLEMENT G. & LETENNEUR C. (2009). — L'émergence des tétrapodes — une revue des récentes découvertes et hypothèses. *C. R. Palevol*, **8** (2-3) : 221-232.

- CLEMENT G. & PRESTIANNI C. (2009). — Fauna, flora and paleoenvironment of the Upper Devonian tetrapod-bearing locality of Strud, Belgium. In : GODEFROIT P. & LAMBERT O. (eds.), *Tribute to Charles Darwin and Bernissart Iguanodonts* (EAVP Extraordinary Meeting, Brussels, 2009). Programme, abstracts and field trips guidebook : 105-115.
- CLEMENT G., SNITTING D. & AHLBERG P.E. (2009). — A new tritichopterid (Sarcopterygii, Tetrapodomorpha) from the Upper Famennian Evieux Formation (Upper Devonian) of Belgium. *Palaeontology*, **52** (4) : 823-836.
- CRESSLER III W.L. (2006). — Plant paleoecology of the Late Devonian Red Hill locality, north-central Pennsylvania, an *Archaeopteris*-dominated wetland plant community and early tetrapod site. In : GREB S.F. & DIMICHELE W.A. (eds.), *Wetlands through time*. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* **399** : 79-102.
- CRESSLER III W.L., DAESCHLER E.B., SLINGERLAND R. & PETERSON D.A. (2010). — Terrestrialization in the Late Devonian: a palaeoecological overview of the Red Hill site, Pennsylvania, USA. In : VECOLI M., CLEMENT G. & MEYER-BERTHAUD B. (eds.), *The Terrestrialization Process: Modelling Complex Interactions at the Biosphere-Geosphere Interface*. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.* **339** : 111-128.
- DAESCHLER E.B. (2000). — Early tetrapod jaws from the Late Devonian of Pennsylvania, USA. *Jl. Paleont.*, **74** : 301-308.
- DAESCHLER E.B., SHUBIN N.H., THOMSON K.S. & AMARAL W.W. (1994). — A Devonian tetrapod from North America. *Science*, **265** : 639-642.
- DAESCHLER E.D., FRUMES A.C. & MULLISON F. (2003). — Groenlandaspid placoderm fish from the Late Devonian of North America. *Rec. Austral. Mus.*, **55** : 45-60.
- DE RICQLES A. (2000). — Le problème de l'origine des tétrapodes hier et aujourd'hui. *Bull. Soc. Herp. Fr.*, **96** : 39-55.
- DOWNS J.P. & DAESCHLER E.B. (2001). — Variation within a large sample of *Ageleodus pectinatus* teeth (Chondrichthyes) from the Late Devonian of Pennsylvania, U.S.A. *Jl. Vert. Paleont.*, **21** : 811-814.
- GOUJET D. (1984). — Les Poissons Placodermes du Spitsberg : Arthroires Dolichothoraci de la Formation de Wood Bay (Dévonien inférieur). *Cah. Paléont. (Vertébrés)*, C.N.R.S. édit., Paris : 284 p.
- GOURAMANIS C., WEBB J.A. & WARREN A.A. (2003). — Fluviodeltaic sedimentology and ichnology of part of the Silurian Grampians Group, western Victoria. *Austral. Jl. Earth Sci.*, **50** (5) : 811-825.
- GRADSTEIN F.M., OGG J.G. & SMITH A.G. eds. (2004). — *A Geologic Time Scale 2004*. Cambridge University Press, Cambridge : 589 p.
- JANVIER P. (1996). — *Early Vertebrates*. Oxford Science Publications, Clarendon Press, Oxford : 393 p.
- JANVIER P. (2010). — Terrestrialization: the early emergence of the concept. In : VECOLI M., CLEMENT G. & MEYER-BERTHAUD B. (eds.), *The Terrestrialization Process: Modelling Complex Interactions at the Biosphere-Geosphere Interface*. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, **339** : 5-9.
- JANVIER P. & CLEMENT G. (2005). — A new groenlandaspid arthrodire (Vertebrata: Placodermi) from the Famennian of Belgium. *Geologica Belgica*, **8** (1-2) : 51-67.
- JANVIER P. & CLEMENT G. (2010). — Muddy tetrapod origins. *Nature*, **463** (7277) : 40-41.
- LAURIN M. (2008). — *Systématique, paléontologie et biologie évolutive moderne: l'exemple de la sortie des eaux chez les vertébrés*. Ellipses, Paris : 176 p.
- LAURIN M. & SOLER-GIJON R. (2010). — Osmotic tolerance and habitat of early stegocephalians: indirect evidence from parsimony, taphonomy, palaeobiogeography, physiology and morphology. In : VECOLI M., CLEMENT G. & MEYER-BERTHAUD B. (eds.), *The Terrestrialization Process: Modelling Complex Interactions at the Biosphere-Geosphere Interface*. *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, **339** : 151-179.
- LEBEDEV O. (2004). — A new tetrapod *Jakubsonia livnensis* from the Early Famennian (Devonian) of Russia and palaeoecological remarks on the Late Devonian tetrapod habitats. *Acta Universitatis Latviensis, Earth and Environment Sciences*, **679** : 79-98.
- LECOINTRE G. (1999). — Réfutation de la « loi de l'évolution ». Attention au bogue de l'an 800 000. *Charlie Hebdo*, **378** (15 septembre 1999) : 6.
- LECOINTRE G. & LE GUYADER H. (2009). — *Classification phylogénétique du vivant*. 3<sup>e</sup> édition revue et augmentée. Belin édit., Paris : 569 p. + hors texte (illustrations de D. Visset).
- LELIEVRE H. (2002). — *Phylogénie des Brachythoraci (Vertebrata, Placodermi) et ajustement de la phylogénie à la stratigraphie. Les sites du Dévonien terminal, la caractérisation de leur milieu de dépôt par analyse de similitude de leur ichthyofaune*. H.D.R. Sci. Nat., Univ. Sci. Techn. Lille, Villeneuve d'Ascq (12 déc. 2002) : 191 + xxvii p. [ronéotypé].
- LELIEVRE H., GOUJET D., BLIECK A. & JANVIER P. (1988). — Poissons du Dévonien du Boulonnais (France). In : BRICE D. (ed.), *Le Dévonien de Ferques, Bas-Boulonnais (N. France). Paléontologie-Sédimentologie-Stratigraphie-Tectonique. Biostratigraphie du Paléozoïque*, **7** : 503-522.
- LELIEVRE H., ZARAGUETA BAGILS R. & ROUGET I. (2008). — Temporal information, fossil record and phylogeny. *C. R. Palevol*, **7** : 27-36.
- LOHEST M. (1888a). — Découverte du plus ancien amphibien connu et de quelques fossiles remarquables dans le Famennien supérieur de Modave. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **XV** [1887-1888], *Bulletin* : CXX - CXXVII.
- LOHEST M. (1888b). — Recherches sur les poissons des terrains paléozoïques de Belgique. Poissons des psammites du Condroz, Famennien supérieur. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, **XV** [1887-1888], *Mémoire* : 112-203.
- LUCIFORA L.O. & VASSALLO A.I. (2002). — Walking in skates (Chondrichthyes, Rajidae): anatomy, behaviour and analogies to tetrapod locomotion. *Biol. Jl. Linn. Soc.*, **77** : 33-41.
- MARSHALL J., BROWN J., NEWMAN M. & DAVIDSON B. (2010). — *The Old Red Sandstone of Scotland - IPC3 Pre-Conference Field Trip (23-26 June 2010)*. Subcommission on Devonian Stratigraphy : 53 p.
- MARTIN R.A. (2004). — *Missing Links: Evolutionary Concepts and Transitions through Time*. Jones and Bartlett, Sudbury, MA : 303 p.
- MATTHEWS S.C. (1973). — Notes on open nomenclature and on synonymy lists. *Palaeontology*, **16** (4) : 713-719.
- NIEDZWIEDZKI G., SZREK P., NARKIEWICZ K., NARKIEWICZ M. & AHLBERG P.E. (2010). — Tetrapod trackways from the early Middle Devonian period of Poland. *Nature*, **463** : 43-48 ; Supplementary Information : 13 p., 25 fig., 3 vidéos.

- PBD (2010). — †*Ageleodus* Owen 1867 (cartilaginous fish). The Palaeobiology Database; World Wide Web address : <http://www.paleodb.org/cgi-bin/bridge.pl>
- PICQ P. (1999). — Fractales fatales : la polémique — L'équation inconnue de l'homme. *Libération*, 7 septembre 1999 : 31.
- PLUMET P. (2004). — *Des mythes à la Préhistoire – Peuples du Grand Nord I*. Préface de L.-E. Hamelin. Editions Errance, Paris : 322 p.
- RETALLACK G.J., HUNT R.R. & WHITE T.S. (2009). — Late Devonian tetrapod habitats indicated by paleosols in Pennsylvania. *Jl. Geol. Soc. London*, **166** : 1143-1156.
- ROMER A.S. (1933). — *Man and the Vertebrates*. University of Chicago Press, Chicago.
- ROMER A.S. (1958). — Tetrapod limbs and early tetrapod life. *Evolution*, **12** : 365-369.
- SCHULTZE H.-P. (1997). — Umweltbedingungen beim Übergang von Fisch zu Tetrapode [Paleoenvironment at the transition from fish to tetrapod]. *Sitzber. Ges. Naturforsch. Freunde Berlin*, (N.F.) **36** : 59-77. [En Allemand, avec résumé en Anglais]
- SCHULTZE H.-P. (1999). — The Fossil Record of the Intertidal Zone. In : HORN M.H., MARTIN K.L.M. & CHOTKOWSKI M.A. (eds.), *Intertidal Fishes - Life in Two Worlds*. Academic Press, San Diego and London : 373-392.
- SCHULTZE H.-P. (2009). — Interpretation of marine and freshwater paleoenvironments in Permo-Carboniferous deposits. *Palaeogeogr., Palaeoclimat., Palaeoecol.*, **281** : 126-136.
- SCHULTZE H.-P. & CLOUTIER R. (1996). — Comparison of the Escuminac Formation ichthyofauna with other late Givetian / early Frasnian ichthyofaunas. In : SCHULTZE H.-P. & CLOUTIER R. (eds.), *Devonian fishes and plants of Miguasha, Quebec, Canada*. Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München : 348-368.
- SPJELDNAES N. (1982). — Palaeoecology of *Ichthyostega* and the origin of the terrestrial vertebrates. In : GALLITELLI E.M. (ed.), *Palaeontology, essential of historical geology* (Venice, 1981). Mucchi, Modena : 323-343.
- STEYER S. (2009). — *La Terre avant les dinosaures*. Illustré par A. Benéteau. Belin / Pour la Science, Paris : 205 p.
- TASSY P. (1999). — Fractales fatales : la polémique — Ce que cache cet arbre. *Libération*, 7 septembre 1999 : 31.
- THOREZ J., GOEMAERE E. & DREESEN R. (1988). — Tide- and wave-influenced depositional environments in the Psammites du Condroz (Upper Famennian) in Belgium. In : DE BOER P.L. et al. (eds), *Tide-Influenced Sedimentary Environments and Facies*. D. Reidel Publ. : 389-415.
- THOREZ J., STREEL M., BOUCKAERT J. & BLESS M.J.M. (1977). — Stratigraphie et paléogéographie de la partie orientale du Synclinorium de Dinant (Belgique) au Famennien supérieur : un modèle de bassin sédimentaire reconstitué par analyse pluridisciplinaire sédimentologique et micropaléontologique. *Meded. Rijks Geol. Dienst, N.S.*, **28** (2) : 17-28.
- WARREN A., JUPP R. & BOLTON B. (1986). — Earliest tetrapod trackway. *Alcheringa*, **10** : 183-186.
- YOUNG G.C. (2006). — Biostratigraphic and biogeographic context for tetrapod origins during the Devonian: Australian evidence. In : REED L., BOURNE S., MEGIRIAN D., PRIDEAUX G., YOUNG G. & WRIGHT A. (eds), *Proceedings of CAVEPS 2005. Alcheringa, Spec. Iss.* **1** : 409-428.
- ZANGERL R. (1981). — Chondrichthyes I. Paleozoic Elasmobranchii. In : SCHULTZE H.-P. (ed.), *Handbook of Paleoichthyology*, vol. 3A, G. Fischer Verlag, Stuttgart and New York : 114 p.



## JOSEPH GODON (1858 – 1932), UN NATURALISTE DU CAMBRESIS

### *Joseph GODON (1858 – 1932), a Cambrai district naturalist*

par Pierre LEMAITRE (\*) et Thierry OUDOIRE (\*\*)

*Résumé.* — En 1932, Pierre Pruvost saluait la mémoire de Joseph Godon, bref président de la Société Géologique du Nord, par ces mots : "Les géologues du Nord de la France avaient choisi comme Président, dans une parfaite manifestation d'unanimité, celui auquel nous rendons aujourd'hui les ultimes devoirs. [...] Vous avez été celui qui sait et celui qui admire". Connu pour la découverte de la faune quaternaire de Saint Druon (quartier de Cambrai), Joseph Godon, chanoine et professeur de sciences, étudia d'autres disciplines que la géologie. A la lumière de récentes recherches, le présent article a pour but de présenter la vie et l'œuvre de ce véritable naturaliste régional.

*Abstract.* — In 1932, Pierre Pruvost saluted the memory of Joseph Godon, briefly President of the Société Géologique du Nord, by these words : "The northern France geologists chose as President, in a perfect display of unanimity, the person we are giving the lasts duties. [...] You have been the one who knows and the one who admires". Known for the discovery of the Saint Druon (Cambrai district) quaternary fauna, Joseph Godon, canon and sciences teacher, studied other "domains" than geology. Enlightened by recent researches, this article presents life and works of this regional naturalist.

Mots-clés : Histoire des sciences, cambrésis, naturaliste, botanique, géologie du quaternaire

Key-words : Science history, Cambrai district, naturalist, botany, quaternary geology

### I. — INTRODUCTION

Joseph Godon (Fig. 1) est né le 1<sup>er</sup> janvier 1858 à Havrincourt (village situé à une douzaine de kilomètres au sud-ouest de Cambrai), où son père exerçait le métier de charron. Joseph est d'abord scolarisé à l'école du village ; il y fait preuve de qualités intellectuelles qui incitent ses parents à lui faire suivre les cours des Frères des Écoles Chrétiennes à Cambrai. Il réussit brillamment. Toutefois, à la suite d'une réprimande assez sévère de son oncle maternel chez qui il est installé, il décide de rentrer à pied chez ses parents et de ne plus y retourner. Il poursuit alors ses études à Havrincourt pendant deux ans, partageant son temps entre la classe et le bois situé au sud-ouest du village. Son goût pour les sciences naturelles et sa vocation de prêtre sont peut-être nés là, à cette époque, dans ce lieu propice à l'émerveillement de la création et au recueillement.

Distingué par le doyen d'Havrincourt, il devient enfant de chœur en 1870. Un de ses cousins, Valère Foulon, jeune abbé et professeur au Collège libre de Notre-Dame des Anges à Saint-Amand (et futur supérieur de l'Institution Notre-Dame de Grâce à Cambrai), propose aux parents de lui confier l'enfant. La rentrée suivante, Joseph part à Saint-Amand où il reste deux ans. S'orientant vers le sacerdoce, il entre ensuite au Petit Séminaire de Cambrai. Joseph Godon est l'un des rares élèves désignés par les professeurs pour affronter la première

partie du baccalauréat. Il est reçu avec la mention honorable. Après avoir terminé sa Rhétorique, il quitte le Petit Séminaire en confirmant sa vocation.

### II. — UN PROFESSEUR AVANT TOUT

Ses excellentes dispositions pour les sciences lui permettent de passer l'année 1877 dans les Facultés Catholiques de Lille, récemment créées, afin d'être autorisé à enseigner. Il y découvre les méthodes scientifiques et élargit ses champs de recherches. A cette époque, les séminaristes que leur âge n'obligeait pas à commencer immédiatement leurs études théologiques étaient envoyés comme professeurs-abbés dans les nombreux collèges libres du département du Nord. Joseph Godon fut nommé professeur de matières scientifiques au collège Notre Dame de Cambrai, alors situé rue St Fiacre (l'actuelle caserne des pompiers), en 1878. Il fut heureux d'y retrouver son cousin, l'abbé Foulon, transféré de Bailleul où il enseignait la philosophie. La durée du stage des professeurs-abbés était alors de trois ans au maximum, l'abbé Godon enseigna une année supplémentaire : arrivé en octobre 1878, il ne quitta le collège qu'en août 1882.

En octobre 1882, il entra au Grand Séminaire de Cambrai pour y faire sa Théologie et fut ordonné prêtre le 29 Juin

(\*) 293 Rue Léon Blum – 59 281 Rumilly en Cambrésis ; pilemaitre@nordnet.fr

(\*\*) Musée d'Histoire naturelle de Lille 19, rue de Bruxelles 59000 Lille ; toutoird@mairie-lille.fr



Le Chanoine GODON

Fig. 1. — Joseph Godon en 1930 (© Société d'Émulation de Cambrai).

Fig. 1. — Joseph Godon in 1930 (© Emulation Society of Cambrai).

1885, à vingt-six ans. A nouveau, sur les instances de M. Foulon, il fut désigné professeur à Notre-Dame de Grâce ; il devait y passer le reste de son existence, jusqu'en avril 1932, enseignant un moment les mathématiques, mais plus durablement la physique, la chimie et les sciences naturelles.

### III. — UNE PASSION POUR LA BOTANIQUE

A des fins d'études et d'illustration de ses cours, Joseph Godon s'attacha à collecter et décrire la flore du Cambrésis, zone de plateaux limoneux reliant les collines de l'Artois, des Ardennes, des bassins versants et de la vallée de l'Escaut, située à proximité des marais de la Sensée et du Bassin Houiller. Professeur-abbé, il avait constitué un herbier des plantes qui poussent spontanément sur le territoire du Cambrésis. Exposé en 1887 dans la section scolaire au concours agricole de Carnières, cet herbier obtint une médaille d'honneur. Membre du Comice Agricole en 1888, il en devint l'un des doyens et fit partie, chaque année, de l'un des jurys des concours agricoles de l'arrondissement. Élu membre de la Société d'Émulation de Cambrai le 5 décembre 1889, il donna lecture d'une note sur la flore du Cambrésis qui fut publiée dans les Mémoires de cette société (Godon, 1889).

En 1894, il présenta un nouvel herbier plus savamment disposé et plus complet au concours agricole de Carnières : le jury lui décerna un objet d'art et le classa hors concours.

Le démantèlement durant la dernière décennie du XIX<sup>ème</sup> siècle (Fig. 2) des remparts qui entouraient la ville de Cambrai depuis 1677 et sa prise par Louis XIV, lui permit d'envisager une étude comparative de la flore croissant au voisinage de constructions militaires et celle qui pousserait après le démantèlement (Godon, 1897) : "A la suite du démantèlement, des plantes ont disparu ; il m'a paru utile d'en dresser la liste : plusieurs de ces types ne se retrouvent sur aucun point de la région du Nord". Suivant les méthodes de Gaston Bonnier et Georges de Layens, ses observations sont organisées en une série de planches précises agrémentées par des textes explicatifs permettant d'identifier les plantes de manière simple par leurs caractéristiques apparentes. Il découpa le Cambrésis en cinq zones et nomma les différentes parties de terrain (chacune identifiée par la nature du sol, l'exposition,...) de chaque territoire ainsi défini, afin de lier les plantes au milieu : parties basses des villes ; pentants des vallées et ravins ; sommets des plateaux (buttes tertiaires boisées) ; remparts de Cambrai ; vieux murs et voies ferrées. La fréquence de chaque plante sauvage est précisée chaque fois que possible. Toutes les configurations étaient observées, analysées et revisitées régulièrement, de sorte que peu de choses lui échappaient. La moindre « nouveauté » était repérée et recensée dans ses cahiers régulièrement tenus à jour (il existe encore un cahier dans les Archives de Notre Dame).

Son herbier, régulièrement mis à jour et déposé dans la bibliothèque de l'Institution Notre Dame, n'a pas été retrouvé, sans doute perdu lors de la Seconde Guerre Mondiale. Si les fichiers du Conservatoire botanique national de Bailleul sont régulièrement mis à jour par les apports des botanistes amateurs régionaux et si l'on trouve quelques publications locales sur ce sujet (ACTE, 1979)<sup>(1)</sup>, il n'existe pas de « Flore du Cambrésis » plus récente que celle réalisée par Joseph Godon, véritablement Le botaniste du Cambrésis.

Les terrains libérés par le démantèlement des remparts permirent un accroissement de la surface constructible. Avec le soutien financier d'Ernest Delloye, industriel cambrésien, le Collège Notre Dame quitta les locaux qu'il occupait depuis 1876 pour intégrer un nouveau bâtiment en 1901. Des éléments de fortifications y sont encore apparents dans les cuisines de l'établissement qui sont même percées par un souterrain (un comblement en limite la longueur à une dizaine de mètres). Joseph Godon profita de la construction du nouvel édifice pour obtenir trois salles : deux étaient destinées à l'enseignement (séparées de la rue par un couloir pour isoler des bruits extérieurs), la troisième salle était équipée en armoires vitrées pour accueillir les collections et effectuer les préparations. L'une des portes du laboratoire est toujours surmontée d'une plaque dédiée à Joseph Godon ; l'une des classes était ornée d'un portrait de Jules Gosselet, natif du Cambrésis, premier professeur de géologie à la Faculté des Sciences de Lille, fondateur de la Société Géologique du Nord et des Musées de Géologie de Lille.

(1) Le numéro spécial, intitulé « Chés plantes d'ichi, pi c'min qu'in s'in sert », publié en 1979 par l'Association des Amis du Château et du Terroir d'Esnes, recense une centaine de plantes locales ayant des vertus alimentaires, médicinales, tinctoriales ou industrielles. Il ne s'agit pas d'une flore proprement dite mais d'un recueil de végétaux choisis et étudiés pour leur utilisation domestique.



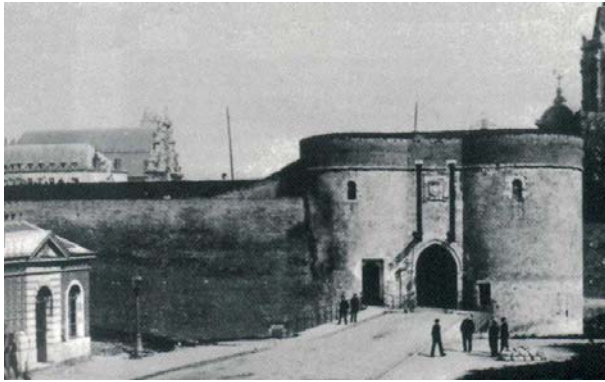


Fig. 2. — Les anciennes murailles entourant la ville de Cambrai (© Médiathèque de Cambrai) ; le collège Notre Dame est visible à gauche derrière la muraille. Le nouveau collège construit en 1901 se trouve à l'endroit d'où est prise la photographie.

Fig. 2. — Former bulwarks surrounding the city of Cambrai (© Media library of Cambrai) ; the middle school is visible at the left, behind the wall. The new middle school built in 1901 is towards where is taken the photography.

En 1909, l'Association Française pour l'Avancement des Sciences tint son congrès à Lille. A cette occasion, on publia un bel ouvrage qui fut offert aux congressistes : « *Lille et la région du Nord en 1909* ». On demanda à l'abbé Godon sa collaboration ; il y publia un chapitre intitulé « *Caractéristiques de la Flore du département du Nord* », qui résumait ses recherches. L'abbé Godon étudia également les plantes de l'Avesnois et consigna le fruit de ses recherches dans une véritable flore de la région, modestement intitulée « *Promenades botaniques dans l'Avesnois* » (Godon, 1910).

La ville de Cambrai fut durement touchée durant la Première Guerre Mondiale et les destructions furent nombreuses. Arrêté brièvement en 1914, Joseph Godon fut sommé de quitter le bâtiment transformé en hôpital militaire ; les collections (desquelles disparurent de nombreux échantillons et des cartes) furent transférées à Valenciennes jusqu'à la fin de la guerre. La période de reconstruction fut assez longue, ce qui permit le développement d'une végétation sur les gravats. Godon en fit l'étude (Godon, 1926a) et dénombra 4 types d'arbres ou arbustes ainsi que 127 espèces (réparties dans 32 familles) : "*la florule présente de nombreux nitrophytes [...] nous les voyons disparaître à mesure que nos maisons se relèvent ; elles ont été commensales depuis la grande guerre ; aux ruines de la cité mutilée, elles ont donné une parure qui n'est pas dénuée de charme*".

Les sciences furent écartées des programmes, Joseph Godon enseigna alors temporairement d'autres matières. Il assura les offices de plusieurs paroisses (Ramillies, Masnières, Esuars, Escaudoeuvres) et fut nommé chanoine titulaire de la Cathédrale de Cambrai en 1928.

#### IV. — UN ZOOLOGISTE COMPLET

Joseph Godon livrait les résultats de ses recherches botaniques et zoologiques aux membres de la Société

d'Émulation de Cambrai (Godon, 1899, 1897, 1926a, 1926b, 1926c). Observant les rivières, étangs, mares et autres pièces d'eau du Cambrésis, de l'Aisne et de la Somme, il publia une étude sur les crustacés amphipodes d'eau douce (Godon, 1913). Notant que les chemins de fer pourraient être le vecteur essentiel de leur mode d'occupation du Cambrésis, Godon tenta d'expliquer l'origine géographique de certaines espèces de gastéropodes (Godon, 1926b, dont un manuscrit existe aux Archives de Notre Dame de Cambrai). Ses devoirs de prêtre et ses enseignements effectués, Joseph Godon pouvait arpenter les chemins du Cambrésis. Il découvrit ainsi, aux environs d'Esnes, le batracien *Pelodytes punctatus* et le décrivit dans la "*Feuille des jeunes naturalistes*" (Godon, 1899, 1900, 1925b), publication à destination des amateurs de sciences naturelles. Il monta également une collection d'insectes régionaux et d'Afrique du Nord. Ces collections d'insectes ont été restaurées depuis le milieu des années 1990 par un professeur également entomologiste amateur. Une centaine de naturalisations, essentiellement des oiseaux et quelques mammifères régionaux existent toujours dans l'un des bâtiments du Centre de Formation Pédagogique de Cambrai (récemment transféré à Lille).

#### V. — DES DECOUVERTES GEOLOGIQUES

Entretenant des relations avec les géologues de la Faculté des Sciences de Lille, parmi lesquels on peut citer Jules Gosselet, Charles Barrois et Maurice Leriche, Joseph Godon devint membre de la Société Géologique du Nord en 1892. Il organisa et prit part à de nombreuses excursions entre 1910 et 1932 (à une fréquence presque annuelle durant cette période). Il fut à l'origine de la découverte d'une faune froide du quaternaire dans le quartier Saint Druon (Godon, 1906), dont certains spécimens cités (notamment *Citellus rufescens* KEYSERLING & BLASIUS, *Cervus tarandus* LINNE, *Mammuthus primigenus* BLUMENBACH et *Coelodonta antiquitatis* BLUMENBACH), sont conservés dans les collections géologiques du Musée d'Histoire naturelle de Lille. Cette découverte, et l'ensemble des travaux qui en découlèrent lui valurent l'attribution, en 1908, du Prix Debray par la Société des Sciences ; Charles Barrois, rapporteur, fit pour l'occasion un éloge du modeste savant. En 1913, Joseph Godon participe à l'étude du réseau hydrographique du Cambrésis (Fig. 3) avec Louis Dollé (1878 - 1965), premier Professeur d'Hydrogéologie à la Faculté des Sciences de Lille (Godon, 1913). Ces travaux seront complétés par Antoine Bonte (1908 - 1995) et serviront de base à l'analyse de la nappe de la craie (Bonte *et al.* 1955 ; Bonte, 1958). La surface piézométrique et le réseau établis servent toujours de référence pour l'Agence de l'Eau Artois-Picardie.

