

Société Géologique du Nord

ANNALES

Tome 27 (2^e série)
parution 2020

Ce tome 27 des Annales de la SGN bénéficie d'aides financières de l'Université de Lille, du Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG - UMR 8187 Univ. Lille-CNRS-Univ. Littoral Côte d'Opale), du laboratoire Evo-Eco-Paléo (EEP - UMR 8198 Univ. Lille-CNRS), du Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE - Univ. Lille, IMT-Lille-Douai, Yncrea Hauts de France) et de l'Unité Matériaux et Transformations (UMET - UMR 8207 CNRS-Univ. Lille)

CONSEIL D'ADMINISTRATION
2019 - 2021

Présidente d'honneur	Melle Denise BRICE
Président d'honneur	M. Francis ROBASZYNSKI
Président et directeur de la Publication	M. Hervé COULON
Vice-Président	M. Jamal EL KHATTABI
Secrétaire	M. Fabien GRAVELEAU
Trésorière	Mme Renée DUCHEMIN
Bibliothécaire-Archiviste	Melle Jessie CUVELIER
Rédacteur-en-chef	M. Didier TORZ
Conseillers	M. Patrick AUGUSTE
	M. François DUCHAUSSOIS
	M. Bernard MAITTE
	M. Benoît PONCELET
	M. Jacques ROUGE

Autres fonctions bénévoles

Directeur	M. Francis MEILLIEZ
Adjoint au Rédacteur-en-chef	M. Alain BLIECK
Coordonnateur des visites de terrain et conférences	M. Jean-Jacques BELIN
Site Web	MM. Benoît CRÉPIN
Réseaux sociaux	M. Mathieu PONCELET

CONSEIL SCIENTIFIQUE ET ÉDITORIAL
2019 - 2021

Rédacteur-en-chef	Didier TORZ (SGN, Villeneuve d'Ascq)
Géologie sédimentaire	Éric GOEMAERE (IRSN, Bruxelles)
Paléontologie	Alain BLIECK (SGN, Villeneuve d'Ascq)
Stratigraphie (Paléozoïque)	Elise NARDIN (CNRS, Toulouse)
Stratigraphie (Mésocène-Cénozoïque)	Christian DUPUIS (Université de Mons, Belgique)
Magmatisme - Métamorphisme	Pierre BARBEY (CRPG, Nancy)
Géophysique	Franck HANOT (CDP-Consulting, Chanzuy)
Tectonique	Olivier AVERBUCH (Université de Lille, Villeneuve d'Ascq)
Géologie Appliquée	Jean-Louis DURVILLE (CFGI)
Hydrogéologie	Barbara LOUCHE (Université d'Artois, Lens)
Histoire des Sciences	Philippe LE VIGOUROUX (Paris)
Médiation scientifique	Danielle DECROUEZ (Haute-Savoie)
Géopatrimoine	Patrick DE WEVER (MNHN, Paris)
Géoarchéologie	Laurent DESCHODT (INRAP, Villeneuve d'Ascq)

LISTE DES RAPPORTEURS DES ARTICLES DU TOME 27

Francis AMEDRO (SGN, retraité de l'enseignement du second degré, Calais)
Olivier AVERBUCH (Maître de conférences, Université de Lille)
Alain BLIECK (SGN, retraité du CNRS)
Anaïs BOURA (Université Pierre et Marie Curie, Paris)
Paul BROQUET (Professeur honoraire, Université de Franche-Comté)
Hervé COULON (CEREMA, Lille)
Danielle DECROUEZ (Directrice Honoraire du Muséum d'histoire naturelle et du Musée d'histoire des sciences de Genève)
Pierre DRON (Commission régionale du patrimoine géologique de Picardie)
Christian DUPUIS (Professeur émérite, Polytech'Mons, Belgique)
Michiel DUSAR (Service géologique de Belgique, Bruxelles)
Dario de FRANCESCHI (Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris)
Fabien GRAVELEAU (Maître de conférences, Université de Lille)
Barbara LOUCHE (Maître de conférences, Université d'Artois)
Bernard MAITTE (Professeur émérite, Université de Lille)
Francis MEILLIEZ (Professeur émérite, Université de Lille)
Jean-Pierre NICOLLIN (Professeur, Université catholique de Lille)
Francis ROBASZYNSKI (Professeur honoraire, Polytech'Mons, Belgique)
Alain TRENTESAUX (Professeur, Université de Lille)

ANNALES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

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

Secrétariat : Société Géologique du Nord

Université de Lille – Cité scientifique, Bâtiment SN5 (Sciences de la Terre), 59655 Villeneuve d'Ascq cedex
Tél. 03 20 33 70 47 (secrétaire), Site Web : <http://sgn.univ-lille.fr>, email du président : sgn.herve.coulon@gmail.com,
email du secrétaire : fabien.graveleau@univ-lille.fr, email du rédacteur en chef : didiertorz@gmail.com

AVANT-PROPOS : UNE ANNÉE PARTICULIÈRE POUR MARQUER LE SESQUICENTENAIRE !

par Hervé COULON, Président & Francis MEILLIEZ, Directeur

C'est le moins que l'on puisse dire ! Y aura-t-il une trace géologique de la COVID-19, hormis d'avoir bousculé notre agenda comme celui de tout le monde. Pour le coup cet événement est « synchrone, bref et global » comme aurait dit notre ami Patrick De Wever pour le qualifier de candidat marqueur d'une division géologique (De Wever & Meilliez, 2020).

Certes chacun d'entre vous, ayant consulté le site internet rénové de la SGN (<http://sgn.univ-lille.fr>) aura constaté que l'ensemble des manifestations, laborieusement conçu et monté depuis 3 ans pour marquer ce 150^e anniversaire, se trouvera réparti sur l'automne 2020¹ et une bonne partie de 2021. Entre autres, la séance solennelle prévue les 5 juin (en salle) et 6 juin (sur le terrain) a été reportée respectivement aux 11 et 12 juin 2021. En salle, dans le grand amphithéâtre de Lilliad, et sur le terrain, comme prévu, autour de Cassel en mémoire de la première excursion géologique que Jules Gosselet avait montée en juin 1865.

Cependant il y aura quand même deux événements qui marqueront cette année 2020 pour la SGN. Le premier vient d'une proposition de notre partenaire, la Société Géologique de France, qui a diffusé une synthèse géologique actualisant les connaissances acquises sur le Massif ardennais, dans sa revue *Géochronique* (n° 154). Ce dossier succède à un dossier tout aussi superbe (n° 153) sur le Maroc. En comparant les deux images de couverture, on comprend de suite que la façon de faire de la géologie n'est pas la même sur ces deux territoires. Nos amis belges, via *Geologica Belgica*, ont fortement participé à la préparation de ce dossier, piloté par un tandem qui n'a pas ménagé sa peine (Meilliez & Goemaere, 2020). N'oublions pas la *Société d'Histoire Naturelle des Ardennes* qui a aussi tenu sa place de « veilleur de terrain ». On le verra davantage dès cet automne (10 octobre à Givet) et aussi au printemps prochain (colloque de Givet du 28 au 31 mars 2021). Bref, 2019 et le premier semestre 2020 auront formé

1. Au moment où nous bouclons ce tome 27 en juillet 2020, les perspectives de pouvoir tenir les manifestations prévues cet automne en présentiel semblent réalistes.

une période de coopération fertiles entre sociétés voisines. Il n'y a pas de raison que ça s'arrête.

Le second événement est plus discret, et pourtant il marque une importante étape de la vie de la SGN : ce tome 27 est le premier à être imprimé sur les rotatives de l'Université de Lille qui, grâce à la reconstitution d'une université intégrée dispose des moyens pour se constituer en éditeur scientifique, et s'est lancée dans cette politique audacieuse. À l'échelle du globe, l'édition scientifique était en crise depuis plusieurs années, le modèle précédent ayant surtout montré ses dérives. Les chercheurs devaient payer pour publier des données qu'ils n'ont généralement pas récoltées gratuitement, puis devaient repayer (cher) les abonnements aux revues dans lesquelles ils publiaient. Et ce n'est qu'un aspect de la question. Les maisons d'édition ayant pignon sur rue devenaient davantage des pouvoirs politiques et financiers plutôt que des promoteurs de la pensée scientifique. Et pour couronner le tout, dans chaque nation, les autorités scientifiques obtenaient des crédits de recherche davantage en s'appuyant sur de fallacieux indices supposés scientifiques parce qu'ils étaient numériques, pour qualifier la valeur des chercheurs individuels et des laboratoires. Jusqu'à ce que, ici et là, en quelques mois, des institutions (s'appuyant sur de nombreuses voix) se sont rebellées et ont exigé que les résultats de la recherche financée par les deniers publics soient publics. Le château de sable s'est effrité (tout géologue pouvait le prévoir). De nombreuses universités par le monde se sont lancées dans l'édition scientifique pour valoriser en priorité les travaux de leurs laboratoires. Certes, ce n'est pas une panacée, et on pressent les horizons vers lesquels un tel modèle peut à son tour dériver. Toutefois, c'est dans ce contexte que l'Université de Lille, parmi d'autres, s'est lancée dans l'aventure.

Durant une petite année, un groupe de travail composé de représentants de la quarantaine de revues qui étaient répertoriées sur l'université, conduit par un groupe de pilotage efficace, a élaboré un processus, tenté d'apaiser les craintes des uns

et des autres, et finalement proposé une convention à chaque laboratoire ou association qui porte une revue. La SGN, qui porte la doyenne des revues (avec ses 150 ans), a trouvé là une convergence forte avec sa mission de partage de la culture scientifique. Nous avons là une excellente opportunité pour... redécouvrir ce qui se faisait tout naturellement, sans convention, au XIX^e siècle. Il suffit de lire de-ci de-là des articles des *Annales de la SGN* pour s'en rendre compte. C'est cet esprit de coopération simple, pour le seul plaisir de comprendre et de progresser ensemble, que l'on soit chercheur, enseignant, ou autre, que l'on doit faire vivre dans la durée. C'est l'esprit qui imprègne toutes les actions montées en partenariat pour ce sesquicentenaire. Une chance : ça ne se terminera pas avec 2020 ! C'est donc un nouvel élan... pour 150 ans !

Ce changement dans nos modalités d'édition a néanmoins un impact sur le contenu « non scientifique » de nos *Annales*. Considérant jusqu'à présent que nos adhérents n'étaient pas tous « connectés », nous assurions le compte rendu de l'administration de notre association au travers de la rubrique « vie de la société » de notre publication annuelle.

RÉFÉRENCES CITÉES

DE WEVER P. & MEILLIEZ F. (2020). — Des mots inadéquats introduisent de la confusion scientifique. *L'Esprit d'Archimède - La revue*, 3 : 21-22.

Le calendrier de bouclage imposé par le nouveau système d'édition scientifique régional auquel nous adhérons rend cette tradition inopérante. Par ailleurs, nous avons entièrement rénové et repensé notre site Internet pour que la communication soit maintenant parfaitement alimentée et efficace. Tous les comptes rendus institutionnels (AG, CA) s'y trouvent et sont consultables par les adhérents. Les comptes rendus des instances de pilotage, sollicitations pour avis et informations en temps réel sont transmises par courriel aux listes de diffusion appropriées (adhérents, CA, Bureau, conseil scientifique et éditorial) dans des délais très courts grâce à la grande efficacité de notre secrétaire Fabien Graveleau. Dans ce contexte, nous avons jugé nécessaire d'alléger très sensiblement le contenu de notre revue pour lui donner un caractère plus conforme au modèle actuel des revues scientifiques et de partage de contenus thématiques. Bien évidemment nous attacherons une attention toute particulière à continuer à informer largement de ces contenus administratifs nos quelques adhérents qui n'utilisent pas les outils numériques par des moyens adaptés à chaque situation.