Participant à de nombreuses discussions lors des séances de la Société Géologique du Nord, Joseph Godon fut, selon les usages <sup>(2)</sup>, élu vice-président en 1930 puis, succédant à Alfred Dubernard, devint président en 1932. Son étude sur les « *Fossiles du tuf calcaire de Moislains (Somme)* » fut publié à titre posthume (Godon, 1932). Les collections géologiques encore conservées à l'Institution Notre Dame représentent près de 110 tiroirs. Les spécimens sont organisés en supports de cours, selon différentes disciplines (minéralogie, paléontologie et pétrographie régionales). Les échantillons, environ 10 000 spécimens, disposés dans des boîtes cartonnées et encore étiquetés pour une bonne part (60%),



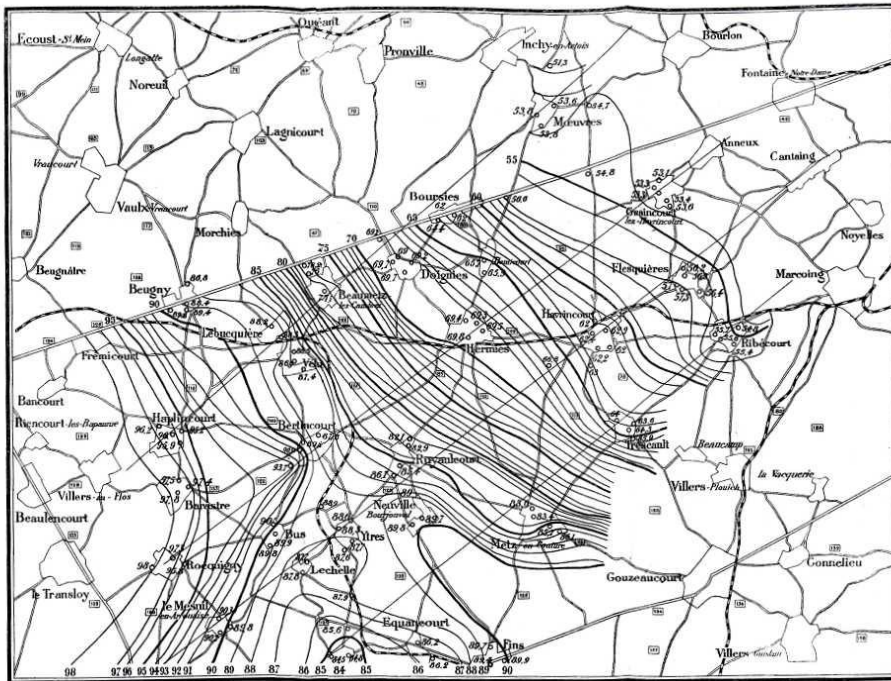


Fig. 3. — Surface piézométrique et réseau aquifère au sud-ouest de Cambrai au 1/80 000<sup>e</sup> (Godon, 1913).

Fig. 3. — Water-bearing network in the southwest of Cambrai, scale : 1/80 000<sup>e</sup> (Godon, 1913).

illustrent l'ensemble des roches régionales, mais proviennent également d'autres pays européens et d'anciens comptoirs naturalistes parisiens.

## VI. — CONCLUSION

A soixante-quatorze ans, Joseph Godon parcourait encore la campagne pour compléter ses collections et continuer ses recherches. Sa disparition brutale en 1932 suscita une vive émotion au sein des communautés religieuse, éducative et scientifique. Il venait de reconstituer une collection de valves et de coquilles de mollusques d'eau douce régionaux, démembrée en 1918 et s'appretait à en rédiger une publication. De nombreux discours furent tenus lors de ses funérailles, parmi lesquels on peut citer ceux du Docteur Daillez, Secrétaire Général de la Société d'Émulation de Cambrai et de Pierre Pruvost, Professeur à la Faculté des Sciences de Lille et représentant de la S.G.N. (Pruvost, 1932). Tombés dans l'oubli, les collections et l'ensemble des travaux de Joseph Godon ont été rassemblés par Pierre Lemaître,

ancien professeur à l'Institution Notre-Dame. Cet article et la conservation d'une partie des collections rassemblées par Joseph Godon au sein du Musée d'Histoire naturelle de la ville de Lille, constituent un hommage à l'œuvre de cet homme considéré comme Le botaniste du Cambrésis, profondément attaché à sa région natale (refusant même un poste de professeur à l'Université de Lille en 1898), mais aussi professeur dont la démarche pédagogique était fondée sur l'observation et le questionnement <sup>(3)</sup>, passionné de sciences investi dans différentes sociétés savantes, et avant tout un naturaliste.

**Remerciements.** — Les auteurs tiennent à remercier Messieurs Alain Blicck, Patrick De Wever et Jean-Pierre Laveine pour leur patience. Nous souhaitons associer à cet article Madame Clotilde Herbert de la Médiathèque de Cambrai, Madame Chantal De Gaye du Musée d'Histoire Naturelle de La Rochelle, Monsieur Bernard Dumortier Directeur de l'Institution Notre Dame de Cambrai, Monsieur l'Archiviste de l'Institution Notre Dame de Cambrai, Monsieur le Président de la Société d'Émulation de Cambrai, Monsieur le Président du Conservatoire national botanique de Bailleul.

(2) Le vice-président de la S.G.N. était élu pour un mandat d'une année puis remplaçait le Président de l'exercice précédent.

(3) Pierre Pruvost rendit hommage par ces mots : « Les qualités de professeur de M. Godon ? Elles ont, je le soupçonne, été un peu méconnues de ceux même qui auraient dû en tirer orgueil: Je ne connais pas un établissement d'enseignement, même officiel, dans le Nord de la France, où les élèves aient eu la chance de posséder un maître en sciences naturelles aussi excellent. D'ailleurs, au baccalauréat, on reconnaissait de loin ceux qui avaient été formés par lui. Je m'explique : au lieu de développer un programme livresque, en vue d'un examen, il saisissait le rôle réel des sciences naturelles dans l'éducation, qui est de développer chez l'enfant et le jeune homme le sens de l'observation, si utile dans la vie, complément efficace des humanités, c'est-à-dire susceptible de contribuer à la formation de l'homme, qu'il se destine à faire un industriel, un ingénieur, un artiste, un savant, un agriculteur, ou simplement un père de famille, ou mieux un conducteur d'âmes. L'esprit d'observation est une des armes les plus utiles à l'homme dans le cours de la vie. C'est pourquoi le chanoine Godon faisait sa classe de sciences naturelles non sur les livres, mais en étudiant les fleurs ou les animaux rapportés de la dernière promenade. Pour faire cela, il faut être soi-même un naturaliste accompli, et c'est pourquoi de tels professeurs sont rares. » (Pruvost, 1932).

BIBLIOGRAPHIE

- DE WEVER P., VILLAIN A. & coll. (1979). — Chés plantes d'ichi, pi c'min qu'in s'in sert. Association des Amis du Château et du Terroir d'Esnes (ACTE) Ed., 248 p.
- BONTE A. (1958). — Les eaux profondes du Nord de la France et leur utilisation éventuelle. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LXXVIII** : 212-227.
- BONTE A., DELATTRE CH. & CELET P. (1955). — Observations sur les environs de Péronne et de Bapaume. Feuille de Cambrai au 50 000ème. *Bulletin de la Carte Géologique de France*, Comptes rendus des Collaborateurs pour la campagne de 1954, 246 fasc. A-53 : 1-11, 2 fig.
- GODON J. (1889). — Flore du Cambrésis : Distribution géographique des espèces. *Mémoires de la Société d'Émulation de Cambrai*, **44** : 209-267.
- GODON J. (1897). — Sur la disparition de quelques plantes intéressantes des fortifications de Cambrai à la suite des travaux de démantèlement. *Mémoires de la Société d'Émulation de Cambrai*, **51** : 167-169.
- GODON J. (1899). — Découverte du Pélodyte ponctué (*Pelodytes punctatus*, DAUD.) aux environs de Cambrai. *La feuille des Jeunes Naturalistes*, 29e année (1898-1899), **341** : 89-90.
- GODON J. (1900). — *Pelodytes punctatus*, DAUD. *La feuille des Jeunes Naturalistes*, 30e année (1899-1900), **351** : 71.
- GODON J. (1906). — Découverte d'une faune quaternaire à Cambrai. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XXXV** : 189-190.
- GODON J. (1909). — Caractéristiques de la Flore du département du Nord. in Lille et la région du Nord en 1909, AFAS Edit., 41 p.
- GODON J. (1910). — Promenades botaniques dans l'Avesnois. *Mémoires de la Société d'Émulation de Cambrai*, **64** : 131-246.
- GODON J. (1913). — Caractéristique de la flore du Département du Terraine : La surface piézométrique du réseau aquifère du Sud-Ouest de Cambrai. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XLII** : 106-111, 2 pl.
- GODON J. (1925a). — Eglises et Chapelles bâties sur des sources. *La feuille des Naturalistes*, Année **1925** : 127.
- GODON J. (1925b). — Le *Pelodytes punctatus*, DAUD. *La feuille des Naturalistes*, Année **1925** : 137.
- GODON J. (1926a). — La florule de nos ruines. *Mémoires de la Société d'Émulation de Cambrai*, **LXXIII** : 155.
- GODON J. (1926b). — Colonies d'Hélices méridionales installées dans le Cambrésis et sur ses limites. *Mémoires de la Société d'Émulation de Cambrai*, **LXXIII** : 163-165.
- GODON J. (1926c). — Destruction d'un monument mégalithique dans le Nord. *Mémoires de la Société d'Émulation de Cambrai*, **LXXIII** : 167.
- GODON J. (1932). — (note posthume) Sur les fossiles du Tuf calcaire de Moislains (Somme). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LVII** : 78-80.
- GODON J. (1926b). — Les Crustacés Amphipodes des eaux douces du Nord de la France. *Mémoires de la Société d'Émulation de Cambrai*, **LXXIII** : 39-53.
- PRUVOST P. (1932). — Éloge de M. le Chanoine Joseph Godon, Président de la Société. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LXXIX** : 75-78.



## NEW INSIGHT ON THE “CUL D’HOUILLE” SECTION (GIVETIAN, MIDDLE DEVONIAN) NEAR FLOHIMONT (ARDENNES, FRANCE)

### ***Nouvelles données sur la coupe du “Cul d’Houille” (Givétien, Dévonien moyen) près de Flohimont (Ardenne, France)***

par Sébastien MAILLET (\*), Bruno MILHAU (\*\*)& Benoît L.M. HUBERT (\*)

*Abstract.* — The Cul d’Houille section outcrop, located on the southern border of the Dinant synclinorium (French Ardennes), partly exposes a carbonate series from the middle to upper Givetian (Middle Devonian). This study presents 1- the complementary description of some new recently washed beds, belonging to the lower member (Flohimont Mb.) of the Fromelennes Formation, and 2- the precise location of the member and formation boundaries allowing correlation with the Givetian type sections in southern Ardenne.

*Résumé.* — L’affleurement de la coupe du Cul d’Houille, appartenant à la bordure sud du synclinorium de Dinant (Ardenne françaises) permet l’observation partielle d’une série carbonatée d’âge givétien moyen à supérieur (Dévonien moyen). Cette étude consiste 1- en une description complémentaire de nouveaux bancs, mis en évidence récemment par décapage, appartenant au membre de base (Membre de Flohimont) de la Formation de Fromelennes, et 2- au positionnement des limites précises des membres et formations pour ce site, permettant des corrélations avec les coupes types du Givétien en Ardenne méridionale.

Keywords : Dinant synclinorium, Fromelennes, boundaries, stratigraphy

Mots-clés : Synclinorium de Dinant, Fromelennes, limites, stratigraphie

### I. — INTRODUCTION

The « Cul d’Houille » section, located near Flohimont (Champagne-Ardenne, France), belongs to the southern border of the Dinant synclinorium. The section, 236 metres-thick, has been described bed by bed by Hubert & Pinte (2009). It exposes the Givetian series of the Mont d’Hairs to Fromelennes formations, similarly to the Fromelennes-Flohimont section, situated on the north-eastern bank of the Houille river.

The boundary between the Mont d’Hairs and Fromelennes formations (Hubert & Pinte, 2009) has not been precisely located due to the discontinuity of the section (vegetation invaders). In this work, we described four new meters of the section (about 15 beds) and discussed the historical boundaries of formations and members. The material sampled for analyses is housed in the collections of the Faculté Libre des Sciences et Technologies (FLST), Lille.

### II. — RESULTS

The type-locality of the Givetian (Gosselet, 1879) is composed by numerous sections. The most studied are, 1- the escarpment of the Charlemont fortress along the Meuse river which corresponds to the Givetian stratotype, 2- the Mont d’Hairs and Moulin Boreux sections described by Bonte & Ricour (1949) and Pel (1974) as stratotypical sections, 3- the Fromelennes-Flohimont section (Bultynck, 1974; Cornet, 1975; Bultynck *et al.*, 2001) which exposes all the Givetian’s formations and 4- the Cul d’Houille section, less studied (Cornet, 1975; Prétat & Carliez, 1996), which now probably provides the best section of middle-upper Givetian.

#### 1) Lithology

The new beds (102”A to 111”E, Fig. 1-2) belong to the first member (Flohimont Member) of the Fromelennes Formation. These last are composed of slightly argillaceous

(\*) Laboratoire de Paléontologie stratigraphique, ISA-FLST, Géosystèmes FRE 3298 CNRS, 41 rue du Port, F-59046 Lille cedex, France. E-mail : sebastien.maillet@icl-lille.fr; benoit.hubert@icl-lille.fr

(\*\*) Laboratoire de Paléontologie stratigraphique, FLST, 41 rue du Port F-59046 Lille cedex, France. E-mail : bruno.milhau@icl-lille.fr

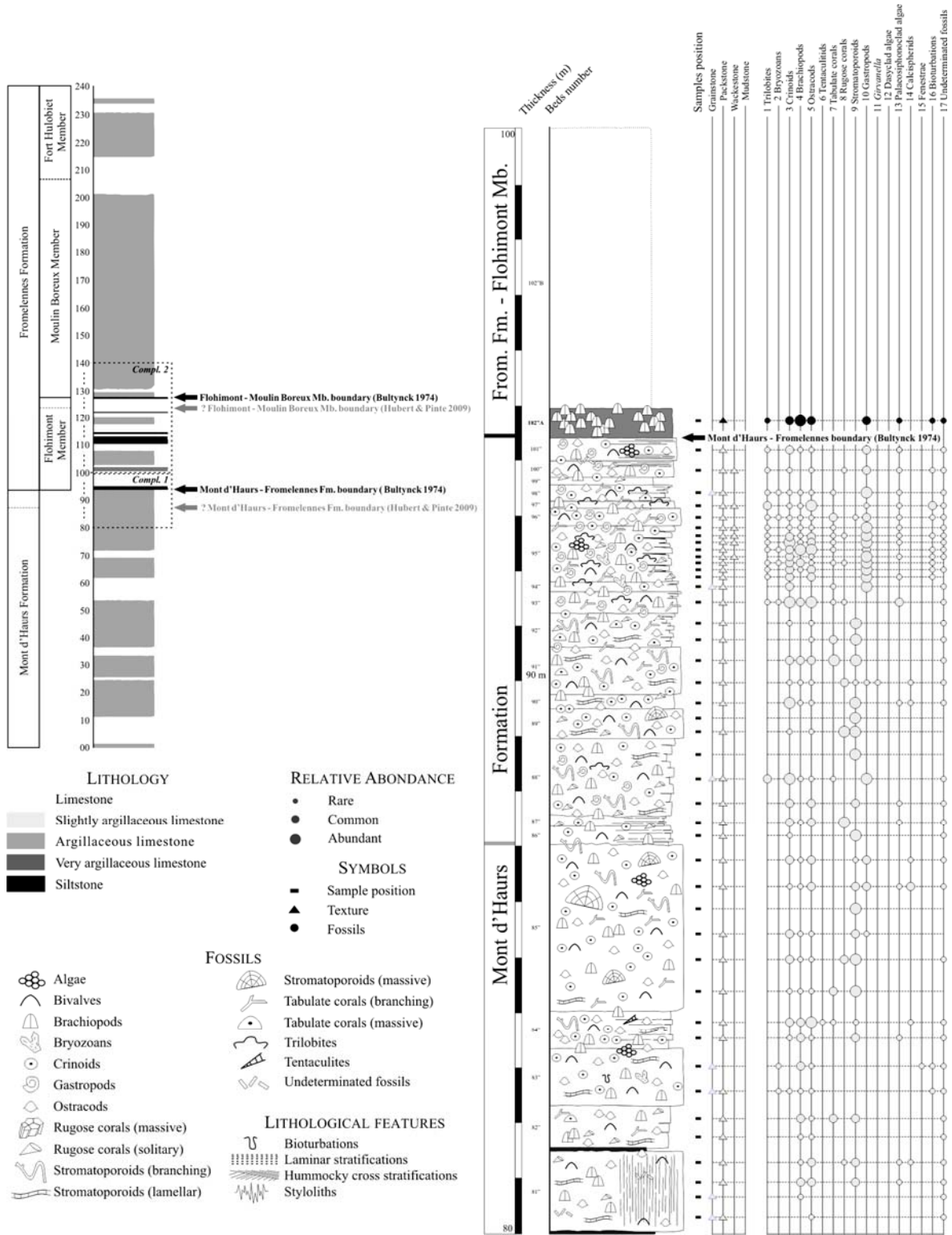


Fig. 1. — Synthetic succession of the “Cul d’Houille” section (left) with location of the detailed succession described in this paper (right). Detailed lithology of the succession from 80 to 100 m (Mont d’Haus Formation and Flohimont Member of the Fromelennes Formation) – comprising the Mont d’Haus and Fromelennes formations boundary (bed 102<sup>A</sup>), grey bars correspond to the boundaries sensu Hubert & Pinte 2009, black bars and arrows correspond to the Bulync’s (1974) boundaries.

Fig. 1. — Colonne lithologique synthétique de la coupe du “Cul d’Houille” (à gauche) avec localisation des logs détaillés dans cette note (à droite). Lithologie détaillée de la coupe entre les côtes 80 et 100 m depuis la base du levé (comprenant la Formation du Mont d’Haus et le Membre de Flohimont de la Formation de Fromelennes) - exposant la limite entre les deux formations citées auparavant (bancs 102<sup>A</sup>), les barres grisées correspondent aux limites définies par Hubert & Pinte, 2009, les barres noires correspondent à celles de Bulync (1974).

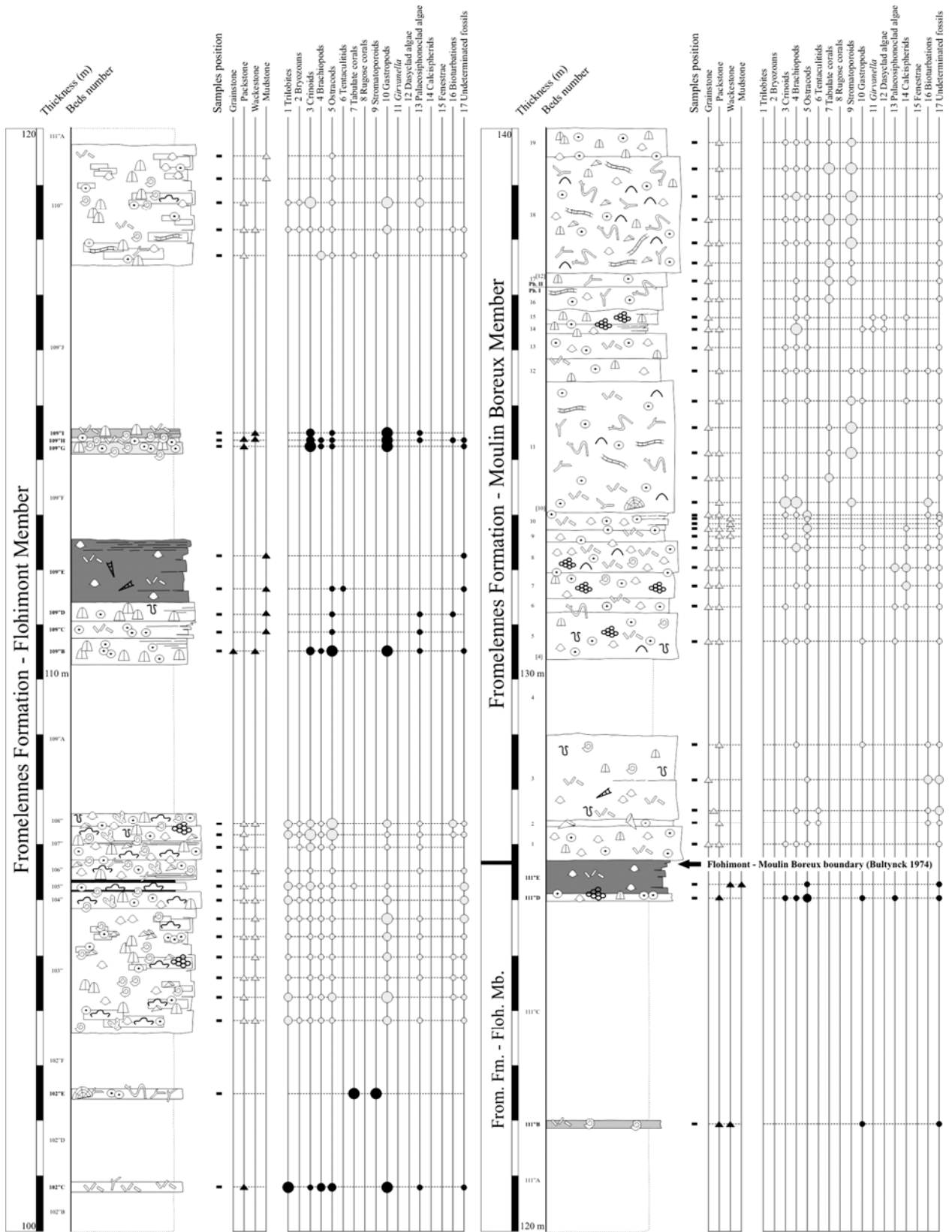


Fig. 2. — Detailed lithology of the succession from 100 to 140 m (Fromelennes Formation, Flohimont and Moulin Boreux members) – comprising the Flohimont and Moulin Boreux members boundary (bed 111”).

Fig. 2. — Lithologie détaillée de la coupe entre les côtes 100 et 140 m depuis la base du levé (comprenant les membres de Flohimont et du Moulin Boreux de la Formation de Fromelennes) - exposant la limite entre les deux membres cités auparavant.

and argillaceous grey-dark limestone, decimetre to metre-thick, sometimes rich in bioclasts. The textures vary from wackestone to packstone with rare grainstone lenses. Some new beds are typical: the bed 102"A corresponds to brachiopod coquina with ostracodes and crinoids. The bed 102"E is particularly rich in reefal bioclasts – lamellar stromatoporoids and tabulate corals association. The beds 109"G to H are very rich in gastropods.

## 2) Fromelennes Formation boundaries: previous works

The boundary between the Mont d'Hours and Fromelennes formations (Flohimont Member) in the outcrops located along the road D46 and in the Cul d'Houille quarry at Flohimont was originally defined by Bultynck (1974) and Cornet (1975). According to these authors and to Bultynck *et al.* (1991, 2001) and Lacquement *et al.* (2006), the base of Fromelennes Formation is marked by the first clayey limestone bed containing a rich fauna of brachiopods.

About the boundary between the Flohimont and Moulin Boreux members only visible in the Cul d'Houille quarry, Bultynck (1974) defined the first beds belonging to the Moulin Boreux Member as a huge dolomitic and massive 3.9 metres-thick limestone, overlaying a unity of thin dolomitic argillaceous beds belonging to the Flohimont Member.

## 3) Fromelennes Formation boundaries: "Cul d'Houille" section

The complete "Cul d'Houille" section was described for the first time by Hubert & Pinte (2009). Because of vegetation invasion the authors defined the boundaries of the members of Fromelennes Formation either on sedimentological criteria or indicated the incertitude of their boundaries. The discovery of some new beds allows correlating the boundaries defined in this section with previous works (i. e. Bultynck, 1974).

### *Mont d'Hours / Fromelennes (Flohimont Member) formations*

The bed 102"A (fig. 1) constitutes the first bed of the Fromelennes Formation (*sensu* Bultynck, 1974). This argillaceous limestone bed, presenting brachiopod coquina and well diversified microfauna, surmounts an alternation of reef-limestone and argillaceous limestone belonging to the upper part of the Mont d'Hours Formation. This boundary has never been observed in the Cul d'Houille section previously, that is why Hubert & Pinte (2009) placed this boundary lower in the series, at the base of the first argillaceous limestone (bed 86") overlaying a huge biostromal unit.

### *Flohimont / Moulin Boreux members (Fromelennes Formation)*

The boundary between the first member (Flohimont Member) and the second one (Moulin Boreux Member) of the Fromelennes Formation is also located, between beds number 111"E and number 1 (fig. 2). The lithology is characterized by a transition from thin grey argillaceous beds presenting some microfossils (mainly ostracodes) to grey-dark dolomitic

limestone beds, 2.4 metres-thick, containing small reworked bioclasts (mainly brachiopods and gastropods). The transition from argillaceous to dolomitic limestone beds has not clearly been observed by Hubert & Pinte (2009), but clearly corresponds to this described by Bultynck (1974).

Although the Flohimont Member is yet partially visible, this one consequently reaches a thickness of about 31 metres, in accordance with the works of Bultynck (1974) and Bultynck *et al.* (2001).

## III. — DISCUSSION

According to Bultynck's (1974) work, the boundary between the Mont d'Hours and Fromelennes formations is the first argillaceous limestone presenting brachiopods coquina (bed 102"A). According to Hubert & Pinte (2009), this boundary was the first slightly argillaceous limestone (bed 86") overlaying the last huge biostromal unit (bed 85"). The new beds put forwards have permitted to locate the boundary between the two formations.

However, this boundary will be different in other part of the sedimentary area, and do not correspond to a slightly argillaceous limestone presenting brachiopods coquina. Consequently what are the best criteria to standardize the boundaries of formations in a geographic area?

The beds 89" to 91" are yet massive limestone containing a small builder fauna. From the bed 92" to 102"A the series is composed by argillaceous limestone. The bed 93" is marked by a renewal of the fauna from tabulates and stromatoporoids to trilobites-ostracodes-brachiopods and gastropods assemblages.

Thus, the change of microfauna due to a transgressive episode (Bultynck *et al.*, 2001) is clearly marked and located in the bed 93". It should be interesting to use the bed characterized by the beginning of this event for the global correlations in the southern border of the Dinant synclinorium.

## IV. — CONCLUSIONS

Despite the numerous lacks in the Cul d'Houille section, these new beds and the location of some historical boundaries complete the Givetian section's database (Hubert, 2008a-b ; Hubert & Mabile, 2009 ; Hubert & Pinte, 2009) for the southern border of the Dinant synclinorium. This work will allow precisising correlations of this section with other places exposing the Givetian.

**Acknowledgments.** – The authors are especially grateful to P. Deville (Laboratoire de Paléontologie stratigraphique FLST – ISA) for his help during field studies and for thin sections preparation and J.-P. Nicollin (Laboratoire de Paléontologie stratigraphique FLST – ISA) for his comments. The authors are deeply grateful to Alain Blicq (Géosystèmes, FRE 3298 CNRS, University of Lille) and to Catherine Crônier (Géosystèmes, FRE 3298 CNRS, University of Lille) for critical readings of the manuscript.