MEILLIEZ F. & GOEMAERE E. (2020). — Dossier : Le Massif ardennais, un jeune massif ancien. *Géochronique*, 154 : 14-60.

En ce 30 octobre 2020, juste avant de mettre sous presse, une deuxième période de confinement commence. L'opération SGN-150 aura pu réaliser : le Dossier Géochronique (Le Massif ardennais), une journée d'animation à Givet (10 octobre) et le colloque sur le thème des Matériaux, en partenariat avec la SIM et UniLaSalle-Beauvais. Le colloque scientifique prévu en mars 2021 est reporté en 2022 (du 19 au 23 avril), à Givet (08). La séance solennelle reste programmée pour les 11 et 12 juin 2021 à la Cité Scientifique (Lilliad / Université de Lille).

Nous travaillons à organiser la mise en ligne sur notre site web de comptes rendus de ces événements ; les communications scientifiques qui en seront tirées seront publiées dans le T28 des ASGN, à paraître fin 2021.

Note aux membres SGN. — Comme annoncé précédemment dans les colonnes des *Annales* et au cours des assemblées générales de la Société, l'année 2020 marque un tournant dans le processus de publication de notre revue. Elle est désormais publiée par l'Université de Lille. C'est donc une nouvelle maquette qui est présentée avec ce tome 27 de la 2^e série de la revue. De ce fait, les Instructions aux auteurs ne sont pas imprimées cette année. Elles feront l'objet d'une mise à jour avec le tome 28.

Note to SGN members. — As previously announced in the *Annales* and during the Society general assemblies, this year 2020 does correspond to a major change in the publication process of our journal. From now on, it is published by University of Lille. So, this issue 27 (series 2) is under a renewed presentation. Consequently, the Author instructions are not printed in this issue. They will be updated in issue 28.

LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD IL Y A 50 ANS TOME XC DES ANNALES (1970) - ANNÉE DU CENTENAIRE

par Alain BLIECK

38 rue Paul Doumer, 59320 Haubourdin
alain.blieck@yahoo.fr

Francis MEILLIEZ

Université de Lille, Faculté des sciences et technologies, UMR 8187 LOG /CNRS/ULCO, bâtiment SN5 (Sciences de la Terre),
F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex
francis.meilliez@univ-lille.fr

L'année 1970 est celle du Centenaire de la Société Géologique du Nord (SGN). De ce fait, le tome XC des *Annales*, fort de 506 pages, comporte les actes du colloque du Centenaire qui s'est tenu les 27 et 28 novembre à la Cité Scientifique à Villeneuve d'Ascq (fascicule 4 du tome XC). Le Conseil d'administration chargé de son organisation et de la publication des actes était le suivant :

Président d'honneur	M. G. Waterlot	Déléguée aux publications	Mme Paule Corsin
Président	M. M. Gantois	Archiviste-Bibliothécaire	M. S. Loboziak
Premier Vice-Président	Melle D. Brice	Conseillers	M. A. Bonte, Mme S. Defretin, MM. A. Dalinval, Ch. Delattre, J. Prouvost et J. Dercourt
Vice-Présidents	MM. A. Beugnies et G. Souliez		
Secrétaire	M. J. Paquet		
Secrétaire-Adjoint	M. J.-P. Laveine		
Trésorier	M. l'Abbé G. Tieghem		

La Société s'est réunie en Assemblée générale le 14 janvier, au cours de laquelle elle a élu le Conseil d'administration de l'année. Elle a tenu cinq « séances ordinaires » mensuelles (11 février, 4 mars, 15 avril, 13 mai, 28 octobre et 16 décembre) et une réunion extraordinaire sur le terrain le 14 juin au cours de laquelle G. Waterlot a conduit la SGN dans la région lilloise pour étudier la « Géologie du Mélançois-Pévèle ». La séance de novembre était remplacée par le colloque du Centenaire qui a réuni 115 participants les 27 et 28 novembre (liste pages 497-499 du tome). Cet événement fut l'occasion d'inciter les étudiants de 2^e et 3^e cycles de l'université qui ne l'étaient pas encore à devenir membres de la Société ; les candidats furent élus au cours des séances ordinaires de l'année ; ceux qui auraient dû l'être à la séance de novembre l'ont été soit à la séance de décembre, soit à celle de janvier 1971 (cf. le tome XCI des *Annales*). On retrouve ainsi comme nouveaux membres Jacky Mania, Bernard Odent, Francis Meilliez, Danielle Decrouez, Monique Mercier, Bruno Mistiaen, Noël Beun, Jean-Marie Flament, Patrick De Wever, Alain Blieck, Jean-Pierre Colbeaux, Jean-Marie Dégardin et Yvonne Battiau-Queney. Ils ont participé au colloque du Centenaire qui fut pour la plupart d'entre eux, sinon tous, leur premier congrès de géologie. On retrouve également parmi ces « nouveaux membres du Centenaire » de jeunes enseignants-chercheurs (qu'on n'appelait pas encore comme ça, la plupart étant « assistants ») Jean-Jacques Verriez, Jean Didon, Jacky Ferrière [en dehors de celles et ceux qui étaient déjà membres]. Dans son discours d'investiture lors de la séance du 11 février, le nouveau

président, Joseph Gantois, rappelant que « *la Société Géologique du Nord est la plus ancienne Société géologique française après celle de Paris* », souhaite que « *à la sortie d'une époque troublée qui a ébranlé la Faculté* » [J. Gantois fait référence aux événements de 1968], « *le centenaire de notre Société marque le renouveau de la saine et franche amitié qui, comme le disait l'un de [ses] prédécesseurs, faisait de la Société Géologique du Nord "la première" en France par la chaude amitié qui y règne* » (p. 6 du tome XC). L'arrivée d'une cohorte de jeunes membres, étudiants et assistants, à l'occasion du Centenaire y a certainement contribué...

Les articles publiés dans les fascicules 1 à 3 du tome XC recouvrent des champs variés des sciences géologiques, avec une prédominance de la géologie houillère et de la paléontologie du Paléozoïque, marques de fabrique de la SGN :

◇ tectonique et tectono-stratigraphie : *La faille de Vireux à l'est de la Meuse*, par A. Beugnies et al. ; *La notion d'olistostrome et d'olistolite - Historique et étude critique*, par P. Broquet ;

◇ géologie et stratigraphie houillères : *Confirmation de l'âge Westphalien du houiller [sic] de Le Plessis (Manche)*... par R. Coquel et al. ; *Mise au point à propos de la note « Corrélation entre les Tonstein Romance et Prudence par F. Legrand »*, par A. Bouroz ; *Étude pétrographique préliminaire des houilles du bassin du Moatize (Tete, Mozambique)*, par M.J. Lemos de Sousa & E. Mériaux ;

Sédimentation rythmée dans les charbons du bassin du Nord - Pas-de-Calais, par P. Dollé ;

✧ géologie de terrain : *Nouvelles observations géologiques sur les terrains paléozoïques, créacé et tertiaire* [sic] des environs de Bavai, par B. Waterlot ; *Données nouvelles sur le Carbonifère des environs de Pont-sur-Sambre*, par B. Waterlot ; *La structure annulaire granitique de Suf-Kajiran (Afghanistan central)*, par A.F. de Lapparent & J. Blaise ;

✧ pétrographie-minéralogie : *Le photomètre de microthermoluminescence, son intérêt dans les applications de la TL à la géologie*, par J.-M. Charlet ; *Rôle de l'altération météorique et des mouvements de l'eau dans l'évolution du minerai manganésifère de Moanda (près Franceville, Gabon)*, par M. Bouma ;

✧ paléontologie du Paléozoïque : *Découverte d'un Euryptéridé (Erieopterus brewsteri H. WOODWARD) dans l'arkose d'Haybes, à Fépin (Gédinnien inférieur de l'Ardenne)*, par J. Paquet & G. Waterlot [ce matériel est repris dans le catalogue des collections lilloises d'Euryptérides, par Blicck *et al.*, 2013] ; *Le genre Spyridiophora (Brachiopodes Productoides) dans le Permien asiatique*, par H. & G. Termier ; *Sur une dalle à empreintes de pas lacertoïdes du houiller du bassin du Nord - Pas-de-Calais*, par P. Dollé *et al.* [ces traces fossiles, attribuées à un « amphibien » *Prolacertipes pruvosti* et figurées par Dollé *et al.* (leurs figures 1 et 2), seraient les seules preuves de l'existence de Tétrapodes dans le Houiller du Nord - Pas-de-Calais ; malheureusement, la dalle qui les porte a été emmenée par P. Dollé dans ses collections personnelles, et les efforts déployés par le Musée d'histoire naturelle de Lille pour la voir intégrée aux collections publiques n'ont pas abouti (T. Malvesy et T. Oudoire, comm. pers., mai 2020 ; le catalogue des collections ne mentionne donc pas cette dalle : Blicck *et al.*, 1999)] ; *Quelques Ostracodes frasnien du Bas-Boulonnais (France)*, par F. Lethiers ; *Ammonoïdes de l'Artinskien (= Zygarien) dans la montagne de Bamyran (Afghanistan)*, par H. & G. Termier ; *Les Prebelemnitida : un nouvel ordre de Céphalopodes, par H. & G. Termier ; Ostracodes du Dévonien supérieur de l'Avesnois (France) - Limite Frasnien moyen - Frasnien supérieur*, par F. Lethiers ; *Révision des Conchostracés westphaliens du bassin houiller du Nord - Pas-de-Calais*, par S. Defretin-Lefranc [ce matériel a été revu dans les catalogues de Hennion *et al.*, 2015 et Cuvelier *et al.*, 2015].

Le colloque du Centenaire s'est déroulé dans les locaux de la Cité scientifique à Villeneuve d'Ascq, sur le campus de l'Université des sciences et techniques de Lille (comme elle s'appelait à l'époque ; elle a changé de nom plusieurs fois jusqu'à redevenir une composante de l'Université de Lille depuis 2012). Son organisation avait été confiée à une commission, coordonnée par Jacques Paquet et Jean-Pierre

Laveine (J. Gantois, tome XC, p. 495). Dans son discours d'ouverture du colloque, le Doyen Defretin rappelle brièvement l'histoire de la SGN, évoque les grands noms de la géologie lilloise et signale que la SGN, partie en 1870 avec 11 membres fondateurs, « compte près de 400 membres actuellement » (en fait 343 en 1971, l'un des trois effectifs les plus élevés dans toute l'histoire de la SGN : Blicck *et al.*, 2014, tableau 5). Il évoque son rayonnement national et international, perceptible, selon lui, à la présence de nombreuses personnes morales, membres de la SGN (8 bibliothèques, 5 chambres de commerce, 12 écoles, instituts et laboratoires, 15 entreprises industrielles, 51 géologues étrangers dont 33 belges) et à la diffusion de ses publications, *Annales* et *Mémoires*. « Les échanges [de ces publications] qu'elle poursuit avec le Monde entier, lui ont permis de constituer une bibliothèque qui, après celle de la Société Géologique de France, est la plus importante de France. » (Defretin, tome XC, p. 168). Le Doyen Defretin insiste aussi sur les collections de stratigraphie, paléontologie et minéralogie qui ont servi de matériau de base des publications et qui sont majoritairement rassemblées au Musée Gosselet (aujourd'hui intégré au Musée d'histoire naturelle de Lille - voir l'historique de Oudoire *et al.*, 2014). Il rappelle la collaboration longue et fructueuse entre la SGN et « les responsables du Bassin Houiller », conduisant à affirmer que « toute l'histoire du Bassin Houiller du Nord et du Pas-de-Calais se trouve consignée dans [les] *Annales*. » (tome XC, p. 169 - voir l'historique de la bibliothèque recherche des sciences de la Terre par Locatelli, 2014). Enfin, évoquant le futur de la Société, il appelle de ses vœux une collaboration plus soutenue entre les différentes branches des sciences de la Terre (géologie « *sensu stricto* », géotechnique, paléontologie, minéralogie, géophysique, géochimie...) pour conforter les avancées récentes en tectonique globale issues de l'exploration des océans (*ibid.*, p. 170 ; rappelons qu'en 1970 la tectonique des plaques ne date que de quelques années).