BIBLIOGRAPHY

- BONTE A. & RICOUR J. (1949). — Structure du massif du Mont d'Haus. *Bulletin du Service de la Carte géologique de France et des topographies souterraines*, **47**, 225 : 25-33.
- BULTYNCK P. (1974). — Conodontes de la Formation de Fromelennes du Givétien de l'Ardenne Franco-Belge. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **XII** (31), 50 (10) : 1-30.
- BULTYNCK P., CASIER J.-G., COEN-AUBERT M. & GODEFROID J. (2001). — Préconférence field trip (V1): Couvin – Philippeville – Wellin area, Ardenne (May 11-12, 2001). — The 15<sup>th</sup> International Senckenberg Conference, Joint Meeting IGCP 421/SDS, May 2001, Field Trips Guidebook : 1-44 ; Frankfurt a. M.
- BULTYNCK P., COEN-AUBERT M., DEJONGHE L., GODEFROID J., HANCE L., LACROIX D., PREAT A., STAINIER P., STEEMANS P., STREEL M. & TOURNEUR F. (1991). — Les Formations du Dévonien moyen de la Belgique. *Mémoire explicatif des cartes géologiques et minières de la Belgique, Ministère des affaires économiques, administration des mines, Service géologique de Belgique*, **30** : 1-106.
- CORNET P. (1975). — Morphogenèse, caractères écologiques et distribution des stromatopores dévoniens au bord sud du bassin de Dinant (Belgique). *Thèse présentée à l'Université Catholique de Louvain, Faculté des Sciences, Laboratoire de Paléontologie*, Tome II [Coupe De Fromelennes (Route) - Gi.D (Lithologie et structures sédimentaires, macrofaune)], 1-195.
- GOSSELET J. (1879). — Description géologique du Canton de Maubeuge. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **6** : 129-211.
- HUBERT B. L. M. (2008a). — Detailed lithology and faunal abundance of the historical Givetian section: the fortifications of the Mont d'Haus (Givet, France). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **15** (2<sup>ème</sup> série) : 45-57.
- HUBERT B. L. M. (2008b). — Glageon Quarry: Lithostratigraphy and faunal occurrence in the middle Givetian (Devonian) of Avesnois, France. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **15** (2<sup>ème</sup> série) : 67-75.
- HUBERT B. L. M. & MABILLE C. (2009). — Detailed lithology and faunal occurrence of the Marenne - East and Centre sections – Quarry (Givetian, Middle Devonian, Belgium). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **16** (2<sup>ème</sup> série) : 1-8.
- HUBERT B.L.M. & PINTE E. (2009). — Detailed lithology, faunal abundance and correlations of the Cul d'Houille Sections (Middle Devonian, Givetian, Avesnois, France). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **16** (2<sup>e</sup> série): 79-89.
- LACQUEMENT F., MANSY J.L., MEILLIEZ F. et VAN VLIET-LANOË B. (2006). — Notice explicative, Carte géologique France (1/50 000), feuille Givet (40) (seconde édition), Orléans : BRGM, 108 p. Carte géologique par MANSY J.-L. et al. (2006).
- PEL J. (1974). — Excursion E (COEN M., BULTYNCK P. & PEL J., 1974). In BOUCKAERT J. & STREEL M. (eds). *Guide-book International Symposium on Belgian micropaleontological limits from Emsian to Viséan, Namur*. Service géologique de Bruxelles, 20 p.
- PREAT A. & CARLIEZ D. (1996). — Microfaciès et cyclicité dans le Givétien supérieur de Fromelennes (Synclinerium de Dinant, France). *Annales de la Société géologique de Belgique*, **117** (1) : 227-243.



## A RENEWED CENOZOIC STORY OF THE STRAIT OF DOVER

### *Une révision de l'histoire cénozoïque du Pas-de-Calais*

par Brigitte VAN VLIET-LANOË (\*), Guillaume GOSSELIN (\*\*), Jean-Louis MANSY (\*\*)(†),  
Chantal BOURDILLON (\*\*\*\*), Murielle MEURISSE-FORT (\*\*\*\*)(\*\*), Jean-Pierre HENRIET (\*\*\*\*),  
Pascal LE ROY (\*\*\*), Alain TRENTESAUX (\*\*).

*Résumé.* — Le détroit est potentiellement un élément du rift européen, subsident dès le Paléocène jusqu'au Quaternaire, mais surtout pendant la phase d'extension oligocène liée à l'ouverture de l'Atlantique Nord. Comme ce secteur de l'Europe correspond à une zone en inversion tectonique, le front varisque, l'extension n'a pas pu s'exprimer pleinement. L'inversion du front varisque a accommodé l'essentiel du raccourcissement imposé à la plate-forme occidentale de l'Europe par la formation des Pyrénées et l'ouverture de l'Atlantique Nord. La dépression du Boulonnais constitue dès l'Yprésien un golfe marin calqué sur une zone déjà partiellement évidée dès le Crétacé. Une réinterprétation des formations sédimentaires superficielles internes au Boulonnais montre l'existence d'une ouverture très précoce du détroit dès l'Eocène. Le Pas-de-Calais est ouvert dès la fin du Lutétien, pendant une partie de l'Oligocène et du Mio-Pliocène final, les faunes de ces deux étages étant identiques de part et d'autre du détroit. Il s'est refermé par épisodes pour des raisons tectoniques et eustatiques, à l'Oligocène final, certainement au Miocène inférieure et moyen, et à partir du Quaternaire ancien pour n'être ré-ouvert que tardivement à la veille du Dernier Interglaciaire. Ces ré-ouvertures sont en relation avec l'évolution de la Manche orientale et de son réseau de paléo-vallées. Les implications tectoniques, géomorphologiques et climatiques de cette dynamique sont discutées dans le contexte de l'Europe occidentale. L'inversion du Pas-de-Calais est quasi-synchrone de celle des autres bassins de la Manche et de la Mer du Nord et le détroit peut être considéré comme un élément du rift européen en raison de son fonctionnement.

*Abstract.* — *The Strait of Dover is possibly an element of the European rift, subsiding from the Paleocene to the Quaternary but mostly during the Oligocene extension phase resulting from the opening of the Northern Atlantic. But as it is superimposed on a zone in tectonic inversion, the tension could be limited in expression by the reactivation of the Variscan front. The inversion of the Variscan front accommodates most of the shortening induced by the Pyrenean Orogeny and the opening of the Northern Atlantic to the Western border of the European plate. The Boulonnais depression constitutes a marine gulf from the Ypresian, already excavated during the late Cretaceous. The re-analysis of the superficial sedimentary deposits inside the Boulonnais confirms a very early opening of the Strait of Dover, from the Eocene onward. The strait is open at the end of the Lutetian, during a part of the Oligocene and the late Mio-Pliocene, faunal assemblages of these two stages being identical on both sides of the strait. It is closed again from the early Quaternary for tectonic and eustatic reasons and re-open lately just prior to the Last Interglacial. These re-openings are related with the evolution of the Eastern Channel and its palaeo-valley system. Tectonic, geomorphologic and climatic implications of this dynamic are discussed within the Western European context. The inversion of the Strait of Dover region is practically synchronic with these of the basins of the Channel and North Sea areas and the strait may be interpreted from its functioning as an element of the European rift.*

*Mots-clés :* Pas-de-Calais, Paléocène, eustatisme, néotectonique, suture varisque, raccourcissement

*Keywords :* Strait of Dover, Paleocene, eustatism, neotectonism, Variscan front, shortening

### I. — INTRODUCTION

The Strait of Dover and the Boulonnais correspond to a complex geologic structure, for a long time considered as an anticline. This complex structure is the result of a tectonic inversion affecting the Mesozoic Weald-Boulonnais basin (Ziegler, 1992; Coward, 1994; Mansy *et al.*, 2001). The

"anticline" axis, nearby the Variscan Front, is partially connected to the Variscan overthrust structures. A first inversion occurred at the Jurassic-Cretaceous limit (Mansy *et al.*, 2001). The second phase of inversion is Cenozoic and would be situated or in the limit Eocene-Oligocene (Ziegler, 1992; Coward, 1994) or would be synchronous with inversions recognized for Wessex and some basins of the

(\*) UMR 6538 Domaines Océaniques, IUEM- Université de Brest, 29280 Plouzané, France ;

(\*\*) FRE 3298 Géosystèmes, UFR Sc de la Terre, Université des Sciences et Technologie de Lille, 59655 Villeneuve-d'Ascq cédex, France;

(\*\*\*) 5 Allée des Magnolias, 72100 Le Mans,

(\*\*\*\*) CD Nord-P.de Calais, Service Départ. Archéologie, 7 rue du 19 Mars, 62000 Dainville, France ;

(\*\*\*\*\*) Renard Marine Centre, R.Univ. Ghent, 89 Krijgslaan, 9000 Ghent, Belgium.

North Sea, at the end of Oligocene or at the beginning of the Miocene (Ziegler, 1992). Nevertheless, the simultaneity of the inversion of the zone Weald-Boulonnais with that of the Isle of Wight appears, likely, Paleogene in age (Gale *et al.*, 1999; Vandycke and Bergerat, 2001; Mansy *et al.*, 2001). The evidences for younger movements had not allowed the reconstruction of the story since the beginning of Neogene. Some recent observations bring to light tectonic reactivation during the Neogene and in the Pleistocene (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1998; - 2000).

The opening of Strait of Dover in Cenozoic and the tectonics of the whole Weald – Boulonnais basin are poorly known and raise controversies. In the majority of the publications, the opening of Strait of Dover and the Boulonnais' excavation are always considered as Pleistocene (Sommé, 1977; Alduc, 1979; Ziegler, 1992; Colbeaux *et al.*, 1993; Gibbard, 1995; Jones, 1999; Sommé *et al.*, 1999; Lefèvre & Sommé, 2001) although some authors remain dubious (Larsonneur, 1971; Curry, 1992; Bridgland & D'Olier, 1995; Meijer & Preece, 1995; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1998, 2002, 2004; King, 2006).

This strait is according to Pomerol (1973) functional during early Paleocene and is temporarily closed during lower Ypresian and more effectively from the Middle Lutetian. From 1968 and in 1978, Margerel suggested an opening from the Pliocene because of the homogeneity of the foraminifer's faunae in the Channel and the Southern North Sea. For Curry (1992), the strait seems open during the lowest Oligocene. Also for him, the large proportion of warm species in the Pliocene of the Red Crag is an argument in favour of a re-opening of the strait from the Pliocene, also confirmed by Meijer & Preece (1995). Dingwall (1975) also published the occurrence of Pliocene deposits in the northern prolongation of the Lobourg Deep (fig.1) which incised the Strait. We proposed a regressive capture of the western Channel by the North Sea in relation to a temporary Messinian uplift of the Variscan front (Van Vliet-Lanoë *et al.* 1998) by the Pliocene Lobourg River. The strait was closed again since the Early Quaternary (Meijer & Preece 1995). According to malacofaunal evidences, the Strait remained closed until MIS 5e (Meijer & Preece 1995).

The age for an opening in the Pleistocene is based in France and in Belgium on the stratigraphic and climatic interpretation of the Formation du Fart / Slack which crops out at Wissant and at La Pointe-aux-Oies (de Heinzelin, 1964; Roep *et al.*, 1975) and on the succession of "Quaternary" paleosurfaces inside the depression of the Boulonnais (de Heinzelin, 1964). *De facto*, the uplift of the Boulonnais and its excavation were thus attributed to the Pleistocene time. A first synthesis was published in 2004 (Van Vliet-Lanoë *et al.*) shifting this interpretation back to the Neogene. Since, complementary works have allowed to precise some of the remaining questions on both the North Sea and the Eastern Channel sides. A systematic reinterpretation of the old sections, new descriptions made in 1968-69 and since 1996, sections observed during the works of the coastal highway and those of the Channel Tunnel (Antoine, 1991) allowed clarifying some uncertainties (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1998, 2002). The important present-day retreat of the coastline between 1996 and 1999 also allowed new observations.

Concerning the Weald, its morphology is similar to that of the Boulonnais, but with a stronger relief. Woolridge &

Linton (1939) considered that the excavation of the Weald was post-Pliocene because of the age initially attributed to the Leham beds. The inner surface develops through the Weald at +100 - +120 m although somewhat deformed by internal flexures and foldings. It corresponds a marine abrasion surface reworking partly the top of the Jurassic "Upper Green Sands" especially from the Ashford to Leham districts. Concerning Plio-Pleistocene river evolution in the Weald, the Wey, Blackwater, Medway and Stour Rivers are believed to flow northwards in a parallel course across East Anglia and the western shelf of the south-western North Sea, before shifting eastwards (Bridgland, 1988). Green (1985) and Jones (1999) date this incision back to the Eocene, accentuated by an emersion since the Chattian (late Oligocene).

Our paper is a reappraisal of the stratigraphical positioning from various outcrops and paleosols preserved inside the Boulonnais and replaces the recorded events within the morpho-tectonic and climatic context of the Cenozoic. The middle Miocene is well recorded in Belgium and in the North Sea, in Brittany and on the low of Cotentin but was not recorded in the Boulonnais and adjacent regions. We also recognized the existence of an upper Miocene shore along the present-day coast. This reappraisal of the stratigraphic record in parallel with the steps of the tectonic inversion allows a better insight of the mechanisms responsible for the formation and opening of the Strait of Dover, as also of the eustatism and the tectonic history of Western Europe. Finally, we shall see that this major geological structure does not behave differently from the other inverted basins of Western Europe.

The altitudes are given in metres NGF on the French side and metres OD on the British one, the Quaternary ages in MIS or Marine Isotopic Stages.

## II. — THE STRUCTURAL CONTEXT

The Strait of Dover is located at the contact between two large western European domains situated on the edge of the northern Variscan front (fig.1). In the South, the equivalent of Brabant Parautochton crops out essentially in Marquise's region. Several structural units are separated by southward pending overthrusts limited by listric faults (Mansy *et al.*, 2001). Whole the overlapping units are truncated by a vertical faulted zone line, Permo-Trias in age, the fault of Pernes (Lewandowski *et al.*, 1999). Extensive phases deform this region during the Permo-Trias and the upper Jurassic to the lower Cretaceous. The morphology of the Boulonnais is then controlled by the inversion of this zone corresponding to the oriental extremity of the Weald's basin. It is not a real anticline, but succession of "en échelon" flexures controlled by the presence of a thin Mesozoic sedimentary cover on the Palaeozoic basement. This "thin skin" tectonic is controlled by N100 faults dipping to the North (Mansy *et al.*, 2001). The most important ones appear close to Landrethun and in the Artois. The St Omer's basin, develops at the NE of one of these fault zones, which behaves as a flexure. North of the strait, the Southern zone of the North Sea is characterized by a steep dip to the NE (Henriet *et al.*, 1989), with several NW-SE faults, prolongation of the South Heweth fault zone. From 1972, Shephard-Thorn *et al.* noticed the importance of the reactivation of the Paleozoic deep structures on the

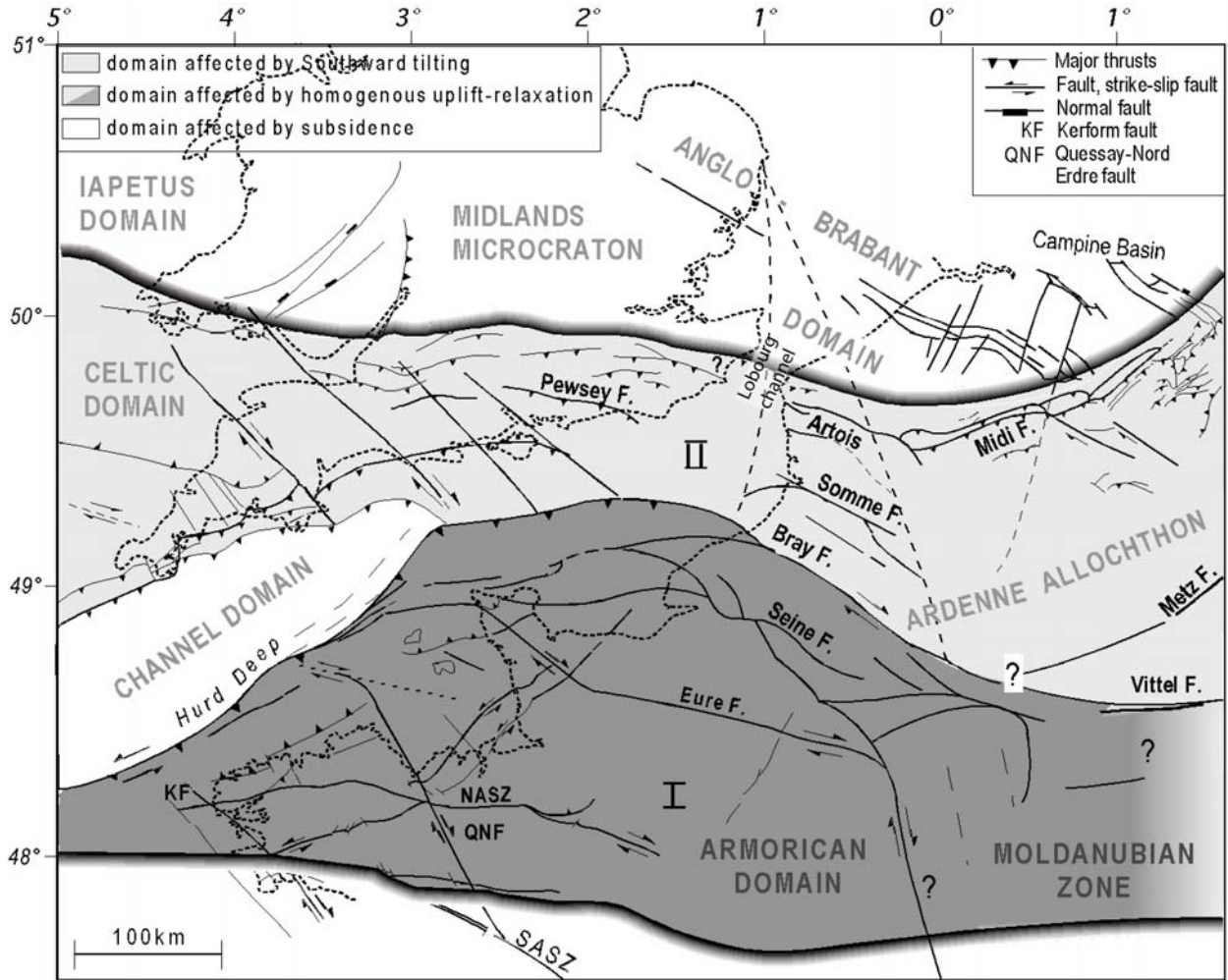


Fig.1. — Global map of the deep geological basement of the English Channel and Southern North Sea (from Mansy *et al.*, 2001).

Fig.1. — Carte globale de la structure géologique profonde de la Manche et de la Mer du Nord méridionale ( Mansy *et al.*, 2001).

morphology of this region of Europe. Under enhanced compression, the whole domain, south of the Variscan deformation front, lifts up and tilts to the SW, while the Anglo-Brabant zone lifts up and tilt to the NE.

An important point has been the “official” absence of the Neogene and of a part of the Paleocene in the Boulonnais. The Pliocene would be essentially preserved north of it (Pomerol, 1973) and the traditional limit for the Pliocene transgression is limited to the North of the strait, along the subsiding N compartment of the Landrethun’s flexure and these “*en échelon*” of Sangatte. Opposite, in the eastern Channel, its northern extent would not exceed Fécamp (Pomerol, 1973). The observations made in the years 1970-1975 and after 1996 allowed to infirm this assertion. For that traditional interpretation, the zone of the strait *sensu stricto* was interpreted as an early Quaternary graben as suggested by Colbeaux *et al.*, (1993). The last data show that the strait zone roughly corresponds to a series of flexures of orientation WNW / ESE (Hamblin *et al.*, 1992; Mansy *et al.*, 2003) controlled by the inversion of Weald, globally evolving in a synform morphology, the inversion being more important along the English side.

The works of the Channel Tunnel show on the French side a series of tilted blocks denoting a considerable transpression in Cenomanian chalks (Ziegler, 1992). The Fosses Dangeard, located within the strait, are strongly controlled by these structures (fig. 3). We need to give an age to these deformations.

*The onset of the inversion*

The sedimentary record from the Cenozoic is very discrete in the Boulonnais. The Bray is relief emerging by inversion by the late Cretaceous, and the Boulonnais seems to be activated at this time (Lamarche *et al.*, 1998). At Sangatte, below the raised beach and the *Plenus* Marls (Upper Cenomanian), evidences exist, close to the main fault, of creep in the chalk, enhanced by ice segregation during the middle Pleistocene (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004). It thus seems that the inversion of this sector begins from the middle Cretaceous (upper Cenomanian; Bergerat & Vandycke, 1994). This tectonic activity is also registered in the North Sea (Badley *et al.*, 1998) and in Kent (Bergerat & Vandycke, 1994). Also the limited preservation of the post-Cenomanian chalk in the western basin of Paris confirms a slight uplift of

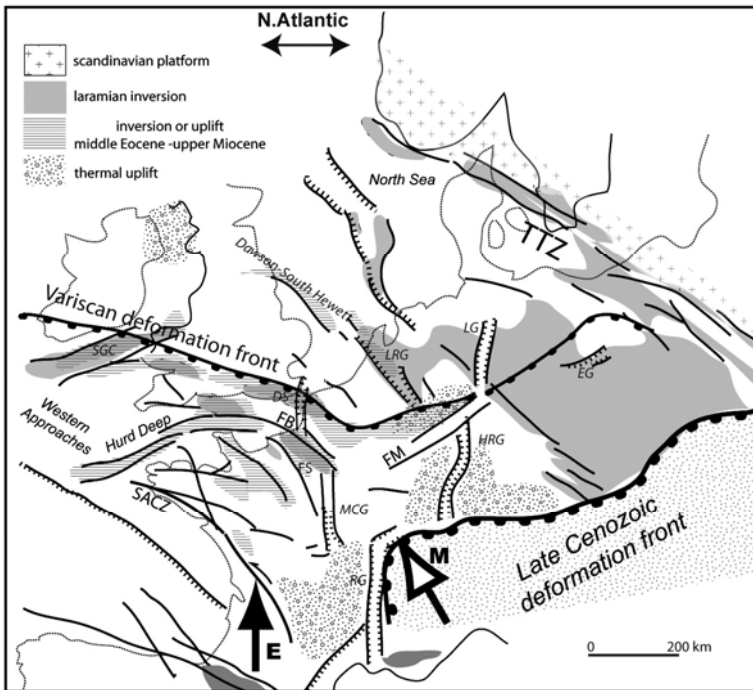


fig. 2. — Location of the graben of the Strait of Dover within the European system. (Modified from Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004).

fig. 2. — Localisation du graben du Déroit du Pas-de-Calais au sein du rift Européen.

SACZ South Armorian shearing zone  
 TTZ: Teisseyre-Tornquist zone  
 DS: Strait of Dover  
 HRG : high Rhine graben  
 LRG : low Rhine graben  
 LG : Leine graben  
 EG : Egger graben  
 MCG: Massif central graben system  
 R.G: Rhone graben  
 FS: Sein fault  
 FB: Bray fault

S.FI : Sangatte Flexure zone  
 L.FI: Landrethun Flexure zone  
 W-B.F.: Wimereux-Belles fault

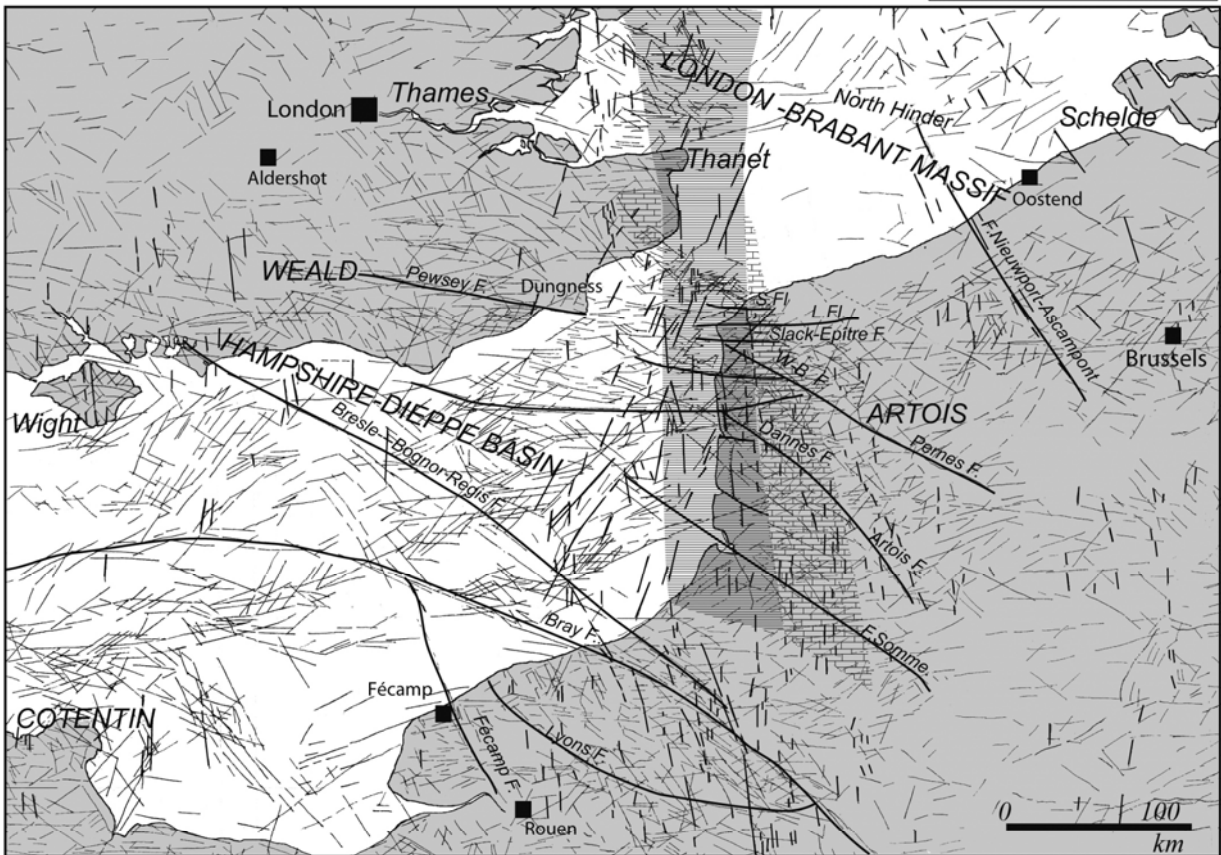


fig. 3. — Positioning of the “graben” of the strait of Dover from the lineations extracted from DEM and topographical maps. For the Channel and the Strait, the used maps are those of Alduc, 1979 and Kellaway *et al.*, 1985. For the Southern North Sea, the used map are those of the base of Quaternary, BGS and various detail maps. The N-S lineations are emphasized to visualize there maximal concentration in the prolongation of the Massif Central rift system. The graben is marked by the dashed zone; the brick symbol locates the possible rift shoulders.

fig. 3. — Positionnement du graben du Pas-de-Calais à partir des linéaments extraits de fonds topographiques et de modèle numériques de terrain. Les linéaments N-S ont été soulignés pour mettre en évidence la prolongation du système du Massif Central. La zone hachurée correspond à la zone du graben; les briques à la position potentielle des épaules de rift.

the Bray (Mortimore & Pomerol, 1997) at that time. These events are contemporary with the Subhercynian and Laramian phases, defined for the Western Europe in the eustatic chart of Shell (in Ziegler, 1990).

However, the existence, upslope of the paleo-cliff of Sangatte, of a paleo-channel containing a mixture of blocks derived from Turonian and Coniacian chalks (com. pers. F. Amédéo) including flint pebbles of with a limonitic cortex and cobbles of goethitic or hematitic sandstones. It suggests an early emersion with some supergene weathering (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004). The Coniacian chalks crop on the top of the Boulonnais but are more developed on the Northern slope in the quarry of Coquelles (Robaszynski & Amédéo, 2009). The preferential conservation of the upper Santonian on the Northern slope of the Boulonnais (Deconinck *et al.*, 1989) and close to St Omer (Robaszynski & Amédéo, 2006), while mostly absent at the Southern slope, would be an argument for a differential accommodation bound to some activity of the flexure zones of Landrethun and Sangatte. Nevertheless a recent analysis of the contents of the Lower Slack Beds at the Pointe-aux-Oies (fig. 4, see further) gives evidence of the late erosion of the Santonian, as also the presence on the Boulonnais uplands of flints with the same faunal content in residual clays (L. Quesnel, BRGM personal com.). The first emersion dates probably back to the early Paleocene (Selandian; King, 2006). A first incision of the river net is recorded in the Mons basin in Belgium (Vandenberghé *et al.*, 2004).

In Europe, during the Cenozoic, the Teisseire-Tornquist zone (TTZ) accommodated mainly the Laramian inversion although the Variscan front and the Bray accommodated the main part of the Pyrenean and Alpine tectonic phases (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004). The impact of the opening of the North Atlantic and the bulging created by the Greenland-Iceland magmatic centre some 63 Myr ago also led to the building of the regional stress affecting three major Variscan structures: the TTZ zone, the Variscan front and the Bray's fault (Nielsen *et al.*, 2007). Then, an important thermal subsidence started at the very beginning of Eocene in the northern part of the North Sea and in Western Approaches of the Channel, with the onset of rifting in the North Sea basin (Ziegler, 1990; Nadin *et al.*, 1995).

### III. — THE CENOZOIC STRATIGRAPHY OF THE STRAIT'S ZONE

#### 1) The Paleogene

##### *The Paleocene*

The majority of the Paleocene deposits of the Northern France consist in dark grey clays with some paleosols and sands, preserved in wide paleo-talwegs on the north slope of the Boulonnais while a basin continues to form at the foot of the Landrethun's flexure (St Omer basin: Desoignies & Thibaut, 1968). The series includes at its base greened flint pebbles as at Helfaut quarry (St Omer). On the Boulonnais, they are preserved in karst pits developed on transtension zones (Lower Thanetian greenish sands with tidal facies). To the South, they are preserved at St Josse, on the plateau above the Canche River, covering both the Thanetian and the Sparnacian (Dubois, 1921; Destombes & Lapierre, 1974).

In the low valley of the Canche River (fig.4) and in the Picardy maritime plain, the dark green glauconitic sands and compact grey-black clays were found by drilling towards -10 m at Villiers. They correspond to the "sables d'Ostricourt" and "argiles de Louvil" belonging to the Thanetian of St Omer's basin or to "sables de Bracheux" of the Oise River valley (Destombes & Lapierre, 1974). The St Josse's coring located on the plateau south of the Canche River records a succession of facies from the upper Paleocene and basal Eocene up to the early Ypresian (+55m; Van Eetvelde and Dupuis, 2005). Locally a continental facies of early Ypresian brownish clay, the St Aubien clays is preserved. Above the estuary of the Somme river (+ 40 m), the St Valéry's sands also correspond to the very early Ypresian (Sparnacian facies; Dupuis, 1982). Synsedimentary deformational structures in Sparnacian of Belgium (Sintubin *et al.*, 2001) are related to rapid tectonic uplift of both the Brabant Massif and the Artois axis (Vandenberghé *et al.*, 1998).

Inside the Boulonnais, an azoic tidal fine sand, silicified is cropping out in the sector of Tingry and Samer villages (fig. 4), but also exists around the Mont des Dalles (c.+125 m), on the southern side of Boulonnais and at Fromessent (+57 m). It corresponds to the Paleocene "sarcens" of the residual deposits of Thanets Beds at Maidstone in the Weald (Worssam, 1963) and of the Thames river basin, issued from the silicification of Thanetian sands (Ellisson and Zalasiewicz, 1996) as also to the "ladères" sandstones of Brittany. In the Weald, the silicification (sarsens) took place with the aridification in the late Eocene (Green, 1985). These formations give evidence of a partial internal erosion of the Boulonnais from late Paleocene onward. Later the zone of the strait is described as emerged (Pomerol, 1973) and this phase of uplift seems generalized as Cavelier & Chateaufort (1971) evidenced a modest uplift of Bray prior to the Ypresian.

Due to the structural context, this period covering the late Paleocene and the onset of the Eocene corresponds 1° to the post-orogen relaxation of the Laramian (Danian) but 2° also to the thermal bulging of Western Europe in connection with the development of the Greenland-Iceland hot spot (Paleocene-Eocene dykes in the British Isles and granite of the Lundy Island; Ziegler, 1990). Given the meridian direction of stresses on Western Europe at that time (Bergerat & Vandycke, 1994), it seems as likely that the beginning of extension facilitated a subsidence at the level of the Strait of Dover, disconnecting the Boulonnais of the Weald basin. It also seems probable that the river system sketched during the emersion of the very early Paleocene develops, exploiting the marked E-W structural pattern of the Boulonnais and of the Weald (Mansy *et al.*, 2002). This is also the case on the Brabant Massif where valley incision is effective from c.56 Ma (Vandenberghé *et al.*, 2004).

*A reappraisal of the lower formation de Wimille (Stinkal quarry): a high eustatic level form the late Ypresian ("Cuisien" facies) (fig.6).*

In the Boulonnais, the discovery of fine greenish tidal sands (micaceous and glauconitic) between + 90 and + 120 m of altitude, in particular close to + 110 m in the quarry of Stinkal near Marquise (fig. 4) (middle and lower formation of Wimille; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004), but also east of St Martin-de-Boulogne (+ 90 m) . We have initially given an Eocene to upper Oligocene age for this formation. These sands are strongly fractured, deformed by co-seismic



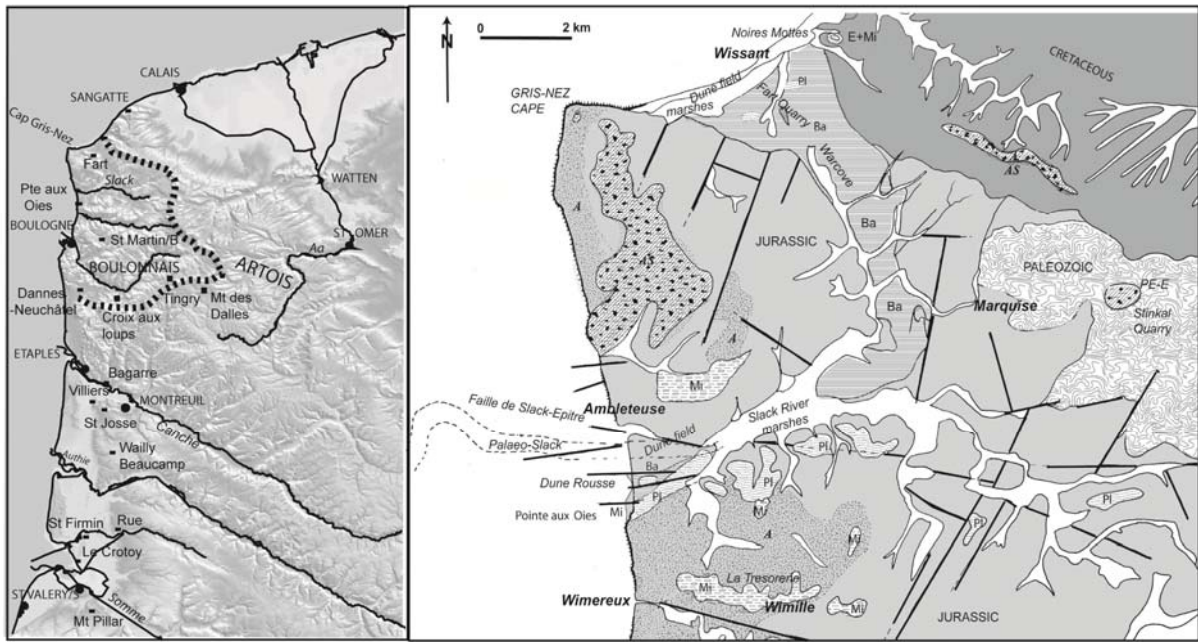


Fig.4. — Localisation of the sites (stipple line: the paleo-cliff) and maps of the Cenozoic deposits. The Quaternary is not mentioned. A: saproliite; AS: clay with flints; PE-E Thanetian-Sparnacian; Ba: Bartonian; Mi: Upper Miocene; Pi: Middle Pliocene.

Fig.4. — Localisation des sites et carte des formations cénozoïques. Le Quaternaire n'est pas pris en compte.

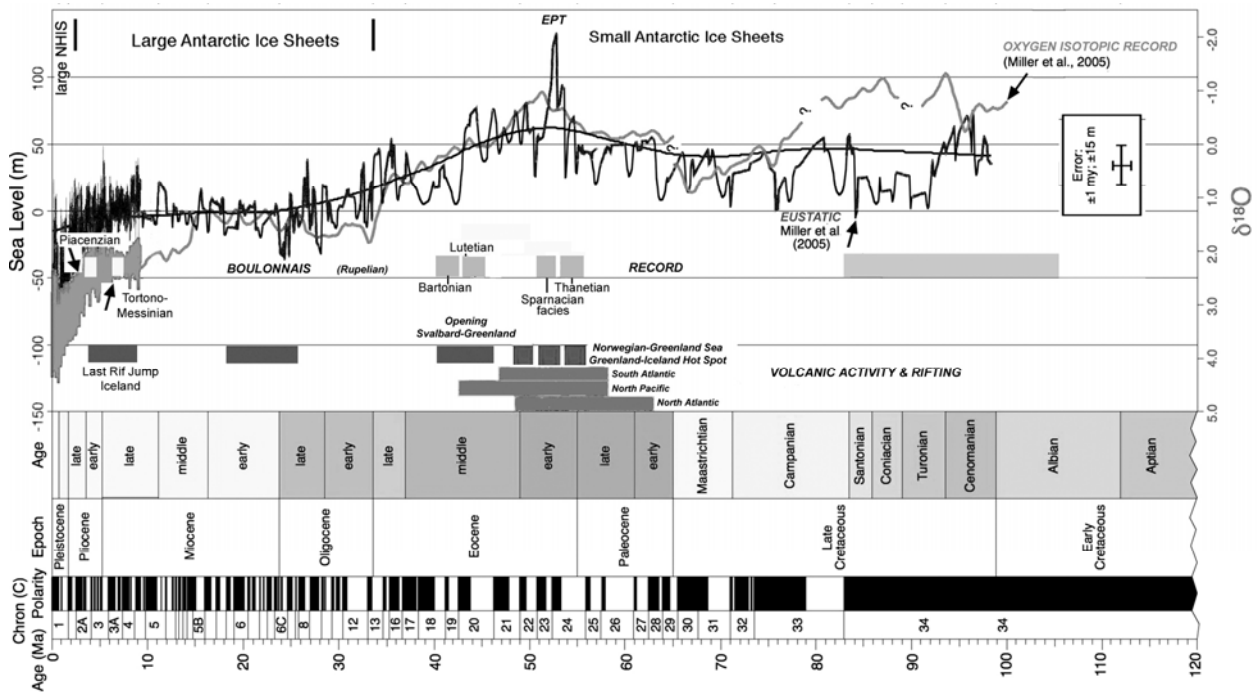


Fig.5. — Eustatic curve for the Cretaceous and the whole Cenozoic. Modified and completed from Miller *et al.* (2005).

Fig.5. — Courbe eustatique pour le Crétacé et le Cénozoïque. Modifiée et complétée de Miller *et al.* (2005).

structures (load casts). They look analogues to the sands of the Bagshot Beds or Boscombe Sands of the basin of Wight or the "Cuisiens" facies of the Oise river valley, late Ypresian in age. Late Ypresian deposits are also present on the north slope of the Boulonnais, at the base of the Noires Mottes hills (+ 120 m; Mansy *et al.*, 2001) and also on the north side of Weald. This late Ypresian is also present under the city of Calais to the North and to the south at the Mont Hulin (Montreuil/ Canche River) where the facies also reworks silex gravels (Dubois, 1921; Destombes & Lapierre, 1974).

This period close to 52 Ma is the sudden maximum achieved by the eustatic curve (+ 135 m; Miller *et al.*, 2005; + 230 m in Haq *et al.*, 1987; + 260 m in Hardenbol *et al.*, 1998), just after the thermal event of the "Paleocene-Eocene" transition (PETM: 58,5 Ma) (fig.5). It corresponds to the main period of opening of the Atlantic Ocean between Norway and Greenland and the formation of the Greenland basalts (62-59 Ma, 57-54 Ma and 50-47 Ma, Courtillot & Renne, 2003) but also volcanic activities in the other oceans.

At the level of the regional stresses, the regime is mostly meridian (Bergerat & Vandycke, 1994). The available space for the sedimentation, allows important deposits in the Wessex and in the North Sea basins. Compared with the Paleogene of the Isle of Wight, the Ypresian to Bartonian beds are widely spread and folded (synthesis in Curry, 1992). Also in the sector of North Hinder, located offshore of Oostend on a NW-SE flexure (fig. 3), a reactivation of tilted blocks deforms the Thanetian sands and also folds the Ypresian clays (Henriet *et al.*, 1989). At that time the European rift forms (Nadin *et al.*, 1995; Lepercq & Gaulier, 1996). Later, the sea level quickly falls.

The interest of this interpretation is to position at the beginning of the late Ypresian the erosion of the Boulonnais down to its main surface (+110 / +90 m), commonly down to the base of the Cretaceous. This surface apparently polygenetic is widely extended inside the Boulonnais and also in the Weald, where it is deformed. It develops in the South of the valley of Slack, more particularly at the East of Boulogne (fig. 4) and at the foot of the internal paleo-cliff. This surface represents a flat-bottomed gulf bordered by a marine paleo-cliff controlled by faults. It is generally covered to the West with a gently sloping pediment covered with flints. The surface truncates the summit (c.+ 140 m) of the Cap Blanc-Nez where it is covered by the lower Eocene of Noires Mottes hills. This "Cuisian" facies is preserved within the Boulonnais in karst depressions (Stinkal quarry) and in paleo-valleys protected from the erosion by a fault's offset. The presence of hydromorphic tropical paleosols (Ecuille Trouée, St Martin-de-Boulogne) with local silicification (opale; Croix-aux-Loups, close to Verlichthun) would position one of the episodes of silicification at the end of Ypresian. Also the facies "Cuisian" of the Oise River valley presents such silicifications. These silicifications are induced by an exondation with a reactivation of the already sketched E-W river system.

#### *A reappraisal of middle Wimille Beds: a residual Lutetian?*

The middle Wimille Beds crop out discretely on the Lower Wimille Beds (fig. 6). It is constituted by clays and fine sands with bioturbations or more gravely including small pebbles of filonian quartz and of flint, fining in an ochreous sandy silt (> 2m) with thin hydromorphic paleosols (swamp

or schorre with tidal invasions); it is further truncated by a sandy level with gravels. The faunal content is not preserved. It crops out at Wimille as eastward of St Martin-de-Boulogne. This facies also corresponds to the uppermost facies of the "Cuisian" of the Mount Hulin (Dubois, 1921; Destombes & Lapierre, 1974) but is not preserved at the Noires Mottes hills. The middle Wimille Beds seem equivalent to the silicified Lutetian of Belgium and the Mont des Recollets at Cassel (Ledian sands). In Belgium, Lutetian sands of Brussels and of Lede contain early siliceous consolidations (probably ante-Oligocene) connected with the uplift of the Variscan front.

The middle Wimille Beds could be thus attributed roughly to the Lutetian. The absence of this facies at the base of the Noires Mottes hills and along the north edge of the Weald confirms a tectonic activity at the level of the north flexure of the basin. G.Waterlot (1969) already placed the uplift of Artois at the end of Middle Eocene. The dome of Artois has the reputation to be widely submerged (Pomerol, 2005), but the main surface into the Boulonnais seems partly emerged only. During the upper Lutetian time, the regression begins, enhancing river incision.

#### *A reappraisal of the lower Slack Beds: a sandy clayish Bartonian ? (fig. 6)*

Formerly attributed to the Quaternary (de Heinzelin, 1964; Bonte & de Heinzelin, 1967; de Heinzelin, 1967), we had reinterpreted these beds preserved below the Dune Rousse, north of the Pointes-aux-Oies (Wimereux, fig. 4) as being potentially lower Pliocene in age (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1998). This formation rests on a low surface occupying the valley of Warcove and the low valley of Slack, isolating the Island of the Cap Gris-Nez. It is fully disconnected from the Wimille Beds. The strait is probably already open.

The lower Slack Beds consists in two units: the upper, is formed by 8 m of fine sands with ripple marks capped by rhythmic grey brownish clays, more pinkish to the top, with basal and intra-formational involutions, comparable to slumps and load casts. These sands incise a 10 to 12 m lower bed formed by the "argiles à biscuits", an alternation of pinkish grey silts and clays layers with flat carbonated concretions. Northward, the base of this unit presents an alternation of sands and littoral silt with ripple marks. It is a quiet sedimentation in a lagoon, with temporary tidal incursions. This formation does not contain Neogene nor Pleistocene foraminifers or fauna. The sandy facies reworks essentially microfossils issued from the Cenomanian, Turonian and Santonian chalks. The upper unit reworks a fauna essentially of basal middle Coniacian (C.Bourdillon, ERADATA report 2008). The basal gravel of the section described by the various authors is protected on a drag fold of an E-W fault (Slack-Epitre fault), at the North of the section. It is a conglomerate consisting of decimetre-sized pebbles of flint and sandstone in a grey-greenish non-calcareous sandy matrix. No microfauna is preserved other than meaningless shells fragments (oysters). It corresponds to an upper beach, further drowned by lagoon sedimentation. This whole formation constitutes a faulted block tilted to the south in association with figures of slump and liquefaction.

In the gravel pit of Wissant, the equivalent of the lower Slack Beds (de Heinzelin, 1964) rests locally on Aptian sands. It consists in thinly stratified grey-pink clay

interbedded by grey-greenish glauconitic sand, with irregular syn-sedimentary "cryoturbations" (Roep *et al.*, 1975). South of the Warcove depression, Paleozoic pebbles were observed within clays of the lower Slack, indicating a flow or a drift towards the N-W according to the erosion of the Paleozoic basement in the Marquise's sector. This is paradoxical with the observations of Roep *et al.*, 1975. These beds are faulted and cut in blocks according to the Marquise's new geologic map (Mansy *et al.*, 2002). These beds may reach up to 30 m at Warcove (drilling). The lower Slack Beds mostly copies the Upper Barton Beds of Friars cliffs near Highcliffe (East of Bournemouth) with subunits equating Friars beds A3, B, C and D rich in calcareous septa (the "biscuits") (Curry *et al.*, 1969, - 1975; Curry, 1992). In the Northern Warcove, under these same clays, Lefèvre and Sommé (2001) observed in drilling darker grey clays with at their base the "sables de Béline", a shelly oxidized sandy facies, thick of 7 m, considered as Quaternary. This sedimentary record developing below the Lower Slack formation is similar to the Barton sands of the Wessex (Curry *et al.*, 1969, - 1975, Curry 1992; Denizot, 1968). The lagoon aggradation at the Slack formation could correspond to extensive Bartonian as it occupies as well the Warcove valley and the estuary of the Slack River, but also occurs south of the Boulonnais, close to the Canche River as a similar grey-pink clay was observed in drilling resting on the Thanetian / Ypresian at Villiers (Canche River).

The widespread extent of the Bartonian (40 - 37 Ma) in the Wessex-Wight basin should consolidate this interpretation. The Bartonian is folded on the Northern slope of the Isle of Wight. In the sector of Highcliffe, Bartonian is affected by co-seismic synsedimentary deformations (West, 2010) and its lower facies are grey clays, often truncated directly by the Mio-Pliocene ("Quaternary") deposits. This is also the case for Slack (see further). In Belgium, the Bartonian is also tilted (Vandenberghé *et al.*, 2004).

At the regional scale, this possible Bartonian and its Ypresian basement show a 40 m offset controlled by N50 faults between the drilling at Villiers and the outcrops of St-Josse-Montreuil. This observation corresponds very well to the late deformations observed on the Isle of Wight (Curry *et al.*, 1975) and at the Pointe-aux-Oies. It corresponds to the main phase of tectonic inversion, synchronous with the Pyrenean orogen, already recognized for the Celtic domain and the Western Approaches of the English Channel (Ziegler, 1990). In the English Channel, the Middle Eocene, unlike the lower one, records differential accommodations giving evidences of a synsedimentary tectonic activity. The Boulonnais is uplifted, easing the incision of the river system and the dismantling of the Paleogene saprolites developed in the Upper Cretaceous chalks. For Curry (1992), the strait seems open during the very late Eocene and the lowest Oligocene.

#### *The Oligocene and the Rupelian*

Because its low altitude (+8 to +30m), another possible interpretation of the rhythmic clays of the upper part of the lower Slack Beds could be a continental Rupelian facies. No argument allows to assert or to counter this hypothesis, Rupelian being extensive at the North of the strait (Clays of Boom ; Vandenberghé *et al.*, 2004; King, 2006), where the rhythmicity follows the Milankovitch cycles (Vandenberghé *et al.*, 2004)

The whole axis Weald-Boulonnais would be, according to the published data (Ziegler, 1990), emerged during the Oligocene (lack of preserved deposits) due to a renewed inversion, but with an open strait from the middle Eocene, the river system certainly exploited the former strait. Published paleogeographic maps of the Oligocene (Pomerol, 1973) localize a continental barrier at the level of the strait, in spite of the quasi-identical character of lower Rupelian of the facies of the Isle of Wight and Tongeren (Van Simaëys and Vandenberghé, 2006). The strait is thus open during the Bartonian, probably still open at the beginning of Rupelian (c.32 Ma,) as a result of the E-W extension phase of the Oligocene, related with the major activity of the European rift. This phase enabled a late opening of the strait before the deep regression of the Chattian (24 Ma). Downstream of the English Channel the Oligocene Jones Formation incises the Eocene at the base of the Western Approaches (Evans & Huges, 1980) probably recording the end of the uplift of the Boulonnais and the Bray high. In the same time, a regression due to the opening of the Atlantic Ocean in the North of Iceland and to the building of the first Antarctic ice sheet (38 Ma, Ziegler, 1992; Abreu *et al.*, 1998). Its impact on the Boulonnais and the Weald allows with the inversion the reactivation of the weathering and the continuation of the erosion. The Strait of Dover probably disappeared, in the late Oligocene, remaining closed during most of the Miocene, due to the impact of the Alpine orogen. The strait is transformed in a major valley system flowing to the south, due to the southward tilting of the reactivated Varsican overthrust.

## 2) The Neogene

The Neogene is not yet recognized in the Weald, the Leham Beds (+180 m) excepted. Their faunal content of these beds has been attributed *in fine* to the upper Miocene (Cooper 1980; Balson 1989, King 2006) as also for the Monts des Flandres (Formation of Diest; Vandenberghé *et al.*, 1998). Both mark a coastline (Desoignies and Thibaut, 1968; Pomerol, 1973; Balson, 1989; Curry, 1992). In Belgium, the formation of Diest covers both the Tortonian and the very early Messinian and forms sand banks parallel to the paleo-coast (Vandenberghé *et al.*, 1998). The strait seems close according to the last data obtained by Dinoflagellates stratigraphy (Louwye & Laga, 2008) in opposition with Margerel (1989) observations on foraminifers. Large coastal gravels ridges existed on both side of the strait, attesting with the sand banks of high energy. It drifted W-E from the Noires Mottes to Leuven in Belgium, with a mineralogy reworking Nordic and Ardennes elements (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2002; Vandenberghé *et al.*, 2004) and from Aldershot to Leham (UK), probably crossing the strait. A late Tortonian- early Messinian (c. 7 Ma) was also recognized at Fécamp (Mercier *et al.*, 1997).

#### *The Tortonian-Messinian: the upper Wimille and Wimeroux Beds.*

The beds of the Noires Mottes (+150m), the last "Monts des Flandres", rarely in situ, consist in a stratified ferruginous conglomerate with a sandy matrix cemented by goethite; its thickness never exceeds 5 m. It reworks pebbles of flint, Eocene silicifications and filonian quartz; it is rich in glauconite and sometimes preserves moulds of shells. The mineralogy of the sand fraction is reworked from Nordic and S.Ardennes sources (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2002).

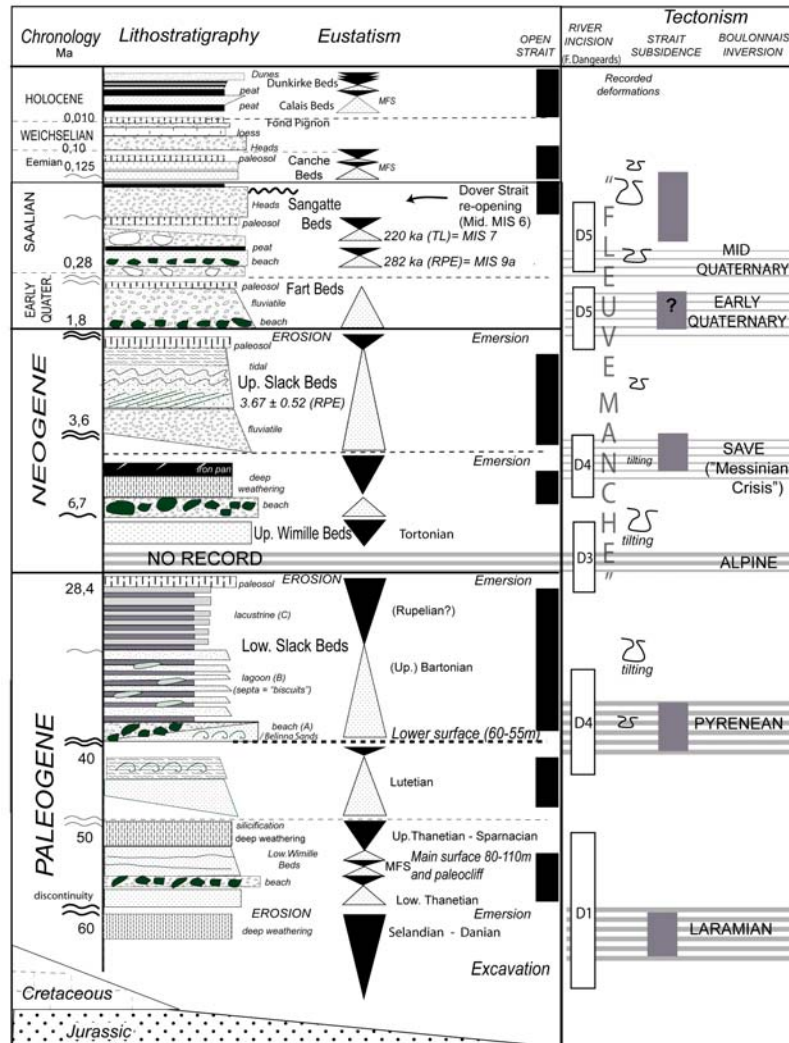


Fig.6. — Compound stratigraphical log of the Cenozoic stratigraphy in the Boulonnais. Modified from Van Vliet-Lanoë *et al.* (1998).

Fig.6. — Log stratigraphique composite des formations cénozoïques du Boulonnais. Modifiée par Van Vliet-Lanoë *et al.* (1998).

Another facies appears in an extensive way as well to Wimille (La Trésorerie) as in unconformity on a silcrete at the top of the quarry of the Croix-du-Loup (Verlincthun) or as south of Boulogne, eroding the Jurassic under the Holocene dune field. The upper Wimille Beds mostly crops out at the East of Boulogne (St Martin-de-Boulogne: Mont de Joie) at the Warne d'Ecault and at Wimille (Mont Boisé, La Trésorerie) filling a network of shallow paleo-valleys in connection with a fault N150 up to +90 m. These Wimille Beds consist in green fine sand (up to 3 m), stratified (2D dunes) including grains of milky quartz and volcanic minerals, interstratified with clayish, sometimes organic, fine beds (wood); the neoformed glauconite is abundant. These green sands correspond to a facies of tidal channel with shell moulds, further weathered by a red yellow podsolic soil and a goethite iron pan. Compared with the Noires Mottes conglomerate, it evidences another source of sediments originating from the eastern border of the Paris basin, via the Paleo-Somme River (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1998). The bottom of the dry valley of Dannes-Neuchâtel (+ 66 m) is filled in the North with 12 m of clayey sands, rich in flint red

(Bonte *et al.*, 1985) which is well similar with the upper Wimille Beds. These Wimille Beds are younger than the early Oligocene (silcrete) and seems very similar to the Diest formation of Diest, but in an environment corresponding to a shallow embayment. The strait remains closed.