C'est évidemment le fascicule 4 du tome XC des *Annales*, dévolu aux actes du Centenaire, qui est le plus épais, avec 36 articles, dont plusieurs de synthèse, regroupés comme suit :

✧ *Géologie du bassin de Mons et du Hainaut, un siècle d'histoire*, par R. Marlière ;

✧ *Les loess et la stratigraphie du Pléistocène récent dans le Nord de la France et en Belgique*, par R. Paepe & J. Sommé ;

✧ *Pétrologie des charbons*, par B. Alpern *et al.* (deux articles) ;

✧ *Un siècle et demi de Paléobotanique dans le Nord de la France*, par P. & P. Corsin ;

✧ *Le cycle hercynien dans les Pyrénées*, par R. Clin *et al.* (trois articles) ;

- ✧ *Contribution à la géologie des Hellénides : le Gavrovo, le Pinde et la zone ophiolitique subpélagonienne*, par J. Aubouin *et al.* (cinq articles) ;
- ✧ *Tectonique de la Méditerranée centrale*, par A. Caire ;
- ✧ *Données nouvelles sur la géologie des Cordillères bétiques*, par J. Bourgois *et al.* (huit articles) ;
- ✧ *Glissements de terrains*, par A. Bonte *et al.* (six articles) ;
- ✧ *Contribution des sciences de la Terre aux études sur l'« environnement »*, par J. Ricour ;
- ✧ *Hydrogéologie dans la région du Nord*, par G. Souliez *et al.* (cinq articles) ;
- ✧ *Les Productoïdes du Djoulfien (Permien supérieur) dans la Téthys orientale : essai sur l'agonie d'un phylum*, par H. & G. Termier ;
- ✧ *Typologie géochimique des calcaires, application à l'étude de l'origine des calcaires métamorphiques dans les massifs hercyniens français*, par P. Debrabant.

Par la prédominance des articles sur les chaînes alpines (Hellénides, Méditerranée centrale, Cordillères bétiques), ces travaux du Centenaire s'inscrivent dans la « période dinaro-hellénique » de la SGN (*sensu* Charvet, 2014). D'ailleurs, Michel Durand-Delga a été accueilli comme nouveau membre SGN à l'occasion de ce Centenaire. Paul Celet, d'origine universitaire lilloise, et Jean Dercourt, d'origine universitaire parisienne, avaient initié un groupe de recherches sur les Hellénides, sous l'égide de Jean Aubouin. François Thiébault et Jacques Charvet les ont rejoints. Jacques Paquet, de son côté, venait de terminer sa thèse dans les Cordillères bétiques au sud de l'Espagne sous la direction de Michel Durand-Delga, tandis que Jean Didon, recruté comme enseignant à l'EUDIL (École Universitaire d'Ingénieurs de Lille qui a ouvert ses portes à la rentrée 1969), venait d'achever la sienne sur l'arc de Gibraltar. Gérard Duée et Paul Broquet quant à eux, étaient membres de l'équipe d'André Caire, professeur à Paris qui travaillait en Algérie et en Tunisie et avait implanté une équipe en Sicile, établissant un lien entre Maghreb et Italie. Ainsi, le département des sciences de la Terre de l'université de Lille groupait-il plusieurs géologues travaillant tout autour de la Méditerranée. La géologie méditerranéenne a connu en France un essor cohérent grâce à un réseau très actif de chercheurs dont le nœud majeur était à Paris ; ces chercheurs étaient tous héritiers de Louis Glangeaud, Paul Fallot et Jean-Henri Brunn. Deux autres nœuds se développaient en même temps à Lille et à Montpellier (autour de Maurice Mattauer).

Dans son discours de clôture du colloque, J. Gantois parle de « nouvelle vague » (peut-être en allusion à la nouvelle vague du cinéma des années 1950-60) et souhaite que ces

géologues lillois (en collaboration avec leurs collègues de l'Université de Mons en Belgique - cf. le discours du Doyen Defretin) reprennent le « flambeau pour un nouveau siècle », et, si possible, en ne négligeant « pas trop la géologie régionale » (tome XC, p. 496). Ce que la SGN ignore à ce moment-là, c'est qu'elle vit son « âge d'or » si l'on en juge par le nombre d'articles publiés dans ses *Annales* (Blieck *et al.*, 2014, fig. 9) et le nombre de ses membres (*ibid.*, fig. 10). Le déclin s'amorcera dans la deuxième moitié des années 1970 dans un contexte national et international où les critères d'évaluation de la recherche et des chercheurs en géologie évolueront au détriment des sociétés savantes régionales et de leurs revues périodiques. Mais ceci est une autre histoire...

Remerciements

Nos remerciements vont à Jessie Cuvelier (UMR 8198 du CNRS - Université de Lille) pour les références sur les collections de « Conchostracés » ; ainsi qu'à Thierry Malvesy (Muséum d'Histoire Naturelle de Neuchâtel, Suisse) et Thierry Oudoire (Musée d'Histoire Naturelle de Lille) à propos de la dalle de pas fossiles de Tétrapodes du Houiller du Bassin du Nord - Pas-de-Calais.

BIBLIOGRAPHIE

- BLIECK A., BRICE D., CHARVET J., CUVELIER J., DE BAERE J.-P., DHAINAUT A., MATRION A., MEILLIEZ F., MISTIAEN B., OUDOIRE T., RICOUR J., SOMME J. & TRENTESAUX A. (2014). — La Société géologique du Nord et les sciences de la Terre dans le nord de la France : science, industrie et société. *In* : BLIECK A. & DE BAERE J.-P. eds, La Société géologique du Nord et l'histoire des sciences de la Terre dans le nord de la France. *Mémoires de la Société Géologique du Nord*, **XVII** : 3-40.
- BLIECK A., CUVELIER J. & OUDOIRE T. (2013). — Euryptérides des collections de paléontologie de Lille : collections du Musée d'histoire naturelle de Lille (VII) et collections de l'Université Lille 1 (catalogue I). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **20** : 31-42.
- BLIECK A., MALVESY T., CANDILIER A.-M., CLOUTIER R. & POPLIN C. (1999). — Les collections du Musée d'Histoire Naturelle de Lille. II. — Vertébrés paléozoïques. *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **7** : 87-128.
- CHARVET J. (2014). — La période dinaro-hellénique de la Société géologique du Nord. *In* : BLIECK A. & DE BAERE J.-P. eds, La Société géologique du Nord et l'histoire des sciences de la Terre dans le nord de la France. *Mémoires de la Société Géologique du Nord*, **XVII** : 109-120.
- CUVELIER J., HENNION M., GALLEGO O. & VACHARD D. (2015). — Palaeontological collections of Lille University - Sciences and Technologies. II - Diplostraca (types and figured specimens). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **22** : 119-134.

HENNION M., CUVELIER J., GALLEGRO O., OUDOIRE T. & VACHARD D. (2015). — Collections of the Natural History Museum of Lille. VIII. — Diplostraca (Types and figured specimens). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **22** : 109 - 118.

LOCATELLI E. (2014). — La bibliothèque recherche des sciences de la Terre de l'Université de Lille au fil du temps : historique du patrimoine, un fonds au service de la communauté scientifique. *In* : BLIECK A. & DE BAERE J.-P. eds, La Société géologique

du Nord et l'histoire des sciences de la Terre dans le nord de la France. *Mémoires de la Société Géologique du Nord*, **XVII** : 151-173.

OUDOIRE T., CUVELIER J., D'ANDREA J., KOCH C. & DHAINAUT A. (2014). — Le département de géologie du Musée d'histoire naturelle de Lille, des collections à l'image de l'histoire géologique régionale. *In* : BLIECK A. & DE BAERE J.-P. eds, La Société géologique du Nord et l'histoire des sciences de la Terre dans le nord de la France. *Mémoires de la Société Géologique du Nord*, **XVII** : 175-183.

LES ARGILES ALBIENNES DE SAINT-FLORENTIN (YONNE) : REPÈRES STRATIGRAPHIQUES ET SÉQUENCES DANS UNE SUCCESSION CONDENSÉE. MINÉRALOGIE ET CONTRÔLE CLIMATO-EUSTATIQUE

The Albian clays from Saint-Florentin (Yonne): stratigraphic markers and sequences in a condensed sedimentary succession. Mineralogy and climato-eustatic control

par Francis AMÉDRO

26 rue de Nottingham, 62100 Calais et Université de Bourgogne – Franche-Comté, UMR 6282, CNRS Biogéosciences,
6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon.
francis.amedro@free.fr

Jean-François DECONINCK

Université de Bourgogne – Franche-Comté, UMR 6282, CNRS Biogéosciences, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon.
jean-francois.deconinck@u-bourgogne.fr

& Bertrand MATRION

1 ter rue du Pont, 10450 Bréviandes et Université de Bourgogne – Franche-Comté, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon.
bertrand.matrion@sfr.fr

Résumé

Au sud-est du Bassin de Paris, les argiles albiennes à faciès Gault de Saint-Florentin dans l'Yonne, nommées régionalement Argiles des Pommerats, sont l'objet d'une description lithologique détaillée accompagnée de récoltes d'ammonites et d'inocérames. Cinq séquences eustatiques de 3^e ordre sont identifiées au sein de la formation qui correspond à la partie supérieure des Argiles tégulines de Courcelles dans l'Aube. La comparaison des successions équivalentes de l'Aube (38,91 m) et de l'Yonne (10,70 m), distantes de 75 km, révèle le caractère condensé des Argiles des Pommerats. L'analyse des argiles par diffraction des rayons X montre que les assemblages argileux sont principalement constitués d'un mélange d'illite, de smectite et de kaolinite. L'évolution des proportions relatives de ces trois minéraux argileux le long de la coupe suggère un contrôle climato-eustatique de la sédimentation. À l'influence des variations du niveau marin se superposent des changements climatiques de grande ampleur avec notamment l'installation d'une période plus aride marquée par de fortes proportions de smectite à la fin de l'Albien moyen.

Abstract

To the south-east of the Paris Basin, the Albian Gault clays of Saint-Florentin in Yonne department, regionally known as « Argiles des Pommerats Formation », are the subject of detailed biostratigraphic (ammonites and inoceramids) and lithological descriptions. Five 3rd order eustatic sequences are identified within the formation which corresponds to the upper part of the « Argiles tégulines de Courcelles Formation » in the Aube department. The comparison with coeval succession of Aube (38,91 m) and Yonne (10,70 m), 75 km apart, reveals the condensed nature of the Argiles des Pommerats Formation. X-ray diffraction analyses of clay minerals show that the clay assemblages are dominantly composed of a mixture of illite, smectite and kaolinite. The relative proportions of these minerals along the studied section suggest a climato-eustatic control of the sedimentation. The influence of sea level variations is superimposed on large-scale climatic changes, including the installation of a more arid, smectite-rich period at the end of the Middle Albian.

INTRODUCTION

Le long de la bordure orientale du Bassin de Paris, le département de l'Aube est caractérisé à l'Albien par une sédimentation entièrement argileuse avec la superposition de deux formations : les Marnes de Brienne reposant sur les Argiles tégulines de Courcelles. Un peu plus au sud-ouest, le département de l'Yonne voit simultanément le dépôt d'une épaisse formation sableuse – les Sables de la Puisaye – surmontée par quelques dizaines de mètres d'argiles et de marnes à faciès Gault : les Argiles des Pommerats en dessous et les Marnes de Brienne au-dessus. La transition entre les faciès sableux de l'Yonne et les faciès argileux de l'Aube s'effectue au niveau de Saint-Florentin avec le développement vers le nord de

deux digitations issues des Sables de la Puisaye : les Sables des Drillons à la base, les Sables de Frécambault au-dessus, séparées par les Argiles des Drillons (Barrois, 1874 ; Lauerjat, 1967, 1969 ; Amédro & Matrion, 2008).