At lower altitude (+ 8 m, subsiding western coastal panel), at the base of the cliff in the Pointe-aux-Oies *sensu stricto*, an marine abrasion surface, highly weathered by a cryptokarst, is covered by 2 m of poorly sorted heterolithic conglomerate (pebbles to boulders), characterized by a thick goethite cortex (cm thick). It forms the Wimereux Beds. This conglomerate is sealed by goethite and is somewhat younger than the upper Wimille Beds. These pebbles are surmounted by 4 m of sands of the upper Slack Beds, Piacenzian in age. These pebbles are also splayed at the surface, south of the Strait of Dover. Given the amplitude of the glacial forcing at that time (40 m, Abreu *et al.*, 1998), it is possible that the upper Wimille Beds represents a interglacial high stand and that of Wimereux a "glacial" low stand (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2002). It is indeed the time when the large ice sheets as

those of Antarctica and that of Greenland formed (fig. 4). A dating obtained in a similar context at Pénestin (estuary of the Vilaine River, Brittany) yielded an age of 6,7 Ma (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2009) and a Messinian low stand with anchored ice dynamics, fitting the cooling recorded by Louwye & Laga (2008) in the Kasterlee Beds in Belgium.

Deformations and tectonic activities are recorded. In the South of the Boulonnais, the Wimille Beds are preserved on a surface reaching + 60 m (Samer, Verlicthun) connected with the pass of Dannes-Neuchâtel (+ 80 m). This surface can be followed in the North from La Pointe-aux-Oies to Wissant (+ 56 m) and along the left bank of Slack River, apparently tilted southward at the North of the River. On the Gris-Nez cape, it is developed between + 60 and + 50 m. The conservation of these beds is strongly controlled by the faults of Slack-Epitre and of Wimereux-Belle (block tilting) (Mansy *et al.*, 2001). In opposition, the Noires Mottes (+150m) are lifted up relatively by about 20 m, in connection with the activity of the flexure of Sangatte. A vertical offset of 20-30 m lowers the paleo-surface and reveals some subsidence on the eastern side of the strait, due to a faulting in parallel with the coast; it can be observed between Terlincun - la Poterie (+55 m) and St Martin de Boulogne (+90 m) and at the level of Les-Garennes-de-Wimille (+ 63 m) and la Trésorerie (+ 84 m). This Wimille Beds is microfaulted in dextral strikeslip N150, synchronous of the end of its deposition and displaced by meridian faults. The phase of weathering with the goethite pan seals the tectonic movements and the valley incision. It is also the time of the Savian tectonic phase ("Messinian Crisis") and of a major rift jump in Iceland (8-3 Ma, Garcia *et al.*, 2003).

*The middle Pliocene of the "Dune Rousse" or the upper Slack Beds (fig. 6).*

At the North of the Pointe-aux-Oies (+5 to +25m), yellow-red sands crop out below the recent dune and an upper conglomerate, a terrace Pleistocene in age. At their base, a thick conglomerate, 3 to 5 m thick, reworks flint and also an important proportion of angular blocks issued from Marquise's Paleozoic; it incises the Lower Slack Beds. It is covered by a series of 3D sandy bars, prograding northward, locally deformed by structures of sliding (recumbent folds) (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1998). It represents an ancient river channel evolving upward to a tidal facies. They are protected in a graben under the Flandrian (Slack River marshes). These beds also exist in the south of the Warcove depression and locally in the quarry "du Fart" at Wissant according to de Heinzelin (1964) and Roep *et al.*, (1975). In the quarry of Wissant, these sandy bars evolve in system of bars and scours (2D dunes) also incising the Lower Slack Beds (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1998). In the Warcove, the red sands can achieve 10.5 m, 18 - 20m in the South of the Fart's quarry forming a terrace noted Q2S by Lefèvre and Sommé (2001). They constitute according to us the track of a tidal channel, flowing from Wissant to Ambleteuse and belonging to the upper Slack Beds. This complex may reach near +35 m in altitude.

A dating of  $3,67 \pm 0,52$  Ma was obtained by ESR on the Red Sands' base (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004), which places these beds in the same stratigraphical position that the sands of Kruischans and the Poederlee formation in Belgium (Vandenberghe *et al.*, 1998; Louwye & De Schepperes, 2010), and the base of Piacenzian (sequence Za2-Pia1, Hardenbol *et al.*, 1998). The facies " Red Sands " in the

Boulonnais is comparable to Pliocene " Red Sands " of the Forest of Clairmarais (Desoignies & Thibaut, 1968), white sandy facies with mega-ripples, evolving into tidal facies in the quarry of La Pyramide at Helfaux (+ 60 m, fig. 5), in the quarries of Montreuil (+50 m, valley of Canche River) and in the ancient plateau gravel's pits of Wailly-Beaucamp (+ 43 m, Authie River). All those beds constitute extensive thin estuarine splays truncating the Eocene like at St Valéry-sur-Somme (+ 43 m).

Malacofauna and micropaleontological analysis in the North Sea basin prove the persistence of an open strait with as today a Northward tide current along the French side of the strait until 1,79 Ma (end of the Pre-Tiglian; Meijer & Preece, 1995).

### 3) The Quaternary (< 2,6 Ma)

*The Lower Quaternary: the Fart Beds (Wissant's gravel pit.)*

It corresponds to a paleo-estuary of the Warcove (de Heinzelin, 1964) from which the base reaches -15 m. It consists in a poorly sorted and frost shattered conglomerate of mixed ochreous and fresh flints, reworking faunal remains of the lower Pleistocene (*Hippotamus major*, *Elephas meridionalis*) and glacial erratic from Scandinavia (syenite, granite, dolerite, Paleozoic sandstone, silicified stem of Paleocene palm tree). This unit crops northward out to + 13 m, and is covered by heads and loess. It corresponds to an estuarine complex attributed to the Cromerian s.l. (800 to 480 ka; de Heinzelin, 1967), incising the Aptian and the upper and lower Slack beds. According to the faunal contents, following Jones and Keen (1993), it would rather be an estuary from the Waalian to Eburonian (1,5 to 1,4 Ma). It is possible that the Fart Beds could also be subsynchron of the lower Pleistocene of the Somme estuary, yielding 1,8 Ma (Mt Pillar, Laurent *et al.*, 1998), here in a low stand facies. The Fart Beds could be the first testimony of the strait Quaternary closure at 1,79 Ma (Meijer & Preece, 1995).

These Fart Beds also crop out south of the Boulonnais in the form of raised beach ridges armouring the Picardy plain. It forms a series of polygenetic beach ridges from which the final term is contemporary of the Sangatte Beds and of the Canche Beds. In the gravel pits of Rue-St Firmin, a lower Pleistocene fauna was also observed with Paleogene silicifications and erratic boulders (Dubois, 1924) derived from Cornwall or Armorican massifs (dolerite, diorite).

*The Middle Pleistocene Beds of Sangatte*

These Beds are deposited on a marine abrasion surface (+5 to +8 m) which is located at the northern part of the flexure of Sangatte (Mansy *et al.*, 2001). The beds are surveyed by us since 1968.

On a deeply frost shattered platform, a regressive gravely beach was formed in cold conditions (shore ice activity; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004), as also proved by the presence of a boreal malacofauna described by Lighter (1924, in Sommé *et al.*, 1999). This first shore deposit corresponds to the unit B of Balescu and Lamothe (1993) and to the units 12c- 12g of Antoine (1989). Sommé *et al.*, 1999 attribute it to the "Holstenian" (attributed to "MIS 9" instead of Holstenian = MIS 11) by analogy with the lower Herzelee Beds which

yield 280-300 ka. A recent dating by ESR of the lower Sangatte beach yielded an age of  $282 \pm 25$  ka BP (late MIS 9; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004), as in other similar position along Brittany, Cornwall and southern England as also Flanders (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2000). This paleo-beach is buried by rock fall and solifluction before being incised by a new fossil cliff. A second beach (green sands with some gravels) reaches + 6 m. It has been dated at 200 et 229 ka by thermo-luminescence (MIS 7; unit C of Balescu & Lamothe, 1993). The two beaches are sometimes observed in overlapping. This second beach is covered by loess and slopes deposits including periglacial soils, co-seismic and tectonic flowers deformations (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004).

The old loesses were dated by TL to MIS 6 by Balescu *et al.* (1984). By analogy with similar and dated littoral sequences, the loessic sedimentation developed between 160 and 140 ka (Loyer *et al.*, 1995). At the top of this loessic complex, a thick weathering with solution pipes develops synchronously with the Last Interglacial period (MIS 5e: 130-110 ka; Sommé, 1977; Balescu *et al.*, 1984). Slope deposits of the Last Glacial period, a late glacial pedogenesis and limited slope deposits of the Younger Dryas are observed although attributed to the whole Weichselian by Antoine, 1989.

This Sangatte Beds thus covers MIS 9-8-7-6-5 and the Last Glacial period. The most important erosion occurs during the MIS 6. The late MIS 9 beach and the recent one are rich in flints and the Eemian beach (MIS 5e) is not cropping out directly at the north of the flexure, at Coquelles excepted. A normal fault activity of the flexure exists at c.160 ka (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004): the Eemian pedocomplex and MIS 6 and 7 deposits are deformed by 3 nearby faults with a vertical offset of at least 2 m. All the tectonic deformations cumulated on the Sangatte section represent an offset of at least 6 m of the sector since 200 ka (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004). The opening of the strait is attested in the loesses of the MIS 6 cropping in the cliff. Their mineralogical composition is wider than for the earlier loesses (Balescu *et al.*, 1984) and gets closer to these of the recent loesses marked by an important Scandinavian influence. This opening could take place towards 160 ka in relation with an activity of the flexure lowering the northern compartment of the strait.

#### *The Eemian beds of the Canche River: new data*

Specific beds were observed by drilling in the estuary of Canche River and recognized on the whole Picardy maritime plain. It consists in 2 units related with the raised beach ridges of the Picardy plain (Gosselin; PhD in preparation). The lower unit consists in a decalcified tidal muddy formation, covered by oxidized sands. The second unit consists in sands and grinds (white flint fragments) commonly decalcified. Near the mouth of Canche only, this upper member was reached at a depth of - 30m by drilling, reworking shells (*Cerastoma edule*; Meurisse, 2008). On the western face of the Crotoy raised beach ridge, this formation is followed by weathered dune sands, often cryoturbated. It belongs to the maximal high stand (MFS) of a former interglacial older than the last glaciation because it is covered by Preboreal ( $^{14}\text{C}$  dating) and older peats near Rue village (Ters *et al.*, 1980), and loessic deposits near the Authie river. It can be considered as Eemian as stressed by Edmondspöl (1993) and probably synchronic with the late activity of the raised beach

at Coquelles (Sommé, 1977, - *et al.*, 1999), at Loon and Watten (Sommé, 1979; Sommé *et al.*, 1994), at the Ply-de-Camiers (Canche River estuary; Gosselin, 2007) and in Picardy at Bagarre (Tuffreau *et al.*, 1975) or in the Villiers - St Firmin - Crotoy raised beaches.

#### *The Flandrian: a reappraisal*

A complete re-analysis of the littoral prism and the estuarien Holocene was undertaken within the framework of several recent PhD (Gandouin, 2003; Meurisse-Fort, 2008; Gosselin, PhD in preparation). The Flandrian Beds are commonly subdivided into 2: the Calais and the Dunkirk beds (Dubois, 1924; Sommé, 1977). The Holocene transgression reached very early from the South the entrance of the St Omer's basin (towards 8500 BP), inducing the formation of the basal peat (Preboreal), in this subsident sector at the foot of the Artois' flexure (Gandouin *et al.*, 2007). The transgression rose very quickly to 7000 BP (Melt Water pulses Id) to achieve c. 1 m 50 above the current HWM towards 6000 BP (Meurisse-Fort, 2008): it is the maximal surface of flooding (MFS). Estuaries are invaded by tidal mud flats high upstream from the current coast line. This true interglacial transgression corresponds to the former "Calais beds", whereas gravely beach ridges formed at the foot of cliff along the Picardy plain, as at Villiers and along the northern cliff of Boulonnais between + 5 and + 9 m (Coulogne; Sommé, 1977; - *et al.*, 1999).

This maximum is followed by a marked regression down to -8 m (- 12 m for the lower intertidal zone) in the estuary of Canche River (Gosselin, 2007; Meurisse, 2008) and - 6 m at the entrance of the basin of St Omer at Watten (Gandouin *et al.*, 2007). It corresponds to the Subboreal regression (c.5500 BP); this regression occurred in absence of regressive dunes on the Belgian and Picardy coasts (Meurisse *et al.*, 2009). The first coastal dunes' development due to the impact of the storms formed c. 3000 BP. Towards 300 AD, a climate cooling associated with an increased storminess and floods on land led to the construction of the Older Dunes, during the Merovingian cooling (Meurisse *et al.*, 2005). The Young Dunes retrimmed the Older one during the Little Ice Age cooling, also in connection with an increased storminess. It is also the period when the low beach ridges of the Calais maritime plain developed (Sommé, 1977). In fact, the "beds" of Dunkirk mostly consist in repeated flooding due to storm's frequency rather than a true transgression: the eustatic level is globally slightly regressive. These pseudo-transgressions were facilitated by the compaction of the previous beds, mostly during the Subboreal regression (Gandouin, 2003; Meurisse, 2008).

#### IV. — THE NORTH SEA - EASTERN ENGLISH CHANNEL CONNECTIONS.

The English Channel is characterized by an extended marine abrasion surface, locally superimposed on much older surfaces of Mesozoic or Permian ages (Hamblin *et al.*, 1992). Since the late Paleogene, the sea level is controlled by a progressive lowering connected with sea floor spreading and ice cap building, especially since 38 Ma, with several accelerated steps at 11; 5,9; 2,4; 1-0,8 and 0,4-3 Ma (Abreu *et al.*, 1998) but it may be also forced by a hotspot bulging as



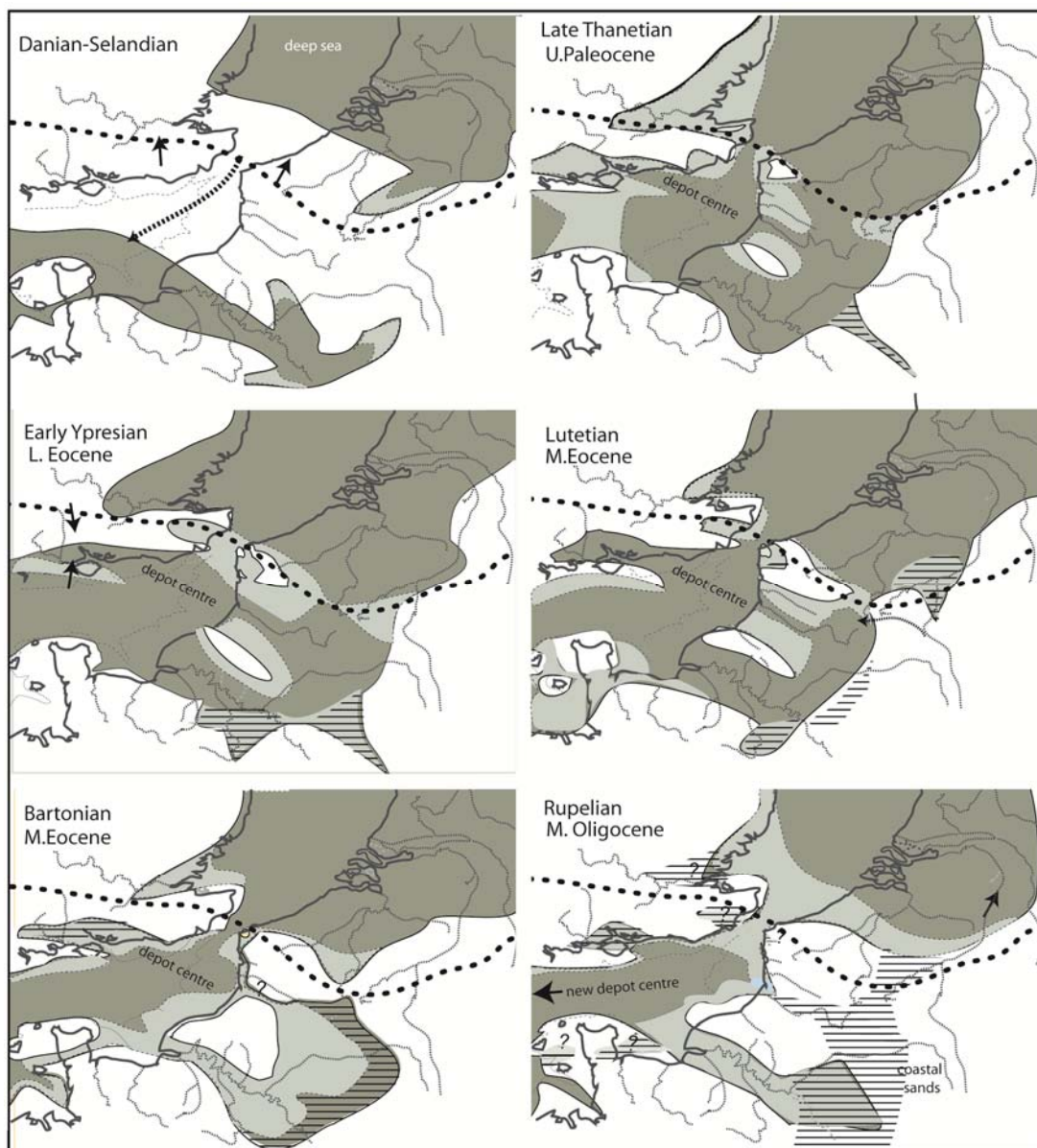


Fig. 7. — Paleogeographic Reconstruction of the Strait of Dover during the Paleogene. The data from Hamblin *et al.* (1992), Pomerol (1993) and King (2006) are constrained by the regional structural control and our new data. Stippled line: Variscan deformation front. The horizontal lines represent lagoonal to lacustrine facies, light grey : shallow sea.

Fig.7. — Reconstitution de la paléogéographie du détroit du Pas-de-Calais pendant le Paléogène. Données de Hamblin *et al.* (1992), Pomerol (1993) et King (2006), contraintes par le contexte structural régional et nos nouvelles données.

the Greenland-Iceland one. Several eustatic curves were reconstructed from the sedimentary record in “stable” regions (Haq *et al.*, 1988; Abreu *et al.*, 1998; Miller *et al.*, 2005), in connection with the isotopic curves. For Quaternarists, the strait opening, the river incision and the terraces are classically considered as controlled by glacio-eustatism and recently with some tectonic component responsible for a hypothetical Pliocene uplift (eg. Antoine *et al.*, 2007). During Quaternary, glacio-isostatic deformation may also have modified the river base level. Correlative to the tectonic movements controlling the transgression and sedimentation patterns, river and karst networks may trace the succession of tectonic events.

### 1) The discrete openings of the Strait

Sediment record on the Boulonnais is continuous from the late lower Jurassic to the Cenomanian. After, sedimentation is more discontinuous, shallower during the Turonian and ends with the Santonian (Mansy *et al.*, 2002). The Weald-Boulonnais antiform emerges with the Laramian tectonic phase and a limited regression interpreted as limited glaciation on Antarctica (Miller *et al.*, 2005; fig. 4). We have also seen that the excavation of the Boulonnais began already during the Paleocene, from the South through the Tingry pass, allowing the deposition of Ypresian sands (end of the high stand of the PETM complex, fig. 5). The strait seems open



from the late Ypresian prior to the deposition of the Lower Slack Beds. It seems thus that the Boulonnais morphology with the paleo-cliff and the main surface was already incised by about 80 m probably during the Thanetian (low stands), as a result from the post-Laramian tectonic relaxation. The E-W Slack and N-S Warcove valleys initiated probably during the brief regression events after the PETM, especially at the end of the “Sparnacian-Cuisien facies” (56-50 Ma).

The strait is also open from the Middle Eocene as stressed by Ziegler 1990, as Middle Eocene Thetys fauna reaches the North Sea until the Rupelian (Van Simaëys & Vandenberghe, 2006). In fact the sedimentary record is nearly continuous on the Boulonnais zone and surroundings, controlled by the rapid high stands succession as described by the eustatic curve by Miller *et al.*, (2005; fig. 4). As the strait exists, tidal currents may during high stands enhance the valley systems incised during the Laramian uplift. As the compression stress field is meridian, valleys use as well W-E faults and folds as N-S faults.

Afterwards, the strait is closed from the late Oligocene to the Tortonian with the Alpine tectonic phase, briefly open from 3,7 Ma to 1,79 Ma and re-open from c.160 ka. During the Eemian (MIS 5e: 130-110 ka), the Strait reached its present width, probably from the re-excavation of the pre-existing Mio-Pliocene Lobourg Deep. Its opening was made easier by its soft sedimentary infilling (beach gravel ridge included), caused by potential stronger tidal currents (Scourse & Austin, 1995) related to high stands up to + 6 m above the Holocene MFS. Only scarce occurrence of the Eemian exists in the eastern English Channel, on the coast of Sussex (White, 1915). In another hand, the low biodiversity of the southern North Sea prior to the Eemian (Meijer & Preece, 1995) attests more for an embayment with tidal flats limited to the south by a raised beach ridge, an image coherent with Tesch (1939) observations. This was located on the main flexure and anchored on the Cap Gris-Nez and Dungeness. An opening of the strait seems also rather difficult for tectonic reasons (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2002). The zone of the strait is uplifted minimum by probably 50 m, due to the Middle Quaternary tectonic event (c.600 to c.280 ka).

## 2) The Fosses Dangeard

A main characteristic of the strait is the existence of the “Fosses Dangeard” parallel with the main flexure of the Variscan overthrust (Destombes *et al.*, 1975). These deeps correspond to a series of W-E small dextral pull apart basins, exploited by rivers during emersions and scoured by tidal currents during transgressions. It results from the crossing of the N 120 structural direction from the Weald and the E-W direction from the Boulonnais (fig. 3). A seismic campaign performed in 2002 allowed to determine a complex valley system in the eastern part of the “Fosses Dangeard”. Five main valley systems were determined (fig. 9; Delestret, 2004). The oldest system, initiated during the Laramian emersion may thus be excavated and filled from the onset of the Eocene (D1), as discussed higher. The second valley system presents a late drainage to the south during the second and major uplift of the Variscan front and it’s southward tilting; it means that the second generation of infilling (D2) (fig. 8) should correspond to the Middle-Upper Eocene (Lutetian and Bartonian), deformed by the Pyrenean Orogen. Several incisions in the chalk along the Picardy coast are filled with these formation (Gosselin, PhD in preparation). As

the strait remained open to the lower Rupelian, the North-South incision was probably exaggerated by tidal currents, accumulating the third generation of infill (D3) during the Rupelian (eg. clay of Boom, in Belgium). D3 is further incised by fluvial incision from the Chattian as stressed by Jones (1990) to the West. The Lobourg channel (fig.8) crosscuts this system and is probably inherited from the uplift of the front synchronous with the Alpine orogen (late Oligocene phase) and filled with Neogene fluvial terraces (D4) as proposed by several authors (Dingwall, 1975; Bridgland & D’Olier, 1995; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004). D5 corresponds to the Pleistocene system (Delestret, 2004). During late Tortonian / Messinian, the Strait of Dover remains closed (Margerel, 1998; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1998; Louwye & Laga, 2008). Huge gravel or sand bars follow the coasts. Evidence of vertical offset, oriented N-S is recorded in the western Boulonnais, disconnecting the valley system of the Boulonnais from these of the Fosses Dangeard. This vertical displacement is sealed by the Middle Pliocene Red Sands of the Slack estuary.

## 3) The palaeo-valley systems (Fig. 8)

### *The tectonic control*

The whole English Channel is characterised by extended abrasion platforms, imperfect and polygenetic on which palaeo-valleys systems are carved. The platforms truncate folds in Jurassic and Cretaceous rocks on the English side and the Boulonnais coast. The southern boundary of the area, including southern Brittany, the entrance of the Channel, Cornwall and Scillies belongs to the Western Approaches of the Channel system and is subsiding by steps as a passive margin and as a side of the Western Channel “graben” since the opening of the Biscay gulf (Evans, 1990) from the early Cretaceous. Southward tilting in the vicinity of the Variscan front is also proved, by the drowning of Cornwall and Western Brittany rias and by the drowning of the paleo-cliff along the southern coast of England (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 1998, *et al.*, 2002). Global pulsed tectonic events were recognized by Sheridan (1987) for the Paleozoic and Mesozoic. A similar pulsed system exists during the Cenozoic, in association with long wave length deformations (de Lugt *et al.*, 2003; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2002, 2004; Wyns, 1991). The sedimentary gap from the late Oligocene to the middle Miocene in the Boulonnais records the Alpine tectonic phases and a long phase of emersion. In Belgium, the Miocene cryptokarst of Condroz described by Dupuis (1992) is mainly synchronous with the late middle Miocene and of the late upper Miocene tectonic uplift events.

### *The English Channel and Southern North Sea platforms*

The Channel platform was excavated by marine abrasion as well as also the main paleo-cliffs. These cliffs are cropping out along the Picardy coast although drowned and tilted along the Southern Britain coast, Western Brittany and Northern Cotentin (fig. 8). The first abrasion surface is located at the base of the Jones formation in the Western Approaches (WA) (Evans, 1990) which now records most of the late Oligocene to the end of the Serravalian (Le Roy *et al.*, submitted) also correlative with the Alpine orogen, and the events on the Northern Mid Atlantic Ridge (Géli, 1993). These successive

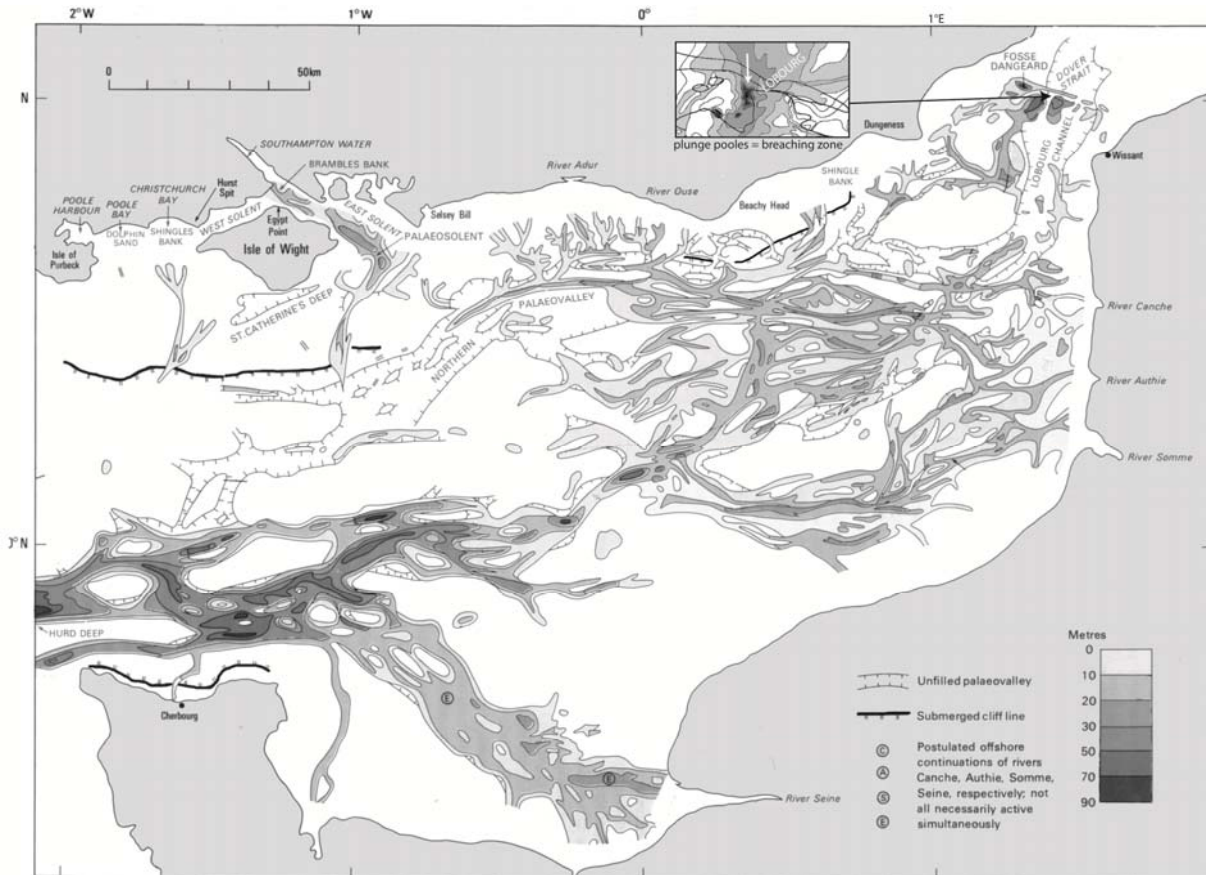


Fig. 8. — Palaeo-valleys system within the Eastern Channel (from Alduc, 1979, adapted by Hamblin *et al.*, 1992), with the position of the drowned paleo-cliffs and the Weichselian Channel. Notice the presence of scouring (plunge pools) in the chalk at the level of the strait (frame) due to breaching of gravel ridges; the Fosses Dangeard limits are marked by a thick line (from the map of Kellaway *et al.*, 1975).

Fig.8. — Système des paléovallées de la Manche orientale, avec la position des paléofalaises ennoyées. En encadré, les surcreusements au niveau du détroit (« plunge pools ») liés à la rupture des cordons littoraux anciens.

marine abrasion surfaces formed mostly during low stands, boosted since the upper Miocene by sea ice abrasion (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2002; - 2009). This chronology seems also valid for the Hampshire-Dieppe basin (HDB) as the Paleogene is truncated by the main surface. One of these erosion surface in the WA is recorded by the occurrence of an unconformity at the base of the Cockburn Formation (Evans 1990), formation which constitutes a prograding submarine fan dated roughly from the base of the Tortonian to the Late Piacenzian (Le Roy *et al.*, submitted). A similar situation prevailed during younger lowstands in the WA as Late Pliocene incisions (Gelasian) are truncated by such a surface close to the platform edge (Le Roy *et al.*, submitted). To the South-West, the last major incision connected to this surface has been also dated on land to the base of the Tortonian by ESR (Laurent *et al.* 1998 ; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2002; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2009; Paquet *et al.*, 2010).

The Southern North Sea (SNSE) embayment is marked by a shallow abrasion surface truncating the Thanetian-Ypresian formations, very rapidly covered by Quaternary deposits. Nevertheless, paleo-valleys with Paleogene and Neogene fills are preserved below the Quaternary (Dingwall, 1975; Vandenberghe *et al.*, 1998). Two main incisions are recorded: one at the base of the Middle Eocene and one at the

base of the Tortonian (Vandenberghe *et al.*, 1998) commonly incised into the Thanetian. The most common basal incision is preserved at the base of the Tortonian, at the base of the Dessel sands (formation of Diest) in Belgium as also at the base of the Caesar Camp Gravel at Aldershot (fig.3; Blackwater River, UK). This argues for a generalized incision during the lowstand at the base of the Tortonian (11.7 Ma) (synthesis in Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2002), coinciding with the end of a late tectonic event and an important glacio-eustatic drop.

#### The Old paleo-valley system of the English Channel

West of the Strait of Dover, the main characteristic of the Eastern Channel, mostly East and south of the Isle of Wight is the system of paleo-valleys which has been originally described (Alduc, 1979; Auffret *et al.*, 1980) as a complex “old” system. A more superficial one exists connected to the Lobourg Channel (fig. 8). Fluvial incision in response to basement uplift is a well-documented phenomenon (eg. Schumm *et al.*, 2000). The Eastern Channel valley morphologies are perfectly controlled by Cadomian tectonic structures parallel with and in the prolongation the Hurd Deep system and the Lizard suture zone in the Western Channel (fig. 3). They are moreover influenced by late Variscan

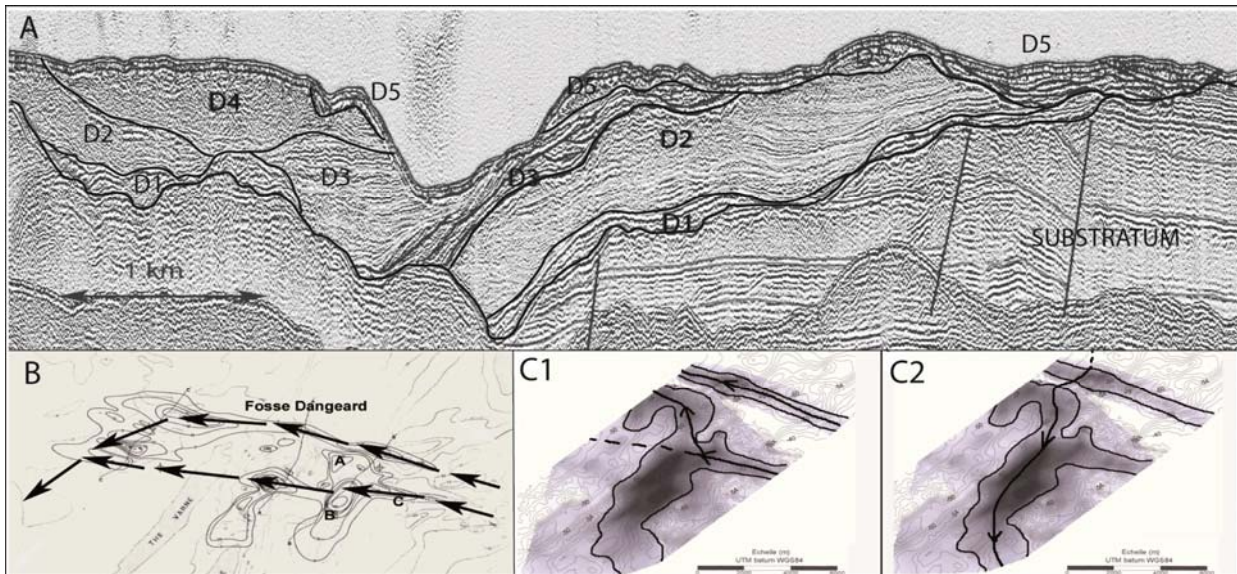


Fig. 9. — A: Seismic section across the Eastern Dangeard Deep, crossing the Lobourg Channel. Shape (B) and flowing (C) direction of the paleo-valleys (Delestret, 2004). C1 = D2 units.; C2 =D3

Fig. 9. — A : Profil sismique au niveau des Fosses Dangeard Est. Morphologie (B) et direction d'écoulement (C) au niveau des paléovallées. (Delestret, 2004). Unités. C1 = D2; C2 =D3

structures, such as flexures inherited fronts like the Variscan overthrust or Permo-Triassic tension faults, most of them being reactivated during the tectonic inversion phases. The northern edge of the Hampshire Dieppe basin (HAB) is controlled by the southern flexure of the Boulonnais, guiding the Paleo-Canche River across the channel. Both valley systems have been attributed by Alduc, 1979 and Auffret *et al.*, 1980 to the regressions during Quaternary events.

To the West, the last major incision has been also dated on land and on the near offshore to the base of the Tortonian by ESR (Electron Spin Resonance ; Laurent *et al.*, 1998; Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2002, Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2009; Paquet *et al.*, 2010). We had correlated the northern paleo-valley system responsible for the terraces described by Alduc, 1979 and Auffret *et al.*, 1980, with the Late Miocene uplift of the Strait of Dover (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2004) and the renewed opening of the strait during the Pliocene by capture of the Eastern Channel river net by the North Sea (differential subsidence). This reopening of the strait is associated with the splaying of Tortonian gravels on the floor of the eastern Channel. This paleo-valley system seems correlative of the Mio-Pliocene Cockburn formation in the WA. All these Mio-Pliocene valley systems, probably retrim olders, as the late Oligocene (Jones, 1990) responsible for the Jones formation but also a Mid Eocene paleo-valley system (Lutetian-Bartonian) feeding the HDB. It seems probable that the Paleo-Seine system (fig. 9) is already Mid Eocene in age, seeing the superimposed character of the meander tracks on land and the abundance of "Ladères" sandstones on the middle terrace. Similarly, the incision at the base of the lower Lutetian in the SNSE (Vandenberghe *et al.*, 1998;- 2004) is controlled by a regression at the end of the Ypresian (Hardenbol *et al.*, 1998) more important following the eustatic curve of Miller *et al.*, (2005; fig. 4). It coincides with the major event of tectonic inversion in Western Europe (Ziegler, 1992).

Three main systems of paleo-valleys are thus evident in the eastern English Channel : 1° an Eocene-Oligocene system characterised by several generation of shallow valleys, often filled with late Eocene sediments, truncated by a main abrasion surface, 2° an Miocene system already well incised, related to the long emersion of the Channel during the Lower and Middle Miocene, and 3° late a Mio-Pleistocene system with two terrace levels already in connexion with the Lobourg channel. The second and third systems correspond to the "Fleuve Manche" (Lericolais *et al.*, 1996; fig. 6). These fit with the D2-D3 and D4 units of the Fosses Dangeard.

#### 4) The young palaeo-valley system: the Plio-Pleistocene emersion and the breaching of the Strait of Dover.

The strait is closed from 1,79 Ma. With the accentuation of the sea level drop during glaciations from the Mid Pleistocene Transition (0,9 Ma), the Channel is emerged for long periods (Funnel, 1996). The youngest valley system corresponds to units D5 of the Fosses Dangeard. Concerning the Plio-Pleistocene times, the detailed works of Zagwijn (1989) and Funnel (1996) have brought complementary data. It is especially the case for the position of the successive shorelines in the southern North Sea basin which migrated progressively to the West with the Pliocene flooding, then retracted to the East, during the Pleistocene: this evolution is partly related with long wave length deformations affecting the Anglo-Brabant massif and the Variscan Front (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2002) but also with the mean interglacial sea level drop consecutive to the building of the Antarctic and Greenland ice sheets (Funnel, 1996). Raised shoreline anomalies also result of long wave length deformations in the English Channel and Southern North Sea regions (Van Vliet-Lanoë *et al.*, 2000) attesting of the persistence of pulsed tectonic events during the Quaternary. The empty character of

the NW paleo-valley may be partly attributed to erosion with recurrent transgressions.

The most recent valley system shows wide sinuous valley in the eastern Channel, mostly flat bottomed, with a braided system. It is commonly attributed to the Last Glaciation. A deep scouring incises the strait and also the paleo-valley system south of the Isle of Wight, at the emplacement of the Hurd Deep. The only core performed on the Fosses Dangeards cuts a peat interpreted as MIS 5d (Amersfoort), following Morzadec (in Kellaway *et al.*, 1975). In 2002, we succeeded too to produce a core, recording three “interglacial” coarse gravels interbedded with two levels of laminated, mica rich silts, devoid of fauna, which are similar to distal glacio-fluvial deposits with traces of ice segregation. It seems thus that this record which shows some evidences of the outlet of the North Sea paleo-lake probably covers more than a single glacial-lake event.

Smith (1985), Gibbard (1995), Gupta *et al.* (2007) and Toucanne *et al.* (2009) among others have suggested that the initial “official” breaching of the Strait occurred during the Anglian (MIS 12 or 0,42 Ma only, in their view), although the “breach” was prepared by a graben during Early Quaternary (Colbeaux *et al.* 1993). Gupta *et al.* (2007) argued for the possible breaching of a proglacial lake during MIS 12 and MIS 6 leading to several megafloods rushing through the English Channel. This interpretation is mostly based on the morphology of the paleo-valleys partly copying these of the Scablands in Western USA. In parallel, Toucanne *et al.* (2009) showed that large inputs of glacial sediments occurred on the bottom of the Biscaye gulf about 150 ka ago, in relation with breaching events related with rapid meltdown of the Scandinavian ice sheet. He suggested too that a similar system during MIS 12. The breaching of a “chalk ridge” stressed by Gupta *et al.* (2007) seems improbable seeing the strait history and the seismic profiles (fig. 9). The breaching was probably eased by the gravely nature of the raised beach ridges crossing the strait.

The event at 150-160 ka seems valid, as the strait shows a set of 3 scourings (fig. 8; plunge pools) incised in the chalk in its central part (down to -50 m for the main one). This is related to the maximal efficiency of erosion at the outlet of the “breached” reservoir (Rudoy, 2002). It does not correspond to a former sedimentary infilling of the Fosses Dangeard. Also the change in loess mineralogy in the Sangatte Beds (Balescu *et al.*, 1988) seems demonstrative. Other arguments are the major changes in sedimentation along the Picardy coast, an increased erosion rate on the coastal cliffs of the Boulonnais since MIS6 (Gosselin, PhD in preparation) and the preservation on erodible marls of a 9 m terrace covered by beach gravels SE of Watten in the St Omer basin, tracing probably the shore of the paleo-lake. Downstream of the strait, flat bottom braided channels, with some acceleration in narrowing are typical for periglacial or fluvio-glacial discharges in permafrost landscape. As observed at the level of the Hurd Deep or in the Northern paleo-valley (South of Wight Island), the over-deepening may be attributed to tidal scouring in a rather narrow, tectonically controlled valley during the rise by step of the sea level at the end of MIS 2 or earlier.

Concerning the MIS 12 event, it is evident from Toucanne *et al.*, 2009 data, but much less probable at the level of the Strait of Dover due to the temporary tectonic

uplift from 600 ka to 280 ka (beginning of the tectonic relaxation) and the malacofaunal observations of Meyer and Preece (1995). It probably issued from another fluvio-glacial source, as eg. the St George Channel, at the southern entrance of the Irish Sea.

##### 5) The phases of inversion and their signatures: could the Strait of Dover be an element of the European rift?

As described higher, the major feature is the inversion of Mesozoic deposits as the Weald-Boulonnais and the Bray structures which initiated in late Cretaceous (Laramian phase). It reached a maximum of activity during the Late Eocene (Ziegler, 1992, Coward, 1994) and Late Oligocene - Early Miocene phases (Badley *et al.*, 1998; Mansy *et al.*, 2002; Hillis *et al.*, 2008). Correlative deposits are first stored in the Hampshire-Dieppe basin, limited to the West by the Cotentin high. After with the main phase of inversion in the Western Approaches, seeing the tectonic orientation in this zone, some blocks are presumed subsiding like the Hurd Deep (Lericolais *et al.*, 1996), with mostly dextral strike-slip deformations. These guided from the shelf edge retrogressive erosion linked to the onset of glaciations. Thanks to this, the English Channel drained to the Atlantic from the Oligocene, the onset of the “*Fleuve Manche*”.

Western Europe also suffered a global post-Atlantic rift thermal subsidence. The prevailing meridian stress field reflects a combination of forces related to continuing counter clock-wise convergence of Africa-Arabia with Europe and North Atlantic ridge push (Nielsen *et al.*, 2007). In the Viking graben, at the North of the North Sea, the Paleocene phase corresponding to the backlash of the opening of the middle North Atlantic (Greenland-Norway) reactivated the pre-existing rifts (Vialy, 1988). Most of the elements of the European rift began to activate from the Middle Eocene by retrimming of Variscan, Permo-Carboniferous and Mesozoic crustal-scale faults (Ziegler, 1992) also controlling basin inversion in the southern North Sea and Western Shelf areas. The formation of large grabens was active mostly during Late Eocene and the Lower Oligocene, usually reactivating Permo-Triassic structures.

We have seen that rivers already occupied the Strait of Dover probably prior to the Bartonian (Warcove). This means that a pre-existing shallow saddle connected the Eastern Channel and Southern North Sea Basin, driven by W-E extension complementary to the direction of the main meridian stress field build both by the Northern Atlantic widening and the Laramian orogen. Some subsidence probably existed already during the Bartonian as expressed by frequent co-seismic and slump structures in the Lower Slack Beds and in the HDB. A renewed subsidence of the saddle certainly occurred from the Middle Eocene to the Rupelian, before being lifted up and tilted by a renewed inversion due to the main Alpine phase.

In the early Oligocene, 33 Myrs ago in the Northernmost Atlantic, relative plate motion between Greenland and Eurasia changed from right-lateral shear to oblique divergence as marked by the onset of deep-water massive exchange through the Fram Strait; this was probably formed during early Miocene times (20–15 Ma) (Engen *et al.*, 2008). During the Oligocene-Miocene, subduction resistance of the European foreland increased (Dèzes *et al.*, 2004), in relation



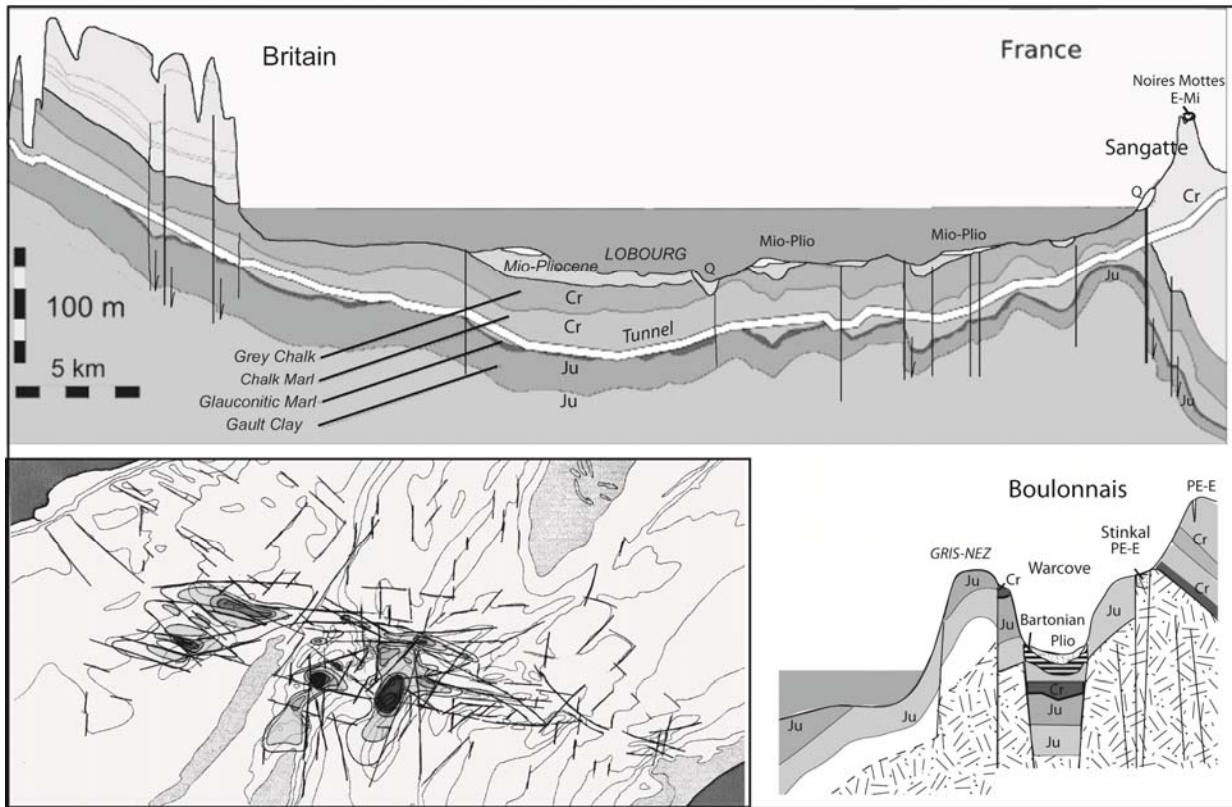


Fig. 10. — Geological section of the Channel Tunnel (simplified from MTL-BRGM –Mott, Hay and Anderson) compared with a parallel cross section at the level of Cape Gris-Nez (base : geological map of Marquise, Mansy *et al.*, 2002). Detailed lineaments at the level of Fosses Dangeard (map from Kellaway *et al.*, 1985). PAL: Paleozoic substratum, Ju: Jurassic beds, Cr: Cretaceous beds, PE-E: Thanetian + Sparnacian; E-Mi: Eocene + Late Miocene; Plio: Middle Pliocene. Q: Quaternary (on the main section).

Fig.10. — Coupe géologique du tunnel sous la Manche comparée à une coupe parallèle au niveau du Cap Gris-Nez (base : carte de Marquise, Mansy *et al.*, 2002). Linéaments au niveau des Fosses Dangeard, extraits de la carte de Kellaway *et al.*, (1995).

with Alpine Orogen (formation of the Jura). In combination with the change in the Northern Atlantic, it led to a shift from compression to extension from 20 Ma to c.10 Ma ago (N150). Evidence of renewed subsidence exists from the early Pliocene sealed by the Middle Pliocene of the Pointe-Aux-Oies. Inversion continued at lower intensity during the late Neogene and the Quaternary, despite the shift of regional stress field back to N170° (Bergerat 1987; Bergerat & Vandycke, 1994). The subsidence of the strait certainly continued as shown by fault activity recorded at Sangatte around 160 ka (a total vertical offset of 6 m).

The Strait of Dover may be interpreted as a dissymmetric “graben” (fig. 3 and 10), not only restricted in time to the lower Quaternary (Colbeaux *et al.*, 1993), but well located on a mega-structure in inversion since the Late Cretaceous, the Variscan Overthrust. Other true crossing of the Variscan front by the European Rifts led to an interruption of the graben. It is the case of the Saint Georges Channel, at the entrance of the Irish Sea or the interconnection between the Lower Rhine and Upper Rhine grabens, somewhat perturbed by the Eifel Hotspot. But most of them are located on former Permo-Triassic structures. The Strait of Dover structure develop on a thick, brittle crust, lacking Permo-Triassic (PT) graben structures but with P-T meridian conjugated faults,

reactivated in sinistral strike-slip, mostly in a zone of thin Mesozoic cover (thin skin tectonic) by comparison with the whole Weald basin (Mansy *et al.*, 2003). The potential occurrence of a granitic batholith north of the Strait of Dover (Minguely *et al.*, 2005) may also complicate its expression. The difference in structure between the Weald, the Boulonnais and the Artois suggests weaknesses inherited from the Avalonia micro-continent formation (Caledonian orogen).

The strait zone seems thus recording a similar chronology of development as the European Rift. Moreover the N-S lineation’s (fig. 3) extracted from the topography shows clearly a cluster of features in the prolongation of the Massif Central-Limagnes graben system. We may thus wonder if this element in the landscape of Western Europe could be considered as extensional structure, on a pre-existing structural weakness, limited in expression due to the discrete uplift and tilting of the Variscan overthrust. The closing of the strait from 1,79 Ma attests of the continuation by steps of the inversion. The Pliocene-Pleistocene accelerated subsidence of the North Sea basin and the contemporaneous tectonic uplift of the Fennoscandia shield reflect deflections of the lithosphere in response to the build-up of the present-day, nearly meridian, compressional stress field in NW Europe

(e.g. Van Wees & Cloetingh 1996; Van den Berg, 1996). It favours a renewed subsidence at the level of the strait with a last event during MIS 6.

## V. — CONCLUSION

The Strait of Dover is no more a quaternary anomaly in the geology of Western Europe; it seems to be a very old feature retrimmed several times during the Cenozoic. The main shaping phase of the Boulonnais post-date the Laramian tectonic phase and seems already established after the PETM. The early phase for the shaping of the old paleo-valleys in the eastern Channel is probably late Ypresian, reactivated during the Mid Eocene, during the emersion of the Chattian to the Pliocene in association with main inversion events, ending with the Messinian crisis. The opening of the strait is

controlled both by the recurrent Cenozoic uplifts / tilting of the Variscan front due to the combination of the Alpine orogen and the opening of the Northern Atlantic and by the global eustatic control. The strait is also subsiding by steps during the inversion's phases. The Strait of Dover may be considered as an extensional structure, limited in expression due to the crossing of the reactivated Variscan front as it records a similar chronology of development as the European Rift. Its position within the Eastern European Rift is coherent with the development of these of the Massif Central and the Rhine system (fig. 2) (Alpine compression + N. Atlantic opening). The "Fleuve Manche" is also an old feature that developed with the onset of the Neogene.

**Acknowledgments.** — We greatly thank Noel Vandenberghe and Francis Amédéo for their suggestions to improve the stratigraphical content and the clarity of this manuscript.

## BIBLIOGRAPHY

- ABREU V.S., & ANDERSON J.B. (1998). — Glacial eustasy during the Cenozoic: Sequence stratigraphic Implications. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, **82**: 1385–1400.
- ALDUC D. (1979). — La Manche orientale: étude géomorphologique du réseau de paléovallées. Thèse 3e Cycle Géographie, Université de Caen, 136p.
- ANTOINE A. (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 du Quaternaire*, **1**: 5-17.
- ANTOINE, P., LIMONDIN-LOZOUET, N., CHAUSSE, C., LAUTRIDOU, J.P., PASTRE, J.F., AUGUSTE, P., BAHAIN, J.J., FALGUERES, C., GALEHB, B., (2007). Pleistocene fluvial terraces from northern France (Seine, Yonne, Somme) : synthesis and new results. *Quaternary Sciences Review*, **26**: 2701-2723.
- AUFFRET J.P., LARSONNEUR C. & SMITH A.J. (1980). — Cartographie du réseau des paléovallées et de l'épaisseur des formations superficielles meubles de la Manche Orientale. *Annales de l'Institut Océanographique*, **56**:21-35.
- BADLEY M.E, PRICE J.D. & BACKSHALL L.C. (1998). — Inversion, reactivated faults and related structures: seismic examples from the southern North Sea. In Cooper M.A. & Williams G.D. eds. *Inversion Tectonics*, Geological Society London Special. Publication., **44**: 201-219.
- BALESCU S. & HAESAERTS P. (1984). — The Sangatte raised beach and the age of the opening of the Strait of Dover. *Geologie en Mijnbouw*, **63** :355-362.
- BALESCU S., DUPUIS C., & QUINIF Y. (1988). — TL stratigraphy of pre-Weichselian loess from North-Western Europe using feldspar coarse grains. *Quaternary Sciences Reviews*, **7**: 309-313.
- BALESCU S., PACKMAN S.C., WINTLE A.G. & GRÜN R. (1992). Thermoluminescence dating of the Middle Pleistocene raised beach of Sangatte (Northern France). *Quaternary Research*, **37**: 390-396.
- BALSON P. (1989). — Neogene deposits of the UK sector of the southern North Sea. In Henriot J.P. & De Moor G. eds *The Quaternary and Tertiary Geology of the Southern Bight, North Sea*, Ministry of Economic Affairs, Belgium, Geological Survey, 89-95.
- BERGERAT F. (1987). — Stress fields in the European platform at the time of Africa-Eurasia Collision. *Tectonics*, **6**: 99-132.
- BERGERAT F. & VANDYCKE S. (1994). — Paleostress analysis and geodynamical implications of the Cretaceous-tertiary faulting in Kent and the Boulonnais. *Journal of the Geological Society London*, **151**: 439-448.
- BLANC P.L., FONTUGNE M.R. & DUPLESSY J.D. (1983). — The time-transgressive initiation of boreal ice caps: continental and oceanic evidence reconciled. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **42** (3-4): 211-224.
- BOILLLOT G. (1964). — Géologie de la Manche occidentale : fonds rocheux, dépôts quaternaires, sédiments actuels. Thèse, Paris, *Annales de l'Institut Océanographique*, **42** (1): 219p.
- BONTE A. & de HEINZELIN J. (1967). — Compte Rendu de la 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. *Bulletin de la Société Belge de Géologie, Paléontologie et Hydrologie*, **15** (3): 60pp.
- BONTE A., COLBEAUX J.-P., LEPLAT J. & SOMME J. (1985). — Carte géologique de la France à 1/50 000, feuille de Boulogne-sur-mer. BRGM, Orléans.
- BRIDGLAND D.R. (1988). — The Pleistocene fluvial stratigraphy and palaeogeography of Essex. *Proceedings Geologists' Association*, London, **99**: 291–314.
- BRIDGLAND D.R. & D'OLIER B. (1995). — The Pleistocene evolution of the Thames and Rhine drainage systems in the Southern North Sea Basin. In Preece R.C. edit "Island Britain: a Quaternary perspective". *Geological Society London Special. Publication.*, **96**: 27-45.
- BROQUET P., AUFFRET J.P., BEUN N. & DUPUIS Ch. (1985). — Carte géologique de Saint-Valéry-sur-Somme à 1/50 000ème, BRGM, Orléans.
- CAMERON T.D, CROSBY A., BALSON P.S., JEFFERY D.H., LOTT G., BULAT J. & HARRISSON D. (1992). — The Geology of the Southern North Sea. British Geological Survey, United Kingdom Offshore Regional Report Series, HMSO, London.