Depuis plus d'un siècle, les Argiles des Pommerats sont considérées comme l'équivalent latéral de la partie supérieure des Argiles tégulines de Courcelles (Lambert, 1894 ; Houdard, 1932 ; Mégrien, 1964 ; Lauerjat, 1967 ; Rat *et al.*, 1979, Amédro & Matrion, 2008). Cette proposition est toujours valable, mais peut néanmoins être affinée de façon significative pour trois raisons. La première est que l'on dispose depuis peu, et pour la première fois, d'une coupe complète des Argiles tégulines de Courcelles grâce à la réalisation de trois forages carottés dans la partie septentrionale du stratotype de l'étage Albien près

de Brienne-le-Château, en particulier à Vallentigny (Fig. 1) (Amédro *et al.*, 2017, 2019). La deuxième est l'existence à Saint-Florentin, jusqu'à une période récente, d'une carrière recoupant la quasi-totalité des Argiles des Pommerats, d'où la possibilité d'effectuer un levé lithologique précis au sein de la formation. Enfin la troisième raison est l'identification de quinze litho- et éco-événements dans le stratotype de l'Albien (numérotés de 1 à 15), dont la plupart sont connus dans l'ensemble du Bassin de Paris, voire au-delà (Amédro *et al.*, 2019). Suivant les concepts de la stratigraphie événementielle, l'usage de ces niveaux repères permet de corrélér de façon très fine les successions argileuses à faciès Gault de l'Aube et de l'Yonne (Amédro, 2009).

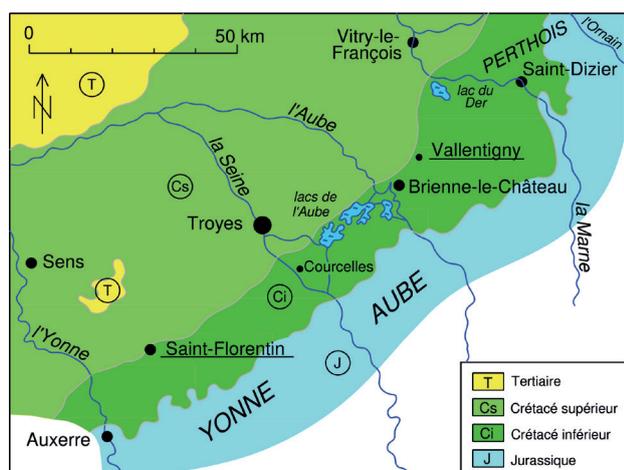


Fig. 1. — Localisation géographique des coupes citées dans le texte.
Fig. 1. — Location map of the sections mentioned in the text.

LES NIVEAUX REPÈRES UTILISÉS POUR LES CORRÉLATIONS DANS L'ALBIEN DE LA BORDURE SUD-EST DU BASSIN DE PARIS

Il n'est pas nécessaire de redonner ici la liste complète des niveaux repères décrits par Amédro *et al.* (2019) dans l'Albien type de l'Aube, mais simplement de rappeler les caractéristiques des sept événements lithologiques ou bio-écologiques identifiés dans l'intervalle étudié qui correspond à la moitié supérieure des Argiles tégulines de Courcelles. Du bas vers le haut, les événements concernés sont les suivants :

- (7) un lit (13 m à 0,10 m) de sables glauconieux s'amincissant progressivement vers le nord-est, écho des Sables de Frécambault de l'Yonne ;
- (8) un lit (0,02 m) de nodules phosphatés centimétriques noirs contenant une faune exclusive d'*Hoplites* : *H. (H.) dentatus* (J. Sowerby), *H. (H.) rudis* Parona & Bonarelli, *H. (H.) canavarii* Parona & Bonarelli ;

(9) un ou deux bancs décimétriques de calcaire sableux piqueté de glauconie fine, qui contiennent encore quelques nodules de phosphate beige, friable, avec toujours de nombreux Hoplitidae, en particulier *Anahoplites intermedius* Spath, *A. osmingtonensis* Owen et *A. planus* (Mantell), mais aussi des ammonites cosmopolites dont *Oxytropidoceras (Mirapelia) mirapelianum* (d'Orbigny) (« *Oxytropidoceras* event » d'Amédro, 2009) ;

(10) un ensemble de trois lits (a, b, c) centimétriques de nodules phosphatés beiges, non jointifs, séparés les uns des autres par 3 à 7 m d'argile ;

(11) un lit (0,05 m à 0,08 m) de nodules phosphatés noirs, dont la plupart sont des moules internes de mollusques. L'ammonite *Dipoloceras cristatum* (Brongniart) et l'inocérame *Actinoceramus subsulcatus* (Wiltshire) sont caractéristiques de ce niveau où apparaissent également *Actinoceramus sulcatus* (Parkinson) et d'autres espèces d'ammonites incluant *Metaclavites compressus* (Parona & Bonarelli), *Euhoplites ochetonotus* (Seeley), *Beudanticeras beudanti* (Brongniart), *Dipoloceras bouchardianum* (d'Orbigny), etc. (« *Dipoloceras* event » d'Amédro, 2009) ;

(12) un intervalle (5 à 7 m) caractérisé par une abondance d'*Actinoceramus sulcatus* ;

(13) un banc calcaire (0,50 m à 1,10 m avec de rapides variations latérales d'épaisseur), silteux, surmontant une surface de ravinement et limité au sommet par un fond durci et phosphatisé (*hardground* l'Étape d'Amédro *et al.*, 1995).

LES ARGILES ALBIENNES DE SAINT-FLORENTIN (YONNE)

Plusieurs carrières entaillaient le sommet des Sables de Frécambault et tout ou partie des Argiles des Pommerats aux abords de Saint-Florentin durant la seconde partie du xx^e siècle (Courel *et al.*, 1972). Une seule d'entre elles subsistait au début des années 2000, la carrière Dallemagne ou carrière du Bois des joncs, localisée à 1 km à l'ouest de Saint-Florentin le long de la route D 905. Malheureusement son exploitation a cessé depuis deux ans et le fluage des argiles ne permet plus aucune observation lithologique. Une première description du front de taille a été publiée par Amédro & Matrion en 2008 à partir d'un levé réalisé un an auparavant, mais la base des Argiles des Pommerats était alors partiellement masquée par des éboulis. En 2013, nous avons eu l'opportunité de retourner dans la carrière et de compléter, à la fois le levé lithologique avec la découverte d'une nouvelle discontinuité sédimentaire, mais également les récoltes d'ammonites, ce qui justifie une nouvelle description de l'affleurement. À cette occasion, 36 échantillons d'argile ont été prélevés avec un pas de 0,20 m à 0,30 m à travers la quasi-totalité des Argiles des Pommerats,

à l'exception des deux mètres supérieurs qui étaient déjà masqués par des glissements de sédiments quaternaires.

La succession lithologique et les récoltes de macrofossiles (ammonites et inocérames)

Du bas vers le haut, la coupe levée en octobre 2007 et complétée en avril 2013 est la suivante (Fig. 2) :

Sables de Frécambault

✧ 0 (plancher de la carrière) à 2,50 m : sable grossier, jaunâtre, légèrement glauconieux, avec quelques graviers de quartz ;

✧ 2,50 m à 3,00 m : grès grossier gris pâle, très cohérent, contenant quelques rares moules internes mal préservés d'*Hoplites* (*Hoplites*) *dentatus* (J. Sowerby). La limite supérieure du banc est légèrement onduleuse avec des ondulations horizontales d'amplitude plurimétrique et verticales pluricentimétriques. Les Sables de Frécambault mesurent 30 à 33 m d'épaisseur aux abords de Saint-Florentin et correspondent au niveau repère (7) dans la liste des litho- et éco-événements recensés dans l'Albien type de l'Aube (Amédéo *et al.*, 2019) ;

Argiles des Pommerats

✧ 3,00 m à 3,15 m : Gravier à *Opis* ; argile sableuse noire, consolidée, riche en dragées de quartz ovoïdes, en granules phosphatées millimétriques et en nodules phosphatés noirs de 2 à 5 cm souvent agglutinés les uns aux autres et dont la plupart sont des moules internes de macrofossiles. Le Gravier à *Opis* repose directement sur la surface sommitale onduleuse des Sables de Frécambault et présente des variations latérales d'épaisseur, passant de cinq centimètres à une quinzaine de centimètres sur quelques mètres de distance en fonction de la topographie. La limite supérieure du lit est une surface d'omission. Le Gravier à *Opis* a été observé pour la première fois au XIX^e siècle par Ébray (1864) à Soumaintrain, à 7 km au nord-est de Saint-Florentin et nommé à cette occasion Gravier à *Opis Hugardiana* d'Orbigny, du nom d'un bivalve présent dans le niveau [Au XIX^e siècle, la graphie des espèces dérivées de noms propres débutait par une lettre majuscule, les autres non ; cet usage est aujourd'hui abandonné]. Trois décennies plus tard, Lambert (1894) lui a substitué le terme de Gravier à *Opis glareosa* de Loriol, sans justification apparente. Les fossiles les plus abondants et les plus intéressants stratigraphiquement présents dans le Gravier à *Opis* à Saint-Florentin sont les ammonites, représentées par les espèces *Pictetia astieriana* (d'Orbigny), *Phylloceras* (*Hypophylloceras*) sp., *Puzosia* sp., *Beudanticeras laevigatum* (J. de C. Sowerby), *Hoplites* (*Hoplites*) *dentatus* (J. Sowerby), *H. (H.) rudis* Parona et Bonarelli, *H. (H.) canavarii* Parona et Bonarelli, *Anahoplites osmingtonensis* Owen, *A. intermedius* Spath,

A. planus (Mantell), *Euhoplites loricatus* Spath, *Oxytropidoceras* (*Oxytropidoceras*) *roissyanum* (d'Orbigny), *O. (Mirapelia) mirapelianum* (d'Orbigny), *Hamites* sp. et *Pseudhellicoceras* sp. Cette association montre que l'on se trouve en présence d'un niveau condensé associant des espèces du sommet de la zone à *Hoplites dentatus* [*H. (H.) rudis* et *H. (H.) canavarii*] et de la base de la zone suivante à *Anahoplites intermedius* [*A. osmingtonensis*]. Comme indiqué ci-dessus, la quasi-totalité des taxons contenus dans le Gravier à *Opis* sont des ammonites, essentiellement des *Hoplites* et *Anahoplites* qui rassemblent plus de 95 % des récoltes. Le reste de la macrofaune est peu diversifié avec quelques bivalves dont *Actinoceramus concentricus* (Parkinson), *Opis* sp. et *Linotrigoia fittoni* (Deshayes), de rares gastéropodes incluant *Gyrodes gaultina* (d'Orbigny), *Nummogaultina fittoni* (Roemer) et *Semisolarium moniliferum* (Michelin) et enfin un nautille déterminé comme *Eutrephoceras bouchardianum* (d'Orbigny). À Saint-Florentin, le Gravier à *Opis* réunit dans une seule unité lithologique les niveaux repères (8) et (9) définis dans l'Aube.

✧ 3,15 m à 4,25 m : argile silteuse noire contenant de nombreuses empreintes argileuses d'*Actinoceramus concentricus*, quelques échinides irréguliers appartenant au genre *Hemiaster* et, à 3,50 m et 4,00 m, deux empreintes d'*Anahoplites intermedius*. Les 0,30 m inférieurs de l'unité lithologique sont plus sableux et livrent encore quelques graviers de quartz ;

✧ 4,25 m à 5,10 m : argile silteuse noire riche en empreintes d'*A. concentricus*, limitée à la base par une surface d'omission surmontée par un niveau plus silteux, gris foncé, épais de 0,10 m, dans la partie inférieure duquel on trouve des graviers et petits nodules phosphatés noirs, ainsi qu'un gravier de quartz. La surface d'omission présente à 4,25 m est caractérisée par la présence de traces-fossiles de type *Thalassinoides*, de façon comparable à ce que l'on observe au niveau de toutes les surfaces perforées visibles dans la coupe. Durant l'intervalle de temps correspondant à l'arrêt de sédimentation, des organismes fouisseurs, probablement des crustacés, ont entraîné par leur activité une profonde bioturbation du fond marin (Bromley, 1990). Un exemplaire de l'ammonite *Anahoplites intermedius*, préservé sous la forme d'un moule interne en phosphate de calcium, a été recueilli à 4,40 m ;

✧ 5,10 m à 6,50 m : cycle comparable au précédent, limité à la base par une surface perforée surmontée par un niveau plus silteux, gris moyen, épais de 0,15 m. La base du lit contient quelques petits nodules phosphatés beiges avec des bivalves : *A. concentricus*, *Eopecten* sp., *Entolium orbiculare* (J. Sowerby) et des ammonites : *Anahoplites planus*, *Dimorphoplites niobe* Spath, *D. doris* Spath, *Euhoplites loricatus* Spath et *Hamites* sp. Quelques empreintes

argileuses d'ammonites ont également été collectées plus haut dans l'intervalle : *Dimorphoplites niobe* à 5,15 m et 5,20 m, *D. doris* à 5,20 m et *Dimorphoplites biplicatus* (Mantell) à 5,30 m et à 6,10 m ;

✧ 6,50 m à 8,70 m : argile silteuse noire présentant de nombreuses empreintes d'inocérames appartenant à l'espèce *Actinoceramus concentricus*, également limitée à la base par une surface d'omission riche en *Thalassinoides*. L'intervalle débute par un niveau décimétrique de sable argileux, cohérent mais non durci, gris-pâle, contenant quelques grains infra-millimétriques de glauconie et des nodules phosphatés noirs de 1 à 3 cm dont la plupart sont des moules internes d'ammonites appartenant aux espèces *Anahoplites planus*, *Dimorphoplites biplicatus* et *Euhoplites lautus* (J. Sowerby). Les trois lits de nodules phosphatés surmontant des surfaces d'omission décrits à 4,25 m, 5,10 m et 6,50 m correspondent respectivement aux niveaux repères (10 a), (10 b) et (10 c) du stratotype ;

✧ 8,70 m à 9,00 m : sable argileux consolidé, gris, contenant à la base de nombreux nodules phosphatés centimétriques noirs et un peu de glauconie. La limite inférieure du banc est une surface de ravinement bien marquée. Les ammonites sont fréquentes dans les nodules phosphatés, avec *Beudanticeras beudanti* (Brongniart), *Anahoplites planus*, *Dimorphoplites silenus* Spath, *Euhoplites lautus*, *E. ochetonotus* (Seeley) et *Dipoloceras cristatum* (Brongniart). Il s'agit du niveau repère (11) de l'Albien type ;

✧ 9,00 m à 11,10 m : argile silteuse grise, légèrement glauconieuse, avec une teneur en glauconie qui diminue progressivement vers le haut et riche en empreintes d'inocérames qui appartiennent maintenant à l'espèce *Actinoceramus sulcatus* (Parkinson). Cette argile est entrecoupée par deux niveaux décimétriques plus silteux, situés respectivement à 9,60 m et 10,10 m et par un lit de nodules phosphatés arrondis, non jointifs, de 3 à 5 cm, à 9,25 m. Certains de ces nodules sont des moules internes de bivalves, en particulier *Actinoceramus sulcatus* et *Pectinucula pectinata* (J. Sowerby) ;

✧ 11,10 m à 11,70 m : argile non glauconieuse, très légèrement silteuse, devenant ocre par altération, parsemée d'empreintes d'*A. sulcatus* ;

✧ 11,70 m à 12,10 m : argile marneuse ocre-jaune, consolidée mais non durcie, riche en moules internes d'*A. sulcatus*, de rhynchonelles à côtes fines et d'ammonites : *Metaclavites compressus* (Parona et Bonarelli), *Mortoniceras* (*Mortoniceras*) *pricei* (Spath) et *Hysterocheras orbigny* (Spath). Quelques nodules phosphatés centimétriques beiges sont présents à la limite supérieure du banc qui coïncide avec une surface d'omission à *Thalassinoides*. L'intervalle 9,00 m

– 12,10 m, caractérisé par une abondance d'*Actinoceramus sulcatus*, correspond au niveau repère (12) ;

✧ 12,10 m à 13,00 m : argile marneuse plastique beige, dans laquelle aucun inocérame n'a été observé ;

✧ 13,00 à 13,50 m (fin de la coupe) : argile sableuse, très glauconieuse, verdâtre, débutant à la base par un gravier riche en grains de quartz de 2 à 5 mm et en nodules phosphatés beiges dont l'un a fourni un moule interne de *Mortoniceras* (*M.*) *pricei*. La limite inférieure de l'unité est une surface de ravinement bien marquée. Les connaissances acquises dans le département voisin de l'Aube, à la fois dans les affleurements situés le long des berges de la rivière Aube (Amédro *et al.*, 1995 ; Amédro & Matrimon, 2014), mais également dans le forage carotté de Vallentigny implanté près de Brienne-le-Château (Amédro *et al.*, 2019) suggèrent qu'il s'agit du niveau repère (13) du stratotype de l'étage Albien. Dans l'Aube, la base des Marnes de Brienne est située quelques décimètres plus haut, à la limite supérieure du *hardground* l'Étape (Amédro *et al.*, 1995). Il est probable qu'une discontinuité sédimentaire comparable, ou tout au moins une surface d'omission bien exprimée, existe au même niveau dans l'Yonne.

La figure 2 illustre la succession lithologique décrite ci-dessus dans la carrière du Bois des Joncs à Saint-Florentin avec, en regard, la répartition des espèces les plus caractéristiques d'ammonites. La zonation d'ammonites utilisée est celle qui a été définie par Amédro (1981, 1992), actualisée par Amédro *et al.* (2000) et Kennedy & Latil (2007). Une centaine d'ammonites ont été recueillies dans le Gravier à *Opis* et une quarantaine au sein des Argiles des Pommerats, réparties sur toute la hauteur de la formation, ce qui permet de repérer avec une certaine précision les limites de zones. Le Gravier à *Opis* contient une association typique de la limite entre les zones à *Hoplites dentatus* et à *Anahoplites intermedius*. L'espèce *A. intermedius* est quant à elle identifiée jusqu'à 4,40 m. Par comparaison avec ce que l'on connaît en d'autres points du Bassin anglo-parisien, en particulier dans le Kent et l'Aube (Amédro & Matrimon, 2014), c'est probablement à ce niveau, interprété comme une surface d'inondation maximale en raison d'une diminution brutale de la teneur en silt, qu'il convient de placer la limite entre les zones à *A. intermedius* et à *Dimorphoplites niobe*. La limite entre les zones suivantes est plus facile à cerner en raison des récoltes de *D. niobe* jusqu'à 5,20 m et de *Dimorphoplites biplicatus* à partir de 5,30 m. De façon comparable à ce qui est décrit précédemment, on se trouve vraisemblablement au niveau d'une surface d'inondation maximale. La base de la zone suivante à *Dipoloceras cristatum*, qui marque la base de l'Albien supérieur, est située à 8,70 m et coïncide avec une surface de ravinement connue dans l'ensemble du Bassin anglo-parisien. La dernière zone reconnue dans la

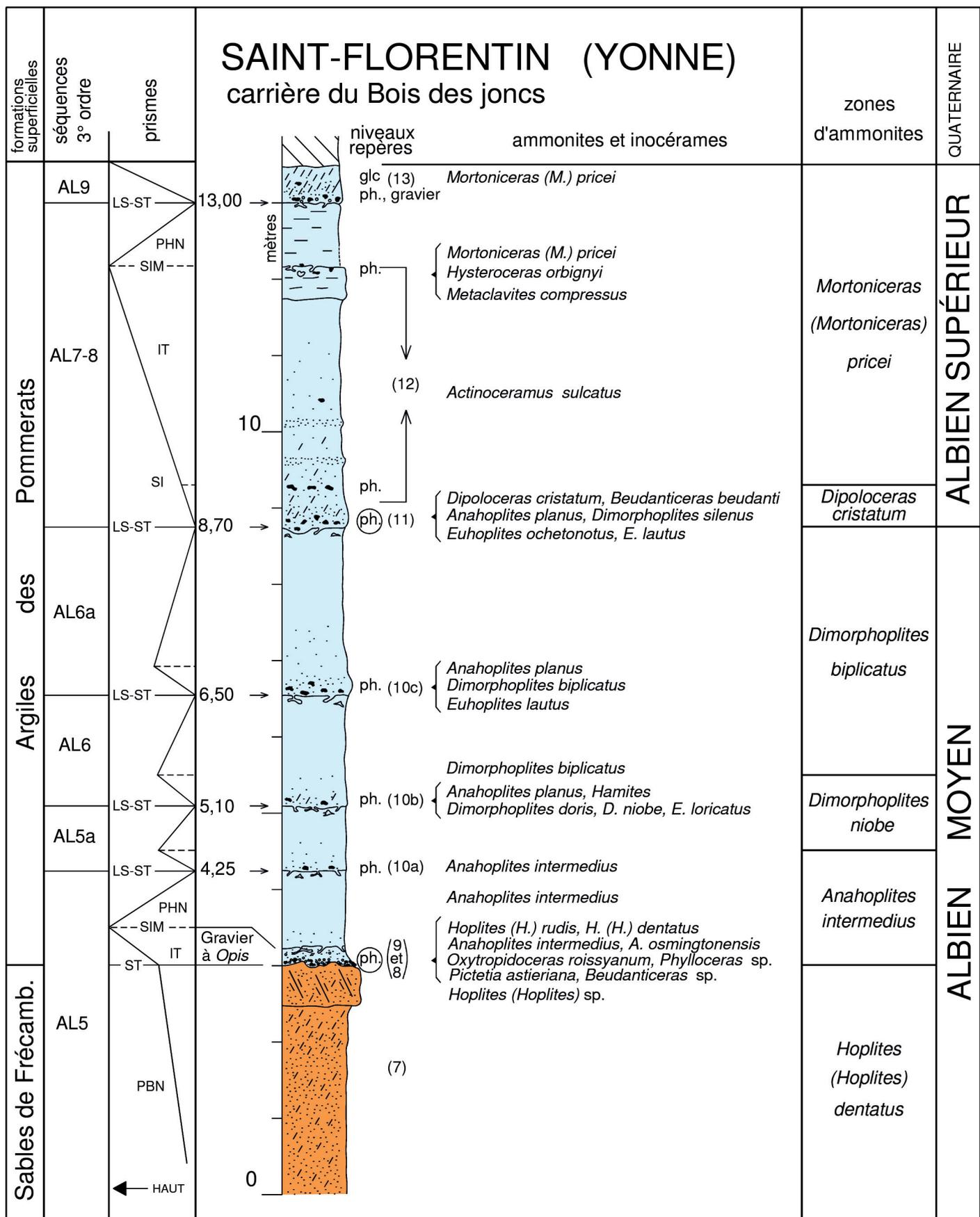


Fig. 2. — Les Argiles des Pommerats à Saint-Florentin, Yonne : lithologie, niveaux repères, zones d'ammonites et séquences.
Fig. 2. — The Argiles des Pommerats Formation at Saint-Florentin, Yonne: lithology, marker beds, ammonite zones and sequences.

partie supérieure des Argiles des Pommerats, à *Mortonicerus pricei*, débute quant à elle à 9,00 m. L'index de zone n'a pas été collecté dès la base de l'intervalle mais un marqueur secondaire peut être utilisé : la prolifération de l'inocérame *Actinoceramus sulcatus*.

Les séquences eustatiques de 3^e ordre

Une première interprétation séquentielle des successions albiennes du Bassin anglo-parisien a été publiée par Amédro (1992). Celle-ci a été ensuite affinée à deux reprises par Amédro (2009) et Amédro & Matrion (2014). Actuellement, onze cycles de 3^e ordre sont reconnus sur la courbe eustatique de l'Albien, fondés sur des observations réalisées dans le Kent au sud-est de l'Angleterre, la Normandie, le Boulonnais, l'Artois, le Bassin de Mons en Belgique, le Perthois, l'Aube et l'Yonne. Il n'est pas question de redéfinir ici l'ensemble des séquences, le lecteur intéressé étant convié à se reporter aux articles cités, en particulier aux deux derniers. Les forages réalisés par l'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) dans le nord du département de l'Aube, près de Brienne-le-Château, ont récemment permis de situer les limites de séquences et les prismes sédimentaires dans la suite lithologique des Argiles téglines de Courcelles et des Marnes de Brienne, et ceci dans un enregistrement sédimentaire argileux très épais qui atteint 125 m (Amédro *et al.*, 2019). La figure 2 montre qu'au sein des Argiles des Pommerats de l'Yonne, toutes les séquences sont également parfaitement enregistrées et les prismes sédimentaires bien reconnaissables malgré leur épaisseur réduite. Du bas vers le haut, la succession des séquences eustatiques de 3^e ordre identifiées dans la carrière du Bois des joncs à Saint-Florentin apparaît comme suit.

a) *Séquence AL 5*. La limite de séquence (LS) coïncide avec la base des Sables de Frécambault. La formation, épaisse d'une trentaine de mètres à Saint-Florentin, débute par une dizaine de mètres de sables grossiers, glauconieux, localement cimentés en grès et riches en petites huîtres (Hébert, 1863). La succession se poursuit par une vingtaine de mètres de sables grossiers jaunâtres, faiblement glauconieux, incluant des graviers de quartz et présentant de fréquentes stratifications obliques. Ces sables sont entrecoupés dans leur moitié inférieure par quelques passées sablo-argileuses métriques et dans leur moitié supérieure par des bancs discontinus de grès cohérents de 0,30 m à 0,50 m d'épaisseur (Barrois, 1874; Houdard, 1932; Owen, 1971). La macrofaune en général et les ammonites en particulier sont très rares au sein des Sables de Frécambault, celles-ci étant limitées à quelques *Hoplites* mal préservés. Amédro (2009) a interprété les Sables de Frécambault comme représentant en partie l'intervalle transgressif (IT) de la séquence AL 5 en se fondant sur la présence de glauconie. Mais la nature grossière des sédiments et la rareté des ammonites suggèrent plutôt que ce corps

sédimentaire correspond à un prisme de bas niveau (PBN). L'intervalle transgressif de la séquence AL 5 est réduit au Gravier à *Opis*, épais de 0,15 m, dans lequel on observe, chez les ammonites, une diversification de la faune d'Hoplitinae avec apparition de nouvelles espèces limitées géographiquement à la Province nord-européenne du Domaine boréal : *Hoplites (H.) rudis*, *H. (H.) canavarii*, *Anahoplites osmingtonensis*, *A. planus*, *A. intermedius*, *Euhoplites loricatus* et l'arrivée de 5 % de formes cosmopolites et téthysiennes : *Pictetia*, *Phylloceras*, *Puzosia*, *Beudanticeras*, *Oxytropidoceras* et *Pseudhelicoceras*. Il s'agit de l'*Oxytropidoceras* event d'Amédro (2009). À Saint-Florentin, la surface de transgression (ST) de la séquence AL 5 coïncide avec la limite inférieure du Gravier à *Opis*, tandis que la surface d'inondation maximale (SIM) est représentée par la limite supérieure du même niveau. Au-dessus, les 1,10 m d'argile noire constituant la base des Argiles des Pommerats, datés par les ammonites de la zone à *A. intermedius*, pourraient représenter le prisme de haut niveau (PHN) de la séquence.

b) *Séquence AL 5a*. La surface d'omission présente à 4,25 m et le lit de nodules phosphatés qui la surmonte correspondent à la fois à la limite de séquence et à la surface de transgression. Les 0,15 m d'argile très silteuse situés au-dessus représentent l'intervalle transgressif, une interprétation confirmée par l'augmentation de la teneur en illite et surtout en kaolinite au-dessus du lit de nodules phosphatés (observée également au-dessus des autres surfaces de transgression ; cf. l'analyse des minéraux argileux présentée dans le chapitre suivant). Le prisme de haut niveau correspond aux 0,70 m d'argile qui suivent.

c) *Séquence AL 6*. La séquence AL 6 répète ce qui vient d'être décrit pour la séquence précédente. La base de la séquence est située à 5,10 m. La surface d'inondation maximale qui sépare les deux prismes sédimentaires est quant à elle placée vers le niveau 5,30 m où la teneur en silt, déduite des descriptions lithologiques, diminue brutalement, à la limite entre les zones d'ammonites à *Dimorphoplites niobe* et à *Dimorphoplites biplicatus*.

d) *Séquence AL 6a*. On retrouve de nouveau le schéma présenté pour les séquences AL 5a et AL 6 avec une limite de séquence et surface de transgression située à 6,50 m. Les 0,20 m de sable argileux qui surmontent la surface d'omission sont toutefois plus grossiers que dans les deux séquences précédentes, plus cohérents, finement glauconieux, avec une densité plus élevée en nodules phosphatés et contiennent une abondante macrofaune d'ammonites, inocérames et petites huîtres. L'intervalle transgressif est ici très bien exprimé. La surface d'inondation maximale est interprétée au niveau où le sable et la glauconie disparaissent, à 6,70 m.

e) *Séquence AL 7-8*. C'est ici, dans la carrière du Bois des Joncs, que se trouve la coupe la plus démonstrative de tout le Bassin de Paris en ce qui concerne la reconnaissance des prismes sédimentaires de la séquence AL 7-8. L'intervalle transgressif débute par une surface de ravinement située à 8,70 m, surmontée d'un lit de nodules phosphatés qui coïncide avec le « *Dipoloceras event* » d'Amédéo (2009). Il s'agit à la fois de la limite de séquence et de la première surface d'inondation, c'est-à-dire de la surface de transgression. Le prisme sédimentaire lui-même, épais de 3,40 m, est parsemé sur toute sa hauteur de nombreuses empreintes d'inocérames appartenant à l'espèce *Actinoceramus sulcatus*. À 0,50 m au-dessus de la base du prisme sédimentaire, c'est-à-dire au niveau 9,20 m, une ligne de nodules phosphatés noirs, arrondis, de 3 à 5 cm, dont certains sont des moules internes de bivalves (*A. sulcatus* et *Nucula pectinata*) représente une seconde surface d'inondation. Au point de vue lithologique, l'intervalle transgressif de la séquence AL 7-8 est constitué à la base par un sable argilo-glaucieux contenant des nodules phosphatés, puis par une argile silteuse légèrement glauconieuse, avec une teneur en glauconie qui diminue progressivement vers le haut, et enfin par une argile marneuse. Les 0,40 m supérieurs sont consolidés, mais non durcis, riches en moules internes d'*A. sulcatus*, de rhynchonelles à côtes fines et d'ammonites (*Metaclavites compressus*, *Mortoniceras pricei* et *Hysterocheras orbignyi*). Quelques nodules phosphatés centimétriques beiges sont présents à la limite supérieure du banc qui est soulignée par une surface d'omission et coïncide avec le niveau de disparition de l'inocérame *A. sulcatus*. Il s'agit de la surface d'inondation maximale, située à 12,10 m. Les 0,90 m supérieurs, constitués d'argile marneuse et caractérisés par une moins grande diversité de la macrofaune, sont interprétés comme représentant le prisme de haut niveau.

f) *Séquence AL 9*. Seule la partie inférieure de l'intervalle transgressif de la séquence AL 9 est recoupée dans la carrière du Bois des Joncs. La surface de ravinement présente à 13,00 m correspond à la fois à la limite de séquence et à la surface de transgression. L'argile sableuse présente immédiatement au-dessus, recoupée sur 0,50 m d'épaisseur, très glauconieuse, verdâtre, débutant à la base par un gravier riche en grains de quartz de 2 à 5 mm et en nodules phosphatés beiges dont l'un a fourni un moule interne de *Mortoniceras (M.) pricei*, représente l'intervalle transgressif. Dans l'Aube, la surface d'inondation maximale de la séquence AL 9 est placée au sommet du *hardground* l'Étape qui définit également la limite entre les Argiles tégulines de Courcelles et les Marnes de Brienne (Amédéo *et al.*, 1995). Dans l'Yonne, la succession lithologique est probablement assez comparable à celle de

l'Aube, mais la limite entre les Argiles des Pommerats et les Marnes de Brienne n'a pas été atteinte sur le front de taille.

La minéralogie des argiles

Methodologie

La composition de la fraction argileuse des Argiles des Pommerats est étudiée par diffraction des rayons X à partir des 36 échantillons prélevés sur toute la hauteur de la formation dans la carrière du Bois des joncs à Saint-Florentin entre le niveau 3,25 m, situé dans la zone d'ammonites à *Anahoplites intermedius*, juste au-dessus du Gravier à *Opis* et le niveau 11,25 m localisé dans la partie moyenne de la zone à *Mortoniceras pricei*.

Après un broyage léger au mortier, les échantillons sont délités dans l'eau distillée puis décarbonatés à l'aide d'acide chlorhydrique 0,2 N. Le résidu insoluble est ensuite centrifugé afin d'éliminer l'excès d'acide puis rincé plusieurs fois à l'eau distillée jusqu'à défloculation des minéraux argileux qui sont alors en suspension. Celle-ci est agitée fortement pendant une minute puis mise à décanter durant 1h35 minutes. Les deux centimètres supérieurs de la suspension sont alors prélevés avec une seringue puis centrifugés afin d'obtenir un culot constitué par la fraction argileuse (particules de taille inférieure à 2 µm). Ce culot est ensuite étalé sur une lame de verre rainurée, elle-même passée au diffractomètre à rayons X, d'abord sans traitement, puis après saturation par l'éthylène-glycol puis après chauffage à 490°C pendant 2 heures. Le détail de ce protocole analytique est donné par Holtzapffel (1985a).

Résultats

Les proportions relatives des différents minéraux argileux identifiés dans les Argiles des Pommerats à Saint-Florentin sont présentées dans la figure 3. Les assemblages argileux de l'Albien moyen et supérieur sont majoritairement constitués d'illite (17 à 35 %), d'interstratifiés illite-smectite irréguliers de type Ro que nous appellerons smectite pour simplifier (13 à 70 %) et de kaolinite (13 à 44 %). Dans la partie inférieure des Argiles des Pommerats, on trouve également des traces de chlorite (dans l'intervalle 3,25 m - 7,20 m) ainsi que de la vermiculite (entre 3,25 m et 4,40 m) dont les proportions peuvent atteindre 12 % environ. À ces minéraux argileux, s'ajoutent de faibles quantités de quartz et occasionnellement de goëthite notamment à la base de la coupe. L'évolution des assemblages argileux permet de distinguer quatre intervalles.

À la base de la coupe, dans le premier intervalle (3,25 m - 4,40 m) qui couvre la plus grande partie de la zone à *Anahoplites intermedius*, l'illite et la kaolinite sont abondantes et associées à des traces de chlorite et à de la vermiculite. Dans le second intervalle (4,60 m - 7,00 m) englobant la zone à *Dimorphoplites niobe* et la moitié inférieure de la zone suivante à *Dimorphoplites biplicatus*, les proportions d'illite et de kaolinite diminuent tandis que les proportions de smectite

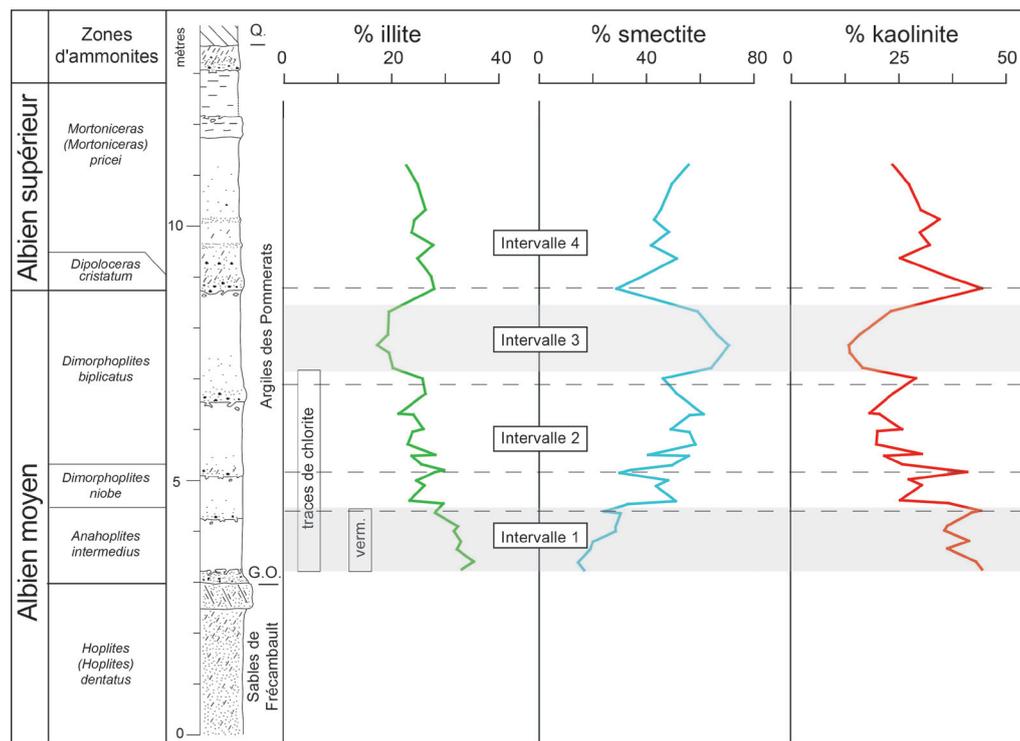


Fig. 3. – Minéralogie des Argiles des Pommerats dans la coupe de la carrière du Bois des Jons à Saint-Florentin (Yonne). G.O.: Gravier à Opis; Q.: Quaternaire; verm.: vermiculite. Les traits en pointillés matérialisent la correspondance entre les surfaces d’omission (limites de séquences) et les fortes proportions d’illite et de kaolinite. Fig. 3. – Clay mineralogy of the « Argiles des Pommerats Formation » outcropping in the Bois des Jons quarry at Saint-Florentin (Yonne). G.O.: Gravier à Opis; Q.: Quaternary; verm.: vermiculite. Dashed lines indicate the correspondence between omission surfaces (sequence boundaries) and the increasing proportions of illite and kaolinite.

augmentent progressivement. On note encore la présence de traces de chlorite, mais la vermiculite est désormais absente. Le troisième intervalle (entre 7,20 m et 8,30 m), correspondant au sommet de la zone à *D. biplicatus*, se caractérise par de très fortes proportions de smectite aux dépens des proportions d’illite et de kaolinite. On note également l’absence de chlorite dans cet intervalle. Enfin, dans le quatrième intervalle (8,75 m à 11,25 m qui correspond au dernier prélèvement), l’assemblage minéralogique s’apparente à celui qui a été identifié dans le deuxième intervalle.

Les proportions relatives en smectite et en kaolinite fluctuent fortement et de manière antagoniste le long de la coupe. La kaolinite est particulièrement abondante (plus de 40 %) par rapport à la smectite (environ 20 %) dans la zone à *Anahoplites intermedius*. Plus haut dans la succession sédimentaire, les proportions de kaolinite diminuent (autour de 25 %) par rapport à celles de smectite qui atteignent 60 à 70 %, mais on note toutefois un accroissement des proportions de kaolinite au niveau ou immédiatement au-dessus des surfaces d’omission bioturbées, plus silteuses et présentant des graviers phosphatés.

Les assemblages argileux : un indicateur des changements climatiques et des variations du niveau marin

La composition minéralogique des argiles albiennes de la coupe de Saint-Florentin est conforme à ce qui est connu

ailleurs dans le Bassin anglo-parisien. Dans le Boulonnais, les argiles à faciès Gault de la Formation de Saint-Pô présentent une fraction argileuse majoritairement constituée d’illite, de kaolinite et de smectite (Holtzapffel, 1985b) de même que dans la coupe de l’île de Wight (Gale et al., 1996). À la base des argiles des Pommerats (dans la zone à *Anahoplites intermedius*), les assemblages minéralogiques riches en illite et kaolinite, associées à de la chlorite et à de la vermiculite, présentent un caractère détritique très marqué indiquant l’érosion active des bordures continentales tandis que plus haut dans la succession sédimentaire, l’accroissement relatif en smectite traduit une érosion plus superficielle des masses continentales. Cette tendance reflète vraisemblablement le caractère transgressif à long terme des dépôts albiens. L’accroissement progressif des proportions de smectite est particulièrement net au sein des zones à *Dimorphoplites niobe* et à *D. biplicatus* (intervalles 2 et 3). Cette observation, cohérente avec celles qui ont été réalisées dans les forages Andra de l’Aube (Corentin et al., 2020), pourrait traduire l’installation d’un climat semi-aride à la fin de l’Albien moyen. Ce type de climat plus sec contrarie en effet le remaniement des illites provenant du substratum des massifs varisques bordant le Bassin anglo-parisien et ne permet pas la formation de proportions importantes de kaolinite dans les sols. Dans ces conditions une sédimentation argileuse davantage dominée par la smectite se met en place.

Dans le détail, il est intéressant de noter que les proportions plus importantes de kaolinite (et d'illite dans une moindre mesure) coïncident avec les surfaces remarquables interprétées comme étant des limites de séquences de troisième ordre amalgamées avec des surfaces de transgression. Cette correspondance résulte vraisemblablement du fait que les baisses du niveau marin provoquent une reprise de l'érosion sur les bordures continentales apportant ainsi davantage d'illite et de kaolinite. Par ailleurs, ces deux minéraux sédimentent préférentiellement près des côtes par rapport à la smectite davantage exportée vers le large. Il faut toutefois noter que l'accroissement des proportions d'illite est vraisemblablement en partie imputable à la présence de glauconie (illite ferrifère). Le contrôle eustatique (cycles de 3^e ordre) de la sédimentation argileuse est ici évident. Il s'exprime très nettement au passage Albien moyen/Albien supérieur où l'influence de l'installation d'un climat plus humide se superposant aux influences eustatiques est toutefois probable (Corentin *et al.*, 2020).

En définitive, l'analyse à haute-résolution de la minéralogie des argiles de la coupe de Saint Florentin révèle un contrôle climato-eustatique. La tendance transgressive à long terme (cycles eustatiques de 1^{er} et 2^e ordre) qui caractérise l'Albien s'exprime par un relais des illites et kaolinites abondantes à la base de la coupe par les smectites. À l'échelle du troisième ordre, la coïncidence entre les surfaces d'omission matérialisant des limites de séquences amalgamées avec des surfaces de transgression et l'accroissement des proportions d'illite et de kaolinite suggérant une reprise d'érosion indiquent un contrôle eustatique évident de la sédimentation argileuse. À l'influence des variations du niveau marin se superposent des changements climatiques de grande ampleur avec notamment l'installation d'une période plus aride à la fin de l'Albien moyen.

LES ARGILES DES POMMERATS : UNE SUCCESSION SÉDIMENTAIRE CONDENSÉE

La carrière du Bois des Joncs à Saint-Florentin recoupe les Argiles des Pommerats sur 10,50 m de hauteur. Si l'on considère que les deux derniers décimètres du niveau repère (13) ne sont pas atteints dans l'affleurement, l'épaisseur totale de la formation peut raisonnablement être estimée à 10,70 m. Cinq cycles eustatiques de 3^e ordre sont enregistrés au sein des argiles albiennes à faciès Gault à Saint-Florentin : les séquences AL 5, AL 5a, AL 6, AL 6a et AL 7-8. Cinq zones d'ammonites y sont également identifiées : dans l'Albien moyen, les zones successives à *Anahoplites intermedius*, à *Dimorphoplites niobe* et à *Dimorphoplites biplicatus*, dans l'Albien supérieur, les zones à *Dipoloceras cristatum* et à *Mortoniceras pricei*. Selon les datations les plus récentes publiées par la Commission stratigraphique internationale

[ICS, 2020], la durée de l'étage Albien a été estimée à 12,5 mA, avec une incertitude d'environ +/- 0,3 mA. D'un autre côté, 21 zones d'ammonites sont actuellement reconnues dans l'Albien d'Europe occidentale. Ces données et la connaissance de l'épaisseur des Argiles des Pommerats à Saint-Florentin permettent d'estimer le taux moyen de sédimentation lors de la mise en place de l'unité lithologique à 0,3 cm/ka, ce qui correspond à un dépôt de vase d'environ 1 cm/ka avant compaction et diagenèse en admettant une porosité initiale du sédiment argileux de 70 % et une réduction totale de la porosité après enfouissement (Cojan & Renard 2013).

Qu'en est-il dans la vallée de l'Aube, à 75 km au nord-est de Saint-Florentin, et plus exactement à Vallentigny près de Brienne-le-Château ? La figure 4 présente une comparaison des successions lithologiques recoupant le même intervalle dans l'Yonne et dans l'Aube. Son examen montre la continuité de tous les niveaux repères événementiels à caractère lithologique ou bio-écologique entre les deux régions. Il en est de même pour les prismes sédimentaires des séquences de 3^e ordre. En revanche, l'enregistrement sédimentaire diffère sensiblement, non dans la nature des dépôts, mais en ce qui concerne les épaisseurs. L'intervalle compris entre les niveaux repères (8) à (13) mesure en effet 38,91 m à Vallentigny. Le taux de sédimentation atteint ici 1,2 cm/ka, soit environ 4 cm/ka de vase avant compaction.

En allant du nord-est vers le sud-ouest, on passe pour le même intervalle de près de 39 mètres d'enregistrement sédimentaire dans l'Aube à moins de 11 mètres dans l'Yonne, soit une réduction d'épaisseur de 72 % entre les deux régions. Suivant la terminologie en usage actuellement en stratigraphie, et plus particulièrement en sédimentologie, les Argiles des Pommerats sont une formation condensée.

Le remplissage des bassins sédimentaires dépend des variations eustatiques du niveau marin, des apports sédimentaires et de la subsidence. Dans le cas présent, les variations eustatiques sont identiques dans l'Aube et dans l'Yonne, les apports sédimentaires *a priori* assez comparables. Reste la subsidence. Mais un autre paramètre est également à prendre en compte lorsque l'on interprète une coupe : sa localisation géographique au sein du bassin. L'enregistrement sédimentaire diffère en effet selon que l'on se trouve en position centrale ou plus marginale sur la bordure du bassin.

Durant une grande partie de l'Albien inférieur et la première moitié de l'Albien moyen, la partie méridionale du Bassin de Paris proche du Massif central, qui correspond à une aire allant du Cher à la Nièvre et à l'Yonne et inclut de ce fait les environs de Saint-Florentin, est le siège d'importants dépôts sableux mis en place sous une faible tranche d'eau dans un environnement de *shoreface* (quelques mètres à une ou deux dizaines de mètres) comme le montre la présence fréquente de couches à litage oblique au sein des Sables de la Puisaye et des Sables de Frécambault. Les analyses morphoscopiques réalisées sur ces sables montrent que les grains

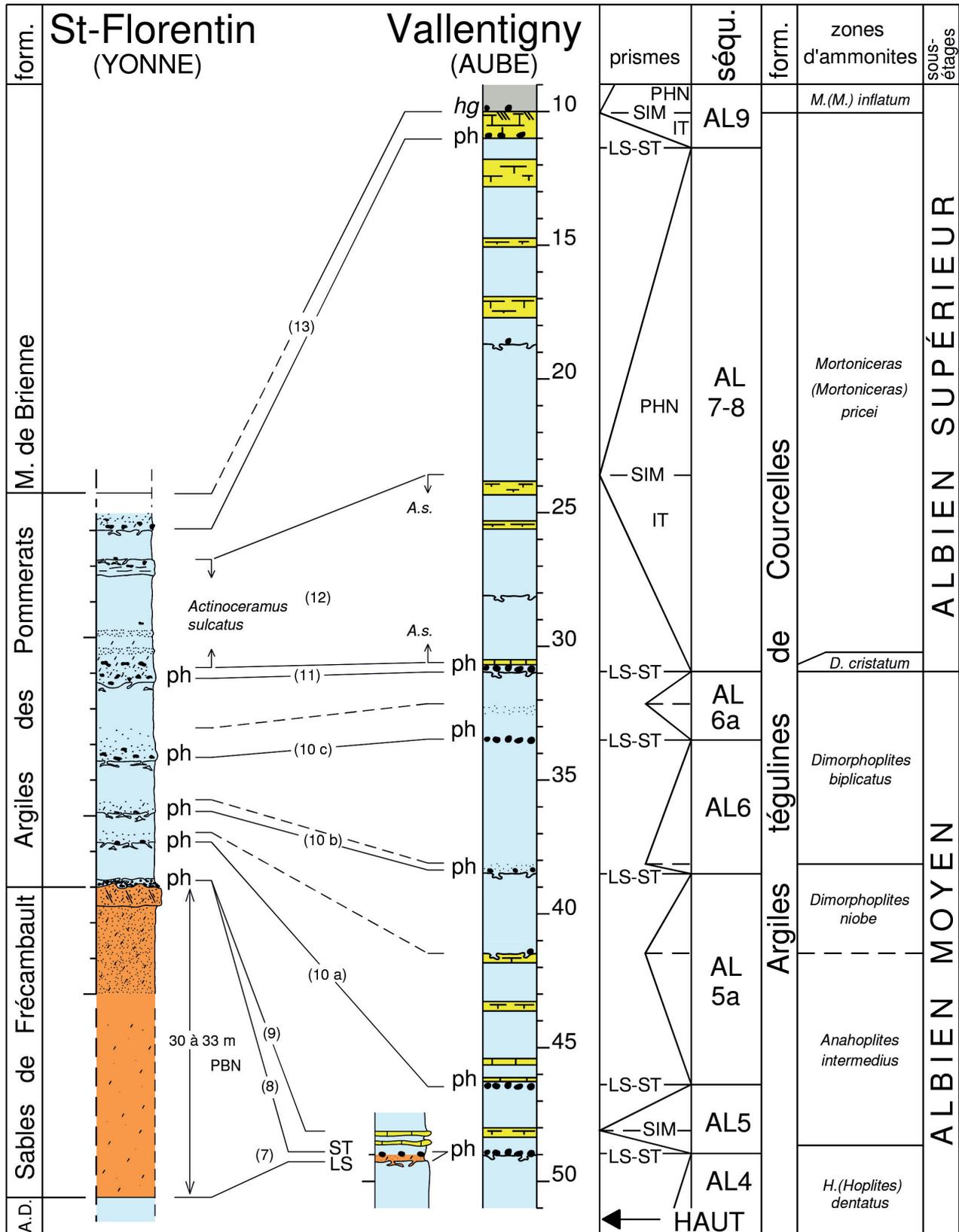


Fig. 4. — Comparaison au sein des argiles albiennes à faciès Gault du sud-est du Bassin de Paris entre les Argiles des Pommerats à Saint-Florentin (Yonne) et la moitié supérieure des Argiles téguilines de Courcelles à Vallentigny (Aube). Les deux coupes ne sont pas présentées à la même échelle en raison du caractère condensé de l'enregistrement sédimentaire à Saint-Florentin. A.D. : Argiles des Drillons. Fig. 4. — Comparison across the Albian Gault clays between the « Argiles des Pommerats Formation » from Saint-Florentin (Yonne) and the upper half of the « Argiles téguilines de Courcelles Formation » from Vallentigny (Aube). Because the sedimentary succession is condensed at Saint-Florentin, the sections are not drawn at the same scale. A.D.: Argiles des Drillons

sont très émousés et les minéraux très altérés. Il s'agit de sédiments très matures qui ont été soumis à un transport et une agitation importants, ce que confirme leur bon classement déduit des analyses granulométriques (Courel *et al.*, 1972). Ces sables ne proviendraient pas de l'érosion du Massif central voisin, mais seraient des reprises de sables déposés antérieurement pendant le Crétacé inférieur (sables néocomiens, sables barrémiens à faciès wealdiens, sables gargasiens) (Courel *et al.*, 1972). Ces remaniements pourraient résulter, selon nous, des déformations tectoniques ayant affecté le Bassin de Paris durant l'Aptien supérieur, avec en particulier une exhumation et un décapage des bordures nord-est et sud-ouest du bassin comme en témoignent les discordances angulaires mises en évidence par Guillocheau *et al.* (1999). Pendant le même intervalle de temps, l'aire située au nord-est de Saint-Florentin, incluant le département de l'Aube, est caractérisée par la sédimentation d'argiles à faciès Gault sous une tranche d'eau plus importante, comprise entre 40 et 60 m (Gale & Owen, 2010), dans un milieu d'*offshore* supérieur dans la mesure où une quinzaine de dépôts de tempêtes sont enregistrés (Amédro *et al.*, 2017, 2019).

Comment expliquer maintenant le caractère condensé des Argiles des Pommerats déposées durant la seconde moitié de l'Albien moyen et à la base de l'Albien supérieur ? La réduction d'épaisseur des argiles albiennes à faciès Gault n'est pas un phénomène local, limité à Saint-Florentin, mais concerne toute l'aire équivalente au département de l'Yonne, soit plusieurs centaines de km². L'absence de dépôts de tempêtes au sein de la formation suggère une sédimentation sous une tranche d'eau supérieure à celle décrite précédemment, dépassant probablement 60 m à 80 m, dans un environnement d'*offshore* inférieur. Il en est de même dans l'Aube voisine où continuent à s'accumuler les Argiles tégulines de Courcelles qui ne contiennent également plus de tempestites dans leur moitié supérieure (à partir de la zone à *Dimorpholites niobe* et au-dessus). Mais une différence importante existe entre les deux régions : l'épaisseur des sédiments accumulés précédemment durant l'Albien inférieur et la base de l'Albien moyen, soit une cinquantaine de mètres dans l'Aube et plus du double dans l'Yonne (les Argiles de l'Armanche surmontées de l'épaisse Formation des Sables de la Puisaye). Tout en se déposant sous une tranche d'eau importante, les Argiles des Pommerats ont pu s'accumuler sur une zone haute située sur la marge méridionale du Bassin de Paris, à l'aplomb du prisme sédimentaire constitué par les Sables de la Puisaye et ses prolongements.

CONCLUSION

L'étude détaillée des argiles albiennes à faciès Gault de Saint-Florentin dans l'Yonne, nommées régionalement Argiles des Pommerats, permet d'identifier cinq séquences eustatiques de 3^e ordre au sein de la formation qui est corrélée

à la partie supérieure des Argiles tégulines de Courcelles dans l'Aube. La comparaison des successions de l'Aube et de l'Yonne, distantes de 75 km, révèle le caractère condensé des Argiles des Pommerats. Le dépôt de la formation s'est probablement réalisé dans un environnement d'*offshore* inférieur, sous une tranche d'eau dépassant 60 à 80 m, mais sur une zone haute située sur la marge méridionale du Bassin de Paris à l'aplomb du prisme sédimentaire constitué par les Sables de la Puisaye. L'analyse des minéraux argileux démontre par ailleurs un contrôle climato-eustatique de la sédimentation. À l'influence des variations du niveau marin se superposent des changements climatiques de grande ampleur avec notamment l'installation d'une période plus aride à la fin de l'Albien moyen.

Remerciements

MM. Claude Fricot (51260 Esclavolles-Lurey), Rodolphe Touch (10440 La Rivière de Corps) et Antoine Pictet (Lausanne, CH) nous ont accompagnés dans la carrière du Bois des Joncs à Saint-Florentin. M. Christian Prins (10160 Rigny-le-Ferron) nous a communiqué de précieuses informations sur le contenu macrofaunistique du Gravier à *Opis*. Qu'ils en soient tous chaleureusement remerciés. Nous remercions également MM. Francis Robaszynski et Alain Trentesaux pour leurs remarques constructives sur le manuscrit initial.

BIBLIOGRAPHIE

- AMÉDRO F. (1981). – Actualisation des zonations d'ammonites dans le Crétacé moyen du Bassin anglo-parisien. Essai d'une zonation phylétique de l'Albien au Turonien. *Cretaceous Research*, **2** : 261-269.
- AMÉDRO F. (1992). – L'Albien du bassin anglo-parisien : ammonites, zonation phylétique, séquences. *Bulletin des Centres de Recherche-Exploration-Production d'Elf-Aquitaine*, **16** (1) : 187-233.
- AMÉDRO F. (2009). – Stratigraphie séquentielle des successions albiennes du bassin anglo-parisien et du bassin de Mons (B.). *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, **46** (2) : 12-36.
- AMÉDRO F., DECONINCK J.-F. & MATRION B. (2019). – L'Albien type de l'Aube (France) : première description litho-biostratigraphique de la totalité des Argiles tégulines de Courcelles. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, **56** (2) : 7-22.
- AMÉDRO F., MAGNIEZ-JANNIN F., COLLETÉ C. & FRICOT C. (1995). – L'Albien-type de l'Aube, France : une révision nécessaire. *Géologie de la France*, **2** : 25-42, pl. 1-3.
- AMÉDRO F. & MATRION B. (2008). – Corrélations dans l'Albien de l'Yonne et de l'Aube (lithologie et ammonites). *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, **45** (2) : 12-24.

- AMÉDRO F. & MATRION B. (2014). – L'étage Albien dans sa région-type, l'Aube (France) : une synthèse dans un contexte sédimentaire global. *Carnets de Géologie*, **14** (5) : 69-128 ; World Wide Web address: <http://paleopolis.rediris.es/cg/1405/index.html>
- AMÉDRO F., MATRION B., DECONINCK J.-F., HURET E. & LANDREIN P. (2017). – Les forages de Juzanvigny (Aube, France) : litho- biostratigraphie des formations du Barrémien à l'Albien moyen dans l'est du bassin de Paris et datations par les ammonites. *Geodiversitas*, **39** : 185-212.
- AMÉDRO F., MATRION B. & TOUCH R. (2000). – La zone d'ammonite à *Protohoplites* (*Hemisonneratia*) *puzosianus* et sa position dans la zonation réactualisée de l'Albien inférieur du Bassin anglo-parisien. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, **4** : 3-12, pl. 1.
- BARROIS C. (1874). – Sur le Gault et sur les couches entre lesquelles il est compris dans le Bassin de Paris. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **II** : 1-61.
- BROMLEY R.G. (1990). – Trace Fossils: biology and taphonomy. *Cambridge University Press*, 280 p.
- COJAN I. & RENARD M., 2013. *Sédimentologie*, 3^e édition. Dunod, 480 p.
- CORENTIN P., DECONINCK J.-F., PELLENARD P., AMÉDRO F., BRUNEAU L., CHENOT É., MATRION B., HURET É. & LANDREIN P. (2020). – Environmental and climatic controls of the clay