- CAVELIER C. & CHATEAUNEUF J.J. (1971). — Présence de microplancton kimméridgien remanié dans l'Yprésien, au Sud du Bray : preuve de mouvements tectoniques paléocènes. *Bulletin du BRGM* (2<sup>ème</sup> série), sect I : 63-66.
- COLBEAUX J.P., AMEDRO F., BERGEREAT F., BRACQ P., CRAMPON N., DELAY F., DUPUIS CH., LAMOUREUX C., ROBASZYNSKI F., SOMME J., VANDYCKE S. & VIDIER, J.P. (1993). — Un enregistreur des épisodes tectoniques dans le bassin de Paris: le Boulonnais. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **164** : 93-102.
- COOPER J. (1980). — The Leham Beds (late Miocene) of Kent, England. Field meeting report and selected bibliography, 1855-1978. *Tertiary Research*, **3**: 89-92.
- COURTILLOT & RENNE, P.R. (2003). — On the ages of flood basalt events. *Comptes-Rendus Geosciences*, **335**: 113-140
- COWARD M. (1994). — Inversion tectoniques. In Hancock P. ed. "Continental Deformations", Pergamon, 289-304.
- CURRY D. (1992). — Tertiary. In *Geology of England and Wales*, P.M.D.Duff & A.J.Smith edit., chap.13, *Geological Society of London*, 389-411.
- CURRY D., ADAMS C.G., BOULTER M.C., DILLEY F.C., EAMES F.E., FUNNEL B.M. & WELLS M.K.(1978). — A correlation of tertiary rocks in the British Isles. *Geological Society of London, Spec. Rep.* **12** : 72p.
- CURRY, D. GULINCK, M. & POMEROL, C. (1969). — Le Paleocene et l'Eocene dans les Bassins de Paris, de Belgique et d'Angleterre. *Mémoire du BRGM*, **69** : 361-369.
- DE HEINZELIN J. (1966). — Falaise et plage suspendue de Sangatte. *Bulletin de la Société Belge de Géologie*, **75** : 292-296.
- DE HEINZELIN, J. (1964). — Cailloutis de Wissant, capture de Marquise et perçée de Warcove. *Bulletin de la Société Belge de Géologie*, **73** : 146-161.
- DE LUGT I.R., VAN WEES, J.D. & WONG, T.H.E. (2003). — The tectonic evolution of the southern Dutch North Sea during the Paleogene: basin inversion in distinct pulses. *Tectonophysics*, **373** : 141-159.
- DECONINCK J.F., AMEDRO F., DESPARIARIES A., JUIGNET P., ROBASZYNSKI F. (1991). — Niveaux repères de bentonite d'origine volcanique dans les craies du turonien du Boulonnais et de haute Normandie. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **312** : 907-903.
- DECONINCK J.F., AMEDRO F., ROBASZYNSKI F., PELLENARD P., P.RECOURT (2000). — Influences détritiques et volcaniques sur la minéralogie de la fraction argileuse des formations crayeuses traversées par le forage de Poigny (projet CRAIE 700). Résultats préliminaires. *Bulletin d'Information du Bassin de Paris*, **37** : 107-111.
- DECONINCK J.F., HOLTZAPFFEL T., ROBASZYNSKI F. & AMEDRO F. (1989). — Données minéralogiques, géochimiques et biologiques comparées dans les craies cénomaniennes à santonniennes du Boulonnais. *Géobios*, **11** : 179-188.
- DELESTRET F., (2004). — Les fosses Dangeard, des palléovallées tertiaires ou quaternaires? Apports de la sismique très haute résolution. Mémoire de D.E.A., Université de Lille 1, 46 p.
- DENIZOT G. (1968). — Bartonien, Ludien et Tongrien. *Mémoire du BRGM*, **58** : 532-552.
- DESOIGNIES J. & THIBAUT, P.M. (1968). — Notice de la Carte Géologique de St Omer XXIII-4 au 1/50000 e, BRGM, Orléans, 19p.
- DESTOMBES J.P. & LAPIERRE F., (1974). — Carte Géologique de la baie de Canche au 1/50000 e, BRGM, Orléans, 10 p.
- DESTOMBES J.P., SHEPHARD-THORN E.R., REDDING J.H.(1975). — A buried valley system in the Strait of Dover. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London A*, **279**: 243-256.
- DÈZES P., SCHMID S.M. & ZIEGLER P.A. (2004). — Evolution of the European Cenozoic Rift System: interaction of the Alpine and Pyrenean orogens with their foreland lithosphere. *Tectonophysics*, **389**: 1-33.
- DINGWALL R.G. (1975). — Sub-bottom infill channels in an area of the eastern English Channel. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London, A* **279**: 233-241.
- DUBOIS G., 1924. Recherches sur les terrains quaternaires du Nord de la France. *Mémoires de la Société Géologique du Nord*, **VIII** : 357 p.
- DUBOIS G. (1921). — Étude des faciès thanétien et sparnacien du Landénien à Saint-Josse-sur-Mer et Saint-Aubin. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **46** : 79-133.
- DUPUIS C. (1982). — Le tertiaire de Saint-Valéry-sur-Somme, un témoin des faciès sparnacien à Unios du NW du Bassin de Paris ; *Annales de la Société Géologique du Nord*, **101** : 39-45.
- ELLISON R.A. & ZALASIEWICZ J.A., (1996). — Palaeogene and Neogene. In London and the Thames Valley. *British regional geology*, 4<sup>th</sup> edition, British Geological Survey, 92-109.
- EMONTSPOHL A.F., (1993). — Palynologie du dernier cycle glaciaire-interglaciaire (Début glaciaire-Holocène) dans le Nord de la France. Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, 203 p.
- ENGEN J.I., FALEIDE R. & DYRENG, T.K. (2008). — Opening of the Fram Strait gateway: a review of plate tectonic constraints. — *Tectonophysics*, **450** : 51-69.
- EVANS C.D.R. (1990). — The Geology of the Western Channel and its Western Approaches. NERC, London, 93p.
- EVANS C.D.R. & HUGHES M.J.(1984) — The Neogene succession of the South Western Approaches, Great Britain *Journal of Geological Society of London*, **141** : 315-326.
- FALEIDE J.I., KYRKJEBO R., KJENNERUD T., GABRIELSEN R.H., JORDT H., FANAVOLL, S. & BJERKE M.D. (2002). — Tectonic impact on sedimentary processes during Cenozoic evolution of the northern North Sea and surrounding areas. *Geological Society of London, special Publication*; **196**: 235 - 269.
- FUNNEL B.M. (1996). — Plio-Pleistocene palaeogeography of the Southern North Sea basin (3.75 to 0.60 Ma). *Quaternary Sciences Review* **15**: 391- 405.
- GALE A.S., JEFFERY P.A., HUGGETT J.M. & CONNOLLY, P. (1999). — Eocene inversion history of the Sandown Pericline, Isle of Wight, southern England. *Journal of the Geological Society of London*, **156** : 327-339.
- GANDOUIN E. (2003). — *Enregistrement paléoclimatique interdisciplinaire de la transgression holocène. Signature paléo-environnementale des Chironomidae (Diptères) du bassin de Saint-Omer (France)*. ANDRA éditions, Paris : 256 p.
- GANDOUIN E., Van VLIET-LANOE B., FRANQUET E., ANDRIEU-PONEL V., KEEN D.H., MEURISSE M., PONEL P. & BROCANDEL M. (2007). — Analyse haute résolution de la transgression holocène dans un secteur subsident du littoral français : l'enregistrement du bassin-marais de St Omer, Pas-de-Calais, France. *Géologie de la France*. **1**: 11-32.
- GARCIA S., ARNAUD N.O., ANGELIER J., BERGERAT F. & HOMBERG C. (2003). — Rift jump process in Northern Iceland since 10 Ma from <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology, *Earth and Planetary Sciences Letters*, **214**: 529-544.



- GÉLI L. (1991). — Etude de la dorsale de Mohn, au voisinage de 72°N, en Mer de Norvège et du Groenland: Corrélation entre évènements sédimentaires et réajustements tectono-volcaniques survenus à la fin du Miocène. *Comptes-Rendus de l' Académie des Sciences*, Paris., **313**, série 2 : 1569-1578.
- GIBBARD P. L., & LAUTRIDOU, J.P. (2003). — The Quaternary history of the English Channel: an introduction. *Journal of Quaternary Sciences*, **18**: 195-199.
- GIBBARD P.L. & LEWIN J. (2009). — River incision and terrace formation in the late Cenozoic of Europe. *Tectonophysics*, **474**: 41–55.
- GIBBARD P.L. (1995). — The formation of the Strait of Dover. In: Preece, R.C. (editor) *Island Britain: a Quaternary perspective.*, Geological Society of London, special Publication, **96**: 15-26.
- GOSSELIN G. (2007). — Analyse microstratigraphique de la sédimentation holocène en baie de Canche. Impact des tempêtes. Master 2 Environnement, Géol. Milieux Sédimentaires. Université de Lille 1, 51p.
- GREEN C.P., (1985). — Pre-Quaternary weathering residues, sediments and landform development: examples of southern Britain. In Richards K.S., Arnett R.R. & Ellis S. (eds) *Geomorphology and soils*. Allen Unwin, London, 58-77.
- GUPTA S., COLLIER, J.S., PALMER-FELGATE A. & POTTER G. (2007). — Catastrophic flooding origin of shelf valley systems in the English Channel.. *Nature*, **448**: 342–345.
- HAMBLIN RJO, CROSBY A, BALSON PS, JONES SM, CHADWICK RA, PENN IE, ARTHUR MJ. (1992). — *The Geology of the English Channel*. UK Offshore Regional Report, British Geological Survey HMSO: London; 106p.
- HAQ , B.U., HARDENBOL, J., VAIL, P.R. (1988). — Mesozoic and Cenozoic chronostratigraphy and cycles of sea level change. In "Sea level changes: an integrated Approach" (ed. C.K.Wilgus et al.) *SEPM. Special Publication* **42**: 71-108
- HARDENBOL J., THIERRY J., FARLEY M.B., JAQUIN T., DE GRACIENSKY P.C., & VAIL P. (1998). — Mesozoic and Cenozoic Sequence Chronostratigraphic chart. In *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European basins*, *SEPM Spec. Pub.* **60**.
- HENRIET J.P., DE BATIST M., D'OLIER B. & AUFFRET J.P. (1989). — A northeast trending structural deformation zone near North Hinder . In Henriet J.P.& De Moor G. eds *The Quaternary and Tertiary Geology of the Southern Bight, North Sea*, Min. Econ. Affairs, Belgium, Geol. Survey, 9 –15.
- JONES R.L. & KEEN D.H. (1993). — *Pleistocene Environments in the British Isles*. Chapman & Hall: London.
- JONES D.K. (1999). — On the uplift and denudation of the Weald. In Smith B., Whalley W.B., & Warke P.A.(eds.) "Uplift, erosion and stability: perspectives on long term landscape development". *Geological Society of London, special Publication*; **162**: 25-43.
- KELLAWAY, G.A., REDDING, J.H., SHEPPARD-THORN, E.R. & DESTOMBES, J-P. (1975). — The Quarternary history of the English Channel. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, **A279**: 189-218.
- KING C. (2006). — Paleogene and Neogene : uplift and a cooling climate. In Brenchley P.J & Rawson P.F. *The geology of England and Wales*, *Geological Society of London*, chap 16, p.395- 427.
- LAMARCHE J., BERGERAT F. & MANSY J.L. (1987). — Déformations cassantes et plicatives dans le Jurassique du Boulonnais, influence lithostructurale et héritage paléozoïque. *Comptes-Rendus de l' Académie des Sciences*, Paris, **326** : 57-63.
- LARSONNEUR, C. (1971). — Manche centrale et Baie de Seine: géologie du substratum et des dépôts meubles. Thèse d'Etat, Université de Caen, 394 p.
- LAURENT, M., FALGUERES, C., BAHAIN, J.J., ROUSSEAU, L. & VAN VLIET-LANOË, B. (1998). — ESR dating of Quartz extracted from Quaternary and Neogene sediments: method, potential and actual limits. *Quaternary Geochronology.*, **17** : 1057-1062.
- LERICOLAIS G., GUENNOG P., AUFFRET J.P., BOURILLET J.F. ET BERNÉ S., (1996). — Detailed survey of the western end of the Hurd Deep (English Channel): New facts for a tectonic origin In : M. De Batist and P. e. Jacobs Eds., *Geology of Siliciclastic Shelf Seas.*, Geological Society of London, special Publication., 203-215.
- LE ROY P., GRACIA-GARAY C., GUENNOG P., BOURILLET J.F., THINONL., REYNAUD J.Y., KERVEVANP., PAQUETF., MENIER D. & BULOIS C. (submitted). — Cenozoic inversion of the Channel Western Approaches and control of the termination of the 'Channel River'. *Bulletin de la Société Géologique de France* (submitted).
- LEFEVRE, D. & SOMME J. (2001). — Données nouvelles sur les formations quaternaires du bas-Boulonnais et leur représentation cartographique (Marquise, 1/50.000<sup>e</sup>). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **9** (2<sup>ème</sup> série) : 39-58.
- LEPERCQ, J.-Y. & GAULIER, J.-M. (1996). — Two-stage rifting in the North Viking Graben area (North Sea): inferences from a new three-dimensional subsidence analysis. *Marine and Petroleum Geology*, **13**: 129-148.
- LEPLAT, J. & SOMME, J., (1989). — Carte géologique de Calais. 1/50.000<sup>e</sup>. Editions du BRGM.
- LEWANDOWSKI, M., LAMARCHE, J., MANSY, J.L., AVERBUCH, O. & SZINIAWSKI, R. (1999). — Paleomagnetic dating of brittle tectonic structures: case studies on Ferques Faults (Boulonnais, France) and two faults from the Holy Cross Mountains (Poland). *Comptes-Rendus de l' Académie des Sciences*, Paris, **329**: 495-502.
- LOUWYÉ S. & DE SCHEPPER S. (2010). — The Miocene–Pliocene hiatus in the southern North Sea Basin (northern Belgium) revealed by dinoflagellate cysts. *Geological Magazine*. **147**: 760 -776.
- LOUWYÉ S., LAGA, P. (2008). — Dinoflagellate cyst stratigraphy and palaeoenvironment of the marginal marine Middle and Upper Miocene of the eastern Campine area, northern Belgium (southern North Sea Basin). *Geological Journal*, London, **43** :75-94.
- LOYER, S., VAN VLIET-LANOË, B., MONNIER, J.L., HALLEGOUËT, B. & MERCIER, N. (1995). — La coupe de Nantois (Baie de Saint Briec, France): Datations par thermoluminescence (TL) et données paléoenvironnementales nouvelles pour le Pléistocène de Bretagne. — *Quaternaire*, **6** : 21-34.
- MANSY, J.-L., AMEDRO, F., AUFFRET, J.-P., GUENNOG, P., LAMARCHE, J., LEFEVRE, D., ROBASYNSKI, F., SOMME, J., VIDIER, J.-P. (2002). — Carte géologique détaillée de la France: Marquise au 1/50 000, 2e édition, feuille XXI-3, Éditions du BRGM.
- MANSY, J-L., MANBY, G. M., AVERBUCH, O., EVERAERTS, M., BERGERAT, F., VAN VLIET-LANOË, B. & LAMARCHE, J. (2001). — Inversion of the Mesozoic Basin of the Weald-Boulonnais area: Role of Basement Reactivation. *Tectonophysics*, **373**: 161-179.
- MARGEREL J-P.(1968). — *Les foraminifères du Redonien: Systématique-Répartition stratigraphique-Paléocéologie*.Thèse de Faculté des Sciences de Nantes, France, 209p.

- MARGEREL, J.-P. (1989). — Biostratigraphie des dépôts Néogènes de l'Ouest de la France: Constitution de biozones de foraminifères benthiques. *Géologie de la France*, **1-2**: 235-250.
- MEIJER, T. & CLEVERINGA, P. (2009). — Amino-stratigraphy of Middle and Late Pleistocene deposits in The Netherlands and the southern part of the North Sea Basin. *Global and Planetary Changes*, **68**: 326-345.
- MEIJER, T. & PREECE, R.C. (1995). — Malacological evidence relating to the insularity of the British Isles during the Quaternary. In: Preece, R.C. (editor) *Island Britain: a Quaternary perspective. Geological Society of London, special Publication*, **96**: 89-110.
- MERCIER D., LAURIAT-RAGE A., TURPIN L., MARGEREL J.P., CAHUZAC B., POUIT D. & GROUPE GEOPROSPECTIVE (1997). — Le Miocène supérieur et le pliocène marins du bassin Ligérien: nouvelles datations isotopiques. Colloque "Formations Mio-Pliocènes continentales et littorales", SGF, GFEN, GFG, Angers, 6-8/11/1997.
- MEURISSE M., VAN VLIET-LANOË B., TALON B. & RECOURT P. (2005). — Complexes dunaires et tourbeux holocènes du littoral du Nord de la France. *C.R. Géoscience*, **337**: 675-684.
- MEURISSE-FORT, M. (2008). — Enregistrement haute résolution des massifs dunaires : Manche, mer du Nord et Atlantique. Le rôle des tempêtes. Publibook, 310 p.
- MEURISSE-FORT, M., PHILIPPE, M., GOSSSELIN, G. & VAN VLIET-LANOË, B. (2009). — Perspective d'exploitation croisée des sources géomorphologiques et géoarchéologiques dans le Nord de la France et plus particulièrement dans le Val de Canche. Partie I. Nouvelles données environnementales, géomorphologiques et archéologiques. *Revue du Nord*, **14** Hors série : 29-49.
- MINGUELY, B., MANSY, J.L., EVERAERTS, M., MANBY, G.M. & AVERBUCH, O. (2005). — Apport de la modélisation géophysique pour la compréhension de la structuration du Pas-de-Calais. *C. R. Géoscience*, **337**: 305-313.
- MORTIMORE, R.N. & POMEROL, B., (1991). — Upper Cretaceous tectonic disruption in a placid Chalk sequence in the Anglo-Paris basin. *Journal of the Geological Society of London*, **148**: 391-404.
- NADIN P.A., KUSZNIR N.J. & TOTH J. (1995). — Transient regional uplift in the Early Tertiary of the northern North Sea and the development of the Iceland Plume : The Iceland Plume and its influence on the evolution of the NE Atlantic. *Journal of the Geological Society of London*, **152**: 953-958.
- NIELSEN S.B., STEPHENSON R. & THOMSEN E. (2007). — Dynamics of Mid-Paleocene North Atlantic rifting linked with European intra-plate deformations. *Nature*, **450**: 1071-1074.
- PAQUET F., MENIER D., ESTOURNES G., BOURILLET J.F., LE ROY P. & GUILLOCHEAU F. (2010). — Buried fluvial incisions as a record of Middle-Late Miocene eustasy fall on the Armorican Shelf (Bay of Biscay, France). *Marine Geology*, **268**: 137-151.
- PEGRUN R.M. (1984). — The extension of the Tornquist Zone in the Norwegian North Sea. *Norsk Geologisk Tidsskrift*, **64**: 39-68.
- POMEROL, C. (1973). — *Stratigraphie et paléogéographie, ère Cénozoïque (Tertiaire et Quaternaire)*. Masson, 269p.
- POMEROL C., LAGABRIELLE Y. & RENARD M. (2005). — *Eléments de géologie Collection: Université-Sciences, Dunod* 784 p.
- POSAMENTIER, H.W., JERVEY, M.T. & VAIL, P.R. (1988). — Eustatic control on clastic deposition I.- Conceptual framework. In "Sea-level change, an integrated approach ", C.Wilgus et al., Eds., SEPM Special Publication 1988: **42**: 125-154.
- PRESWITCH, J. (1851). — Note et observation sur la plage soulevée de Sangatte. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **8**: 547-522.
- ROBASZYNSKI, F. & AMEDRO, F. (2009). — Les craies du cap Blanc-Nez : une coupe de référence naturelle et continue dans le Crétacé du nord-ouest de l'Europe. In : Robaszynski F. & Guyétant G. coord. *Des roches aux paysages dans le Nord – Pas-de-Calais*. Société Géologique du Nord et Conservatoire Sites Naturels Nord & Pas-de-Calais, 48-53.
- ROBASZYNSKI, F. & AMEDRO, F. (2001). — Des nouveautés dans le Crétacé de la feuille de marquise (Edit.2000). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2<sup>ième</sup> série, **9**: 25-38.
- ROEP, T., HOLST, H., VISSERS, R., PAGNIER, H. & POSTMA, D. (1975). — Deposits of southward-flowing, Pleistocene rivers in the Channel Region, near Wissant, N.W.France. *Palaeogeography, Palaeoclimatology Palaeoecology*, **17**: 289-308.
- RUDOY, A.N. (2002). — Glacier-dammed lakes and geological work of glacial superfloods in the Late Pleistocene, Southern Siberia, Altai Mountains. *Quaternary International*. **87**: 119-140.
- SCHUMM, S.A., DUMONT, J.F., HOLBROOK, J.M. (2000). — *Active Tectonics and Alluvial Rivers*. Cambridge University Press, Cambridge (Chapter 7: Lateral Response; Pannonian Basin, Hungary, 175-178).
- SCOURSE J.D. & AUSTIN R.M. (1995). — Palaeotidal modelling of continental shelves: marine implications of a land-bridge in the Strait of Dover during the Holocene and Middle Pleistocene. In: Preece, R.C. (editor) *Island Britain: a Quaternary perspective. Geological Society of London. Special Publication*, **96**: 75-88.
- SHERIDAN R.E. (1987). — Pulsation tectonics as the control of continental breakup. *Tectonophysics*, **143**: 59-73.
- SHEPHARDT-THORNE E.R., LAKE R.D. & ATITULLAH E.A. (1972). — Basement control of structures in the Mesozoic rocks in the Strait of Dover region, and its reflection certain features of the present land and submarine topography. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London*, **272**: 99-113.
- SINTUBIN, M., LAGA, P., VANDENBERGHE, N., KENIS, I. & DUSAR, M., (2001). — Deformation features in Paleogene sands in the Hoegaarden area (Belgium). *Geologica Belgica* **3**, 257-269.
- SMITH A.J. (1985). — A catastrophic origin for the overthrust system of the eastern English Channel. *Marine Geology*, **64**: 65-75.
- SOMME, J., (1979). — Quaternary coastlines in northern France, In : Oele E., Schuttenhelm R.T.E., Wiggers A.J., éd., *The Quaternary History of the North Sea*, Acta Universitatis Upsallensis. Symposium de Universitatis Upsallensis. Annum Quingentesimum Celebrantis, 2, Uppsala, 147-158.
- SOMMÉ, J., (1977). — *Les plaines du Nord de la France et leur bordure, étude géomorphologique*. Thèse Doct. d'Etat, Université de Lille 1, 810 p.
- SOMMÉ, J., MUNAUT, A.-V., EMONTSPÖHL, A.-F., LIMONDIN, N., LEFÈVRE, D., CUNAT-BOGÈ, N., MOUTHON, J. and GILOT, É. (1994). — The Watten boring - an Early Weichselian and Holocene climatic and palaeoecological record from the French North Sea coastal plain, *Boreas*, **23**: 231-243.

- SOMMÉ, ANTOINE P., CUNAT-BOGE N., LEFEVRE D. & MUNAUT A.V. (1999). — Le Pléistocène moyen de la Mer du Nord en France : falaise de Sangatte et formation de Herzeel. *Quaternaire*, **10** : 151-160.
- SUMBLER M.G. (1996). — London and the Thames Valley. *British regional geology*, 4<sup>th</sup> edition, British Geological Survey, 173 p.
- TERS M. (1969). — Stratigraphie générale des formations quaternaires de Wissant. *Septentrion*, **1** : 73-75.
- TERS M., DELIBRIAS G., DENEFLÉ M., ROUVILLOIS A. & FLEURY A. (1980). — Sur l'évolution géodynamique du Marquenterre (Basse-Somme) à l'Holocène et durant le Weichsélien ancien. *Bulletin de l'Association française du Quaternaire*, **17** : 11 - 23
- TESCH P. (1939). — De mariene inschakeling in de 'Hoogterrasafzettingen' in het Westen en Noorden van Nederland. *Geologie en Mijnbouw*, **1**: 9-13.
- TOUCANNE S., ZARAGOSI S., BOURILLET J.F., MARIEU V., CREMER M., KAGEYAMA M., VAN VLIET-LANOË B., EYNAUD F., TURON J.L., GIBBARD P.L. (2010). — A first estimate of Fleuve Manche palaeoriver discharge during the last deglaciation: evidence for Fennoscandian Ice Sheet meltwater flow in the English Channel ca 20-18 ka ago. *Earth and Planetary Sciences Letters*, **290** : 459-473.
- TUFFREAU A. & ZUATE Y.Z. (1975). — La terrasse fluviatile de Bagarre (Etaples, Pas-de-Calais) et ses industries : note préliminaire. *Bulletin de la Société préhistorique Française*, **72** : 229-235.
- UNDERHILL J.R. & PATERSON S., (1998). — Genesis of inversion structures : seismic evidence for the development of key structures along the Purbeck - Isle of Wight Disturbance. *Journal of the Geological Society of London*, **155** :975-992.
- VAN DEN BERG M.W. (1996). — *Fluvial sequences of the Meuse - a 10 Ma record of neotectonics and climate change at various time-scales*. PhD-thesis, Agricultural University, Wageningen.
- VAN EETVELDE Y. & DUPUIS CH. (2005). — Étude biostratigraphique et paléoenvironnementale des diatomées pyritisées de l'intervalle Paléocène supérieur-Éocène inférieur du sondage de Saint-Josse (France). *Geobios*, **38**: 269-282.
- VANDENBERGHE N. & HARDENBOL J., (1998). — Introduction to the Neogene. In : *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European basins*, SEPM Special Publication, **60**: 83-85.
- VANDENBERGHE N., LAGA P., STEURBAUT E., HARDENBOL J. & VAIL P. (1998). — Tertiary sequence stratigraphy at the southern border of the North Sea Basin in Belgium. In *Mesozoic and Cenozoic Sequence Stratigraphy of European basins*, SEPM Special. Publication. **60**: 119-155.
- VANDENBERGHE, N., VAN SIMAEYS, S., STEURBAUT, E., JAGT, J. W. M. & FELDER, P. J. (2004). — Stratigraphic architecture of the Upper Cretaceous and Cenozoic along the southern border of the North Sea Basin in Belgium. *Netherlands Journal of Geosciences*, **83**(3): 155-71.
- VANDYCKE S. & BERGERAT F. (2001). — Brittle tectonic structures and paleostress analysis in the Isle of Wight, Wessex basin, southern U.K. *Journal of Structural Geology*, **23**: 393-406.
- VAN SIMAEYS S. & VANDENBERGHE.N. (2006). — «Rupelian». *Geologica Belgica*, **9**: 95-101.
- VAN VLIET-LANOË B., MANSY J.L., HENRIET J.P., LAURENT M. & VIDIER J.P. (2004). — A tectonic inversion by steps during the Cenozoic : the Strait of Dover. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **175**: 175-195.
- VAN VLIET-LANOË B., LAURENT M., BAHAIN J.L., BALESCU S., FALGUERES C., FIELD M., HALLEGOUËT B. & KEEN D.H. (2000). — Middle Pleistocene raised beach anomalies in the English Channel: regional and global stratigraphic implications. *Journal of Geodynamics*, **29**: 15-41.
- VAN VLIET-LANOË B., LAURENT M., LAURIAT-RAGE A., LOUWYE S., MANSY J.L., MEILLIEZ F., MERCIER D., VAN DENBERGHE N., HALLEGOUËT B., LAQUEMENT F., MICHEL Y. & MOGUEDET G. (2002). — Paleogeographic evolution of the Western Europe at the Messinian time. *Geodiversitas*, **24**: 511-541.
- VAN VLIET-LANOË 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. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*. II a, **326** : 729-736.
- VAN VLIET-LANOË B., HIBSCH C., CSONTOS L., JEGOUZO S., HALLEGOUËT B., LAURENT M., MAYGARI A., MERCIER D. & VOINCHET P. (2009). — Seismically induced shale diapirism: the Mine d'Or section, Vilaine estuary, Southern Brittany. *International Journal of Earth Sciences*, **98** : 969-984.
- VIALLY R. (1988). — Subsidence in the Viking Graben (Northern Part of the North Sea) *Oil & Gas Science and Technology Revue de l'IFP*, **43**: 629 – 646.
- WATERLOT G., (1969). — Notice explicative de la feuille de Cassel. *Mémoire BRGM, SGN, Carte Géologique de France au 1/50000ème*, **XXIII-3** : 12 p.
- WEST I. (2010). — Barton and Highcliffe, Eocene Strata: Geology of the Wessex Coast of southern England. Internet site: [www.soton.ac.uk/~imw/barton.htm](http://www.soton.ac.uk/~imw/barton.htm). Version: 30th June 2010
- WHITE H.J.O. (1915). — *The Geology of the Country near Lymington and Portsmouth*. Memoirs of the Geological Survey of England and Wales, 78pp. By H.J. Osborne White, F.G.S. Explanation of Sheets 330 & 331.
- WILLEMS W. (1989). — Foraminiferal Biostratigraphy of the Palaeogene in the southern Bight of the North Sea . In Henriet J.P.& De Moor G. eds *The Quaternary and Tertiary Geology of the Southern Bight, North Sea*, Ministry of Economic Affairs, Belgium, Geological Survey, 45-50.
- WOOLDRIDGE S.W. & LINTON D.L. (1955). — *Structure, Surface and Drainage in southeast England*, Philip, London, viii + 176 p.
- WORSAMM B.C. (1963). — Geology of the Country around Maidstone. British Geological Survey /HMSO.
- WYNS R. (1979). — Tectonique cassante synsédimentaire et discordance d'âge Marinésien supérieur dans l'Ouest du Bassin de Paris. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris, D*, **286** : 575-578.
- WYNS R. (1991). — Evolution tectonique du bâti armoricain oriental au Cénozoïque d'après l'analyse des paléosurfaces continentales et des formations géologiques associées. *Géologie de la France*, **3** : 11-42.
- ZIEGLER P.A. (1990). — *Geological Atlas of Western and Central Europe*. 2<sup>nd</sup> Edit. Shell Internationale Petroleum Maatschappij BV, 2 tomes.
- ZIEGLER P.A. (1992). — European Cenozoic rift system. *Tectonophysics*, **208**: 91-11.



# ANNALES DE LA SOCIETE GEOLOGIQUE DU NORD

## INSTRUCTIONS AUX AUTEURS

### *Ligne éditoriale*

Les *Annales de la Société Géologique du Nord* sont une revue annuelle consacrée à tous les aspects de la recherche en Sciences de la Terre (géosciences). Elles publient des résultats originaux consacrés en particulier au nord de la France et aux régions limitrophes. Cependant, des résultats issus d'autres régions françaises et d'autres pays y trouvent aussi leur place. Les *Annales* peuvent publier aussi des fascicules thématiques sous la responsabilité d'un ou de plusieurs éditeurs invités.

### *Informations générales*

Soumettre un article pour publication aux *Annales* implique que celui-ci n'ait pas été soumis à une autre revue. Un formulaire de cession des droits d'auteur devra être signé avant l'acceptation définitive du « manuscrit », en particulier pour autoriser la mise en ligne sur Internet des articles des *Annales*. Les droits de reproduction des articles, y compris de leurs illustrations, sont réservés à la revue. La reproduction en nombre de tout ou partie d'un article doit faire l'objet d'une demande écrite préalable ou d'un courriel adressé à la Rédaction.

Les aspects nomenclaturaux des articles de systématique (paléontologie) devront se conformer aux recommandations des éditions les plus récentes des divers codes internationaux de nomenclature des organismes : *Code international de nomenclature zoologique*, *Code international de nomenclature botanique*, *Code international de nomenclature des bactéries*, taxonomie des virus (*classification Baltimore* ou classification de l'*International Committee on Taxonomy of Viruses*), ...

Les spécimens types des organismes fossiles et autres spécimens décrits, figurés et/ou mentionnés dans les articles des *Annales* doivent être enregistrés et déposés dans une institution de statut national qui seule peut en assurer la conservation et l'accessibilité. Les numéros d'inventaire doivent être précisés.

Les objets et sites stratigraphiques décrits, figurés et/ou mentionnés dans les articles des *Annales* doivent se conformer à l'édition la plus récente du *Guide stratigraphique international* (guide de classification, terminologie et procédure en stratigraphie) de l'Union Internationale des Sciences Géologiques : <http://www.iugs.org/>.

Chaque manuscrit est évalué par au moins deux rapporteurs. L'auteur peut suggérer au comité éditorial des *Annales* les noms de deux relecteurs avec leurs coordonnées (courriel, adresse, téléphone).

### *Structure et format des « manuscrits »*

Soumission : Les « manuscrits » doivent suivre rigoureusement les recommandations aux auteurs et sont adressés à la revue :

### **SOCIETE GEOLOGIQUE DU NORD**

c/o Université Lille 1 – Sciences et Technologies

UFR des Sciences de la Terre, bâtiment SN5

F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France)

Jean-Pierre De Baere, Directeur de la Publication :

[debaere.jeanpierre@yahoo.fr](mailto:debaere.jeanpierre@yahoo.fr)

Les « manuscrits » (textes et illustrations) seront soumis par voie électronique au format 'doc' de préférence. Tout manuscrit non conforme peut être retourné.

Structure : Le texte doit être traité avec la police Times ou Times New Roman, taille 12, à double interligne avec des marges d'au moins 2,5 cm. Chaque page doit être numérotée. Il est recommandé aux auteurs de se reporter à un fascicule récent des *Annales*.

Les articles sont rédigés en français ou en anglais de style scientifique. Les auteurs francophones se reporteront avantagement à l'ouvrage suivant : David L. 1984 - *Géocriture ou l'art d'écrire la géologie*. B. R. G. M., Manuels et Méthodes, n° 10 : 150 p. ; Orléans. Les articles en anglais pourront suivre les conseils de Lindemann & Cartwright (2000) : <http://www.skidmore.edu/~mmarx/sewid/geosci.htm>. Ils doivent comporter les rubriques suivantes :

- Titre en français ;
- Titre en anglais (traduction exacte) ;
- Prénom(s) et NOM(S) de(s) auteur(s) avec en appel (\*) leur(s) adresse(s) professionnelle(s) et électronique(s) ;
- Résumé en français n'excédant pas 350 mots ;
- Abstract en anglais (traduction exacte) ;
- 5 mots-clés en français ;
- 5 keywords en anglais (traduction exacte) ;

- Texte de l'article avec la chronologie suivante des titres :

**I. — INTRODUCTION ;**

**1) Historique ;**

a) premières études ;

éventuellement un paragraphe de remerciements mentionnant les rapporteurs.

- Dans le texte courant, les références aux illustrations et/ou aux tableaux de l'article seront présentés de la façon suivante : (Fig. 1), (Fig. 2A-B), (Fig. 5-6), (Pl. I), (Pl. II, fig. 1a), (Tabl. 1) ; les références aux auteurs seront au format suivant : Dupont (1971), Dupont (2005, fig. 7), (Dupond, 1956), (Dupond, 1956, 1981), Dupont & Martin (2003), (Dupont & Martin, 2003), Dupont & Dupond (1934, p. 45) ;

- La présentation des descriptions systématiques doit se conformer aux usages courants dans les revues de paléontologie : nom du taxon avec auteur et date, synonymie, matériel type, étymologie, matériel étudié, niveau stratigraphique type, localité type, diagnose, description, comparaisons; utiliser nov. sp., nov. gen., nov. fam., nov. comb., etc. ; utiliser les italiques pour les noms de genres et d'espèces ;

- Bibliographie dans l'ordre alphabétique suivant la forme ci-dessous :

NOM Initiale du prénom, 2<sup>ème</sup> NOM Initiale du prénom, etc. (Année). — Titre. *Revue*, Volume : pages.

NOM Initiale du prénom, 2<sup>ème</sup> NOM Initiale du prénom, etc. (Année). — *Titre du livre ou du volume*. Editeur, Ville : pages.

NOM Initiale du prénom, 2<sup>ème</sup> NOM Initiale du prénom, etc. (Année). — Titre. *In* : NOM Initiale du prénom, 2<sup>ème</sup> NOM Initiale du prénom, etc. (ed.), *Titre du livre ou du volume*. Editeur, Ville : pages.

NOM Initiale du prénom, 2<sup>ème</sup> NOM Initiale du prénom, etc. (Année). — Titre. *In* : NOM Initiale du prénom, 2<sup>ème</sup> NOM Initiale du prénom, etc. (ed.), *Titre du volume ou du fascicule*. *Revue*, Volume : pages.

NOM Initiale du prénom (Année). — *Titre de la thèse*. Université, Nom du diplôme (Date) : pages.

- Les légendes des illustrations et des tableaux (Exemple : Fig.1. — ; Tabl. I. —) sur une ou des feuilles séparées avec l'indication des échelles et la signification des abréviations, en français et en anglais.

**Illustrations** : Les figures, tableaux et/ou planches sont au format 'jpeg' avec une bonne résolution (2000 pixels de large pour une page verticale). La taille des figures ou planches ne doit pas être supérieure à 165 mm de large sur 240 mm de haut (sur deux colonnes) ou 80 mm de large sur 240 mm de haut (sur une seule colonne). Des illustrations en couleurs pourront être publiées moyennant une participation financière des auteurs suivant la facturation de l'imprimeur.

**Epreuves** : Les épreuves seront adressées sous forme de fichiers 'pdf' à l'auteur correspondant et devront être retournées corrigées dans un délai raisonnable.

**Diffusion des articles des Annales** : Les tirages-à-part sur papier des articles des *Annales* ont été abandonnés depuis quelques années ; désormais, les articles sont distribués aux auteurs sous le format électronique 'pdf' aux conditions suivantes :

- pour un 1<sup>er</sup> auteur membre de la SGN : pdf gratuit (sous réserve que l'auteur se sera acquitté des frais de dépassement au cas où l'article ferait plus de 8 ou 10 pages — voir ci-dessous) ;

- pour un 1<sup>er</sup> auteur non-membre : pdf gratuit (sous réserve que l'auteur se sera acquitté des frais de publication appliqués aux non-membres — voir ci-dessous).

Pour toute autre personne désirant acquérir un article des *Annales*, il lui sera fourni au format pdf contre la somme de 20 € (tarif réduit de 10 € pour un étudiant sur présentation d'un justificatif).

Pour de plus amples informations sur la réalisation technique d'un article, vous pouvez consulter Philippe Recourt : [philippe.recourt@univ-lille1.fr](mailto:philippe.recourt@univ-lille1.fr) .

### **Rappel des conditions de publication aux Annales**

Il faut normalement être à jour des trois dernières années de cotisation à la Société pour pouvoir soumettre un article aux *Annales* dans les conditions accordées aux membres. Une seule cotisation annuelle ne suffit pas. La franchise accordée annuellement est de 8 pages [texte, illustrations et bibliographie compris - une page complète des *Annales* comportant environ 8 200 caractères et espaces] pour les membres de la SGN à jour de leur cotisation, celle-ci pouvant être portée à 10 pages si plusieurs co-signataires de la même note sont membres de la Société. Le prix de la page de texte de dépassement est fixé à 12 € avec une possibilité de réduction de la facturation au cas par cas, sur décision du Conseil d'administration (\*) ; la planche N&B est à 24 € ; la planche couleur au prix coûtant facturé par l'imprimeur (compte-rendu du CA du 27 mai 2009). Pour les non-membres, le prix d'une page aux *Annales* est de 37 € (compte-rendu du CA du 9 novembre 2009) ; la planche N&B est à 50 € ; la planche couleur au prix coûtant facturé par l'imprimeur.

(\*) Si un article qui a été sollicité par la SGN dépasse les 8 ou 10 pages de franchise, la Société peut envisager d'en prendre en charge au moins une partie. Ce point est négociable.

Pour toute question complémentaire, veuillez contacter l'une des personnes du Conseil d'administration de la SGN dont la composition de l'année en cours est imprimée en page II de chaque fascicule des *Annales*.

# ANNALES DE LA SOCIETE GEOLOGIQUE DU NORD

## INSTRUCTIONS TO AUTHORS

### *Scope of the journal*

The *Annales de la Société Géologique du Nord* are a yearly journal devoted to various aspects of Earth Sciences (Geosciences). It publishes original results particularly on northern France and surrounding regions. However, results from other French regions and from other countries are welcome. Thematic issues may be published under the responsibility of one or several guest editors.

### *General information*

The submission of a manuscript to the *Annales* implies that it is not being simultaneously offered for publication elsewhere. A copyright assignment form must be signed before the final acceptance, particularly in order to authorize the online publication of the papers. Copyright of the published papers, including illustrations, becomes the property of the journal. Requests to reproduce in great number part or whole of a paper from the *Annales* should be addressed to the Editor, either by surface mail or by e-mail.

Nomenclatural aspects of systematic (palaeontological) papers should follow the recommendations of the most recent editions of the international codes of organismal nomenclature : *International Code of Zoological Nomenclature*, *International Code of Botanical Nomenclature*, *International Code of Nomenclature of Bacteria*, virus classification (*Baltimore Classification* or *International Committee on Taxonomy of Viruses*), ...

Preservation of type specimens of fossil organisms, and other specimens which are described, figured and/or mentioned in the *Annales* papers must be registered and deposited in an appropriate national institution, with staff and facilities capable of ensuring their conservation and availability for future reference in perpetuity. Their collection numbers should be indicated.

The geological objects and stratigraphic sites which are described, figured and/or mentioned in the *Annales* papers must follow the most recent edition of the *International Stratigraphic Guide* (A guide to stratigraphic classification, terminology and procedure) of the International Union of Geological Sciences: <http://www.iugs.org/>.

Each manuscript will be reviewed by at least two referees. The author may suggest to the *Annales* editorial committee the names and coordinates (e-mail, address, phone) of two referees.

### *Structure and format of the « manuscripts »*

Submission: Manuscripts conforming strictly to the present instructions should be sent to the journal:

#### **SOCIETE GEOLOGIQUE DU NORD**

c/o Université Lille 1 – Sciences et Technologies

UFR des Sciences de la Terre, bâtiment SN5

F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France)

Jean-Pierre De Baere, Directeur de la Publication :

[debaere.jeanpierre@yahoo.fr](mailto:debaere.jeanpierre@yahoo.fr)

Manuscripts (text and illustrations) are to be submitted by e-mail, preferably with a 'doc' format. Manuscripts that do not conform to the present instructions will be returned.

Structure: The text must be processed with a Times or Times New Roman font, size 12, double spaced, with margins of at least 2,5 cm. All pages must be numbered. To complete these instructions, please refer to a recent issue of the *Annales*.

Papers are to be written in simple, concise and scientific French or English. French authors should follow the following book: David L. 1984 - *Géocriture ou l'art d'écrire la géologie*. B. R. G. M., Manuels et Méthodes, n° 10 : 150 p. ; Orléans. English papers could follow the instructions of Lindemann & Cartwright (2000) : <http://www.skidmore.edu/~mmarx/sewid/geosci.htm>. They should be organized as follows:

- Title in English;
- Title in French (exact translation);
- First name(s) and surname(s) of author(s), followed by their full professional address(es) and e-mail(s);
- Abstract in English, no more than 350 words long;
- Résumé in French (exact translation, the journal may provide help for translation);
- 5 keywords in English;
- 5 mots-clés in French (exact translation);



- Text of the article, in the following order:

**I. — INTRODUCTION ;**

**1 ) Historical context ;**

*a ) first studies ;*

and eventually a section of acknowledgements with reference to the referees.

- References to illustrations and/or tables in the text will be indicated as follows: (Fig. 1), (Fig. 2A-B), (Fig. 5-6), (Pl. I), (Pl. II, fig. 1a), (Tabl. 1); references to authors will be presented as follows: Dupont (1971), Dupont (2005, fig. 7), (Dupond, 1956), (Dupond, 1956, 1981), Dupont & Martin (2003), (Dupont & Martin, 2003), Dupont & Dupond (1934, p. 45);

- Each systematic description should be arranged as is usual in most palaeontological journals, that is: name of the taxon with author and date, synonymy, type material, etymology, material examined, type horizon, type locality, diagnosis, description, remarks; use nov. sp., nov. gen., nov. fam., nov. comb., etc.; use italics for names of genera and species;

- Bibliographical references should be presented in alphabetical order as follows:

NAME First name initial(s), 2<sup>nd</sup> NAME First name initial(s), etc. (Year). — Title. *Journal*, Volume : pages.

NAME First name initial(s), 2<sup>nd</sup> NAME First name initial(s), etc. (Year). — *Book or issue title*. Publisher, Town : pages.

NAME First name initial(s), 2<sup>nd</sup> NAME First name initial(s), etc. (Year). — Title. *In*: NAME First name initial(s), 2<sup>nd</sup> NAME First name initial(s), etc. (ed.), *Book or issue title*. Publisher, Town : pages.

NAME First name initial(s), 2<sup>nd</sup> NAME First name initial(s), etc. (Year). — Title. *In*: NAME First name initial(s), 2<sup>nd</sup> NAME First name initial(s), etc. (ed.), *Book or issue title*. *Journal*, Volume : pages.

NAME First name initial(s) (Year). — *Thesis title*. University, Degree title (Date) : pages.

- Captions of illustrations and tables (e.g., Fig.1. — ; Tabl. I. —), on a separate sheet, should include abbreviations and scale values, both in English and French.

**Illustrations:** Figures, tables and/or plates are provided with a 'jpeg' format with a good definition (2000 pixels wide for a vertical page). Size of figures and plates will not exceed 165 mm width x 240 mm height (for two columns), or 80 mm width x 240 mm height (for a single column). Colour illustrations may be published if a financial contribution is provided by the author(s), in agreement with rating of the printer.

**Proofs:** Proofs will be sent as 'pdf' files to the corresponding author, and will have to be corrected and returned in a reasonable time.

**Distribution of the *Annales* papers:** Hard copies or separates (offprints) are no more provided; papers are now distributed as 'pdf' files at the following conditions:

- if the first author is a SGN member, the pdf is free of charge (subject to the payment by the author of expenses in case of papers of more than 8 or 10 pages — see here below) ;

- if the first author is not a SGN member, the pdf is free of charge (subject to the payment by the author of publishing expenses as applied to non-members — see here below).

For any other individual who wants to get a paper from the *Annales*, the latter will be provided as a pdf file after payment of 20 €(a reduced rate of 10 €is applicable for a student with a regular student ID).

*For more informations on the technical processing of a paper, please contact Philippe Recourt : [philippe.recourt@univ-lille1.fr](mailto:philippe.recourt@univ-lille1.fr) .*

### **Conditions for publishing in the *Annales***

To be subject to conditions applied to members of the Société Géologique du Nord, the author must have been a regular paying member for at least three years to be authorized to submit a paper to the *Annales*. A single yearly subscription is not enough. Under such conditions, each SGN member may publish a 8 page-long paper per year, free of charge [including text, illustrations and reference list — one full page of text of the *Annales* includes ca. 8200 characters and spaces]. In case of more than one author, and if at least two are SGN members, the paper may be 10 page-long, free of charge. Each exceeding text page is rated at 12 € in case of too many pages, there is a possibility of a reduced rate after submission to and decision of the Executive Committee of the Society (\*); a black-and-white plate is rated at 24 € a colour plate is paid in agreement with rating by the printer (decision of the EC dated May 27, 2009). For non-members, one text-page is rated at 37 €(decision of the EC dated November 9, 2009); a black-and-white plate at 50 € and a colour plate in agreement with rating by the printer.

(\*) In case of a paper which has been asked for by the Society, and is more than 8 or 10 page-long, part or whole of the extra-expenses may be paid by the Society. This is negotiable.

*For any complementary question, please contact one of the members of the Executive Committee of the Society whose list is printed on cover-page II of each issue of the *Annales*.*

Sont en vente au Siège de la Société :

### MÉMOIRES (suite) (\*)

<b>Tome XIII</b> — P. BRICHE <i>et al.</i> , <i>Flore infraliasique du Boulonnais</i> , 1963, 145 p., 11 pl. ....	25,00 €
<b>Tome XIV</b> — G. WATERLOT, <i>Les Gigantotrachés du Siluro-Dévonien de Liévin</i> , 1966, 23 p., 5 pl. ....	7,00 €
<b>Tome XV</b> — J. MANIA, <i>Gestion des Systèmes aquifères. Applications au Nord de la France</i> , 1978, 228 p. ....	15,00 €
<b>Tome XVI</b> — A. BOUROZ <i>et al.</i> , <i>Essai de synthèse des données acquises dans la gènèse et l'évolution des marqueurs pétrographiques dans les bassins houilliers</i> , 1983, 118 p., 10 pl. ....	20,00 €

### PUBLICATIONS (\*)

Publication N° 1. — J. CHOROWICZ, Etude géologique des Dinarides le long de la transversale Split-Karlovac (Yougoslavie).....	10,00 €
Publication N° 2. — J. CHARVET, Essai sur un orogène alpin : Géologie des Dinarides au niveau de la transversale de Sarajevo (Yougoslavie).....	11,00 €
Publication N° 3. — J. ANGELIER, Néotectonique de l'arc égéen.....	11,00 €
Publication N° 4. — J.J. FLEURY, 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 .....	12,00 €
Publication N° 5. — M. COUSIN, Les rapports Alpes-Dinarides. Les confins de l'Italie et de la Yougoslavie .....	12,00 €
Publication N° 6. — F. THIEBAULT, L'évolution géodynamique des Héliénides externes en Péloponnèse méridional.....	14,00 €
Publication N° 7. — P. DEWEVER, Radiolaires du Trias et du Lias de la Téthys .....	13,00 €
Publication N° 8. — J. FERRIERE, Paléogéographie et tectoniques superposées dans les Hellénides internes : les massifs de l'Othrys et du Pélion (Grèce continentale) .....	14,00 €
Publication N° 9. — H. MAILLOT, Les Paléoenvironnements de l'Atlantique sud : Apport de la géochimie sédimentaire. ....	9,00 €
Publication N° 10. — Cl. BROUSMICHE, Les Fougères sphénoptériennes du Bassin Houllier Sarro-Lorrain.....	15,00 €
Publication N° 11. — B. MISTIAEN, Phénomènes récifaux dans le Dévonien d'Afghanistan (Montagnes Centrales). Analyse et systématique des Stromatopores .....	15,00 €
Publication N° 12. — T. HOLTZAPFFEL, Les minéraux argileux. Préparation, analyses diffractométriques et détermination.....	6,00 €
Publication N° 13. — J.L. MANSY, Géologie de la Chaîne d'Ormineca des Rocheuses aux plateaux intérieurs (Cordillère Canadienne). Evolution depuis le Précambrien.....	15,00 €
Publication N° 14. — C. BECK, Géologie de la Chaîne Caraïbe au méridien de Caracas (Venezuela).....	10,00 €
Publication N° 15. — J.M. DEGARDIN, Le Silurien des Pyrénées : Biostratigraphie, Paléogéographie .....	10,00 €
Publication N° 16. — J. SIGAL, Les recherches sur les Foraminifères fossiles en France des environs de 1930 à l'immédiat après-guerre .....	7,00 €
Publication N° 17. — F. DELAY, 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.....	27,00 €
Publication N° 18. — A. KHATIR, Structuration et déformation progressive au front de l'allochtone ardennais (Nord de la France).....	11,00 €
Publication N° 19. — C. LAMOUREUX, Les mylonites des Pyrénées. Classification. Mode de formation. Evolution .....	11,00 €
Publication N° 20. — G. MAVRIKAS, Evolution Crétacé-Eocène d'une plate-forme carbonatée des Hellénides externes. La plate-forme des Ori Valtou (Massif du Gavrovo), Zone de Gavrovo-Tripolitza (Grèce continentale). ....	11,00 €
Publication N° 21. — P. BRACQ, Effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux, apport de l'analyse morphostructurale .....	11,00 €
Publication N° 22. — N. FAGEL, Flux argileux du Néogène au Quaternaire dans l'Océan Indien Nord, mise en évidence et interprétation.....	11,00 €
Publication N° 23. — G. BUSSON et A. CORNÉE, L'événement océanique anoxique du Cénomaniens supérieur-terminal. ....	10,00 €
Publication N° 24. — B. LOUCHE, Limites littorales de la nappe de la Craie dans la région Nord Pas-de Calais. Relations eaux souterraines-eaux superficielles-mer .....	11,00 €
Publication N° 25. — J. G. BREHERET, L'Aptien et l'Albien de la fosse vocontienne (des bordures au bassin). Evolution de la sédimentation et enseignements sur les événements anoxiques.....	22,00 €
Publication N° 26. — T. PLETSCHE, Clay minerals in Cretaceous deep-water formations of the Rif and the Betic Cordillera (N. Morocco and S. Spain) .....	10,00 €
Publication N° 27. — E. VENNIN, Architecture sédimentaire des Bioconstructions permo-carbonifères de l'Oural méridional (Russie) .....	13,00 €
Publication N° 28. — Actes des 1 <sup>ères</sup> journées régionales Nord/Pas-de-Calais du Patrimoine géologique .....	5,00 €
Publication N° 29. — F. LACQUEMENT, L'Ardenne Varisque. Déformation progressive d'un prisme sédimentaire préstructuré ; de l'affleurement au modèle de chaîne. ....	12,00 €
Publication N° 30. — R. PLATEVOET, Diversité des formations pyroclastiques s.l. du strato-volcan du Cantal au Miocène. Elaboration d'une méthodologie de corrélation. ....	12,00 €
Publication N° 31. — F. PELLENARD (2003) Message terrigène et influences volcaniques dans les bassins de Paris et du sud-est de la France.....	14,00 €
Publication N° 32. — S. LALLAHEM, Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines. Application à l'aquifère de la bordure nord du bassin de Paris. ....	14,00 €
Publication N° 33. — C. DERYCKE-KHATIR (2005) Microrestes de vertébrés du Paléozoïque supérieur de la Manche au Rhin.....	14,00 €

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 T.T.C. (TVA 5.50% incluse).

# SOMMAIRE

Tome 17 (2<sup>me</sup> série)

parution 2010

---

	pages
Avant-propos 2010 : année de consolidation de la SGN .....	1
Gérard BRETON. — Les Actinomycétales de l'ambre sparnacien des Corbières (Aude, France) : taphonomie et diversité.. ..	3
Philippe LEGRAND. — Complément à l'inventaire de la macroflore du Miocène supérieur de la diatomite de Murat (Cantal, Massif Central, France). .....	23
Alain BLIECK. — Origine des tétrapodes, scénarios, théories erronées et événements évolutifs .....	37
Pierre LEMAITRE et Thierry OUDOIRE. — Joseph GODON (1858 – 1932), un naturaliste du Cambésis.....	47
Sébastien MAILLET, Bruno MILHAU et Benoît L.M. HUBERT. — New insight on the “Cul d’Houille” section (Givetian, Middle Devonian) near Flohimont (Ardenne, France) .....	53
Brigitte VAN VLIET-LANOË, Guillaume GOSSELIN, Jean-Louis MANSY (†), Chantal BOURDILLON, Murielle MEURISSE-FORT, Jean-Pierre HENRIET, Pascal LE ROY Pascal et Alain TRENTESAUX. — A renewed Cenozoic story of the Strait of Dover. ....	59

© 2010 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 en France)

---

Le Directeur de la Publication : J.-P. DE BAERE .  
Commission Paritaire N° 55.940.

Imprimerie Centrale du Nord, 12, rue Lepelletier, 59800 Lille - 4-2010  
Dépôt légal n° - 4<sup>ème</sup> trimestre 2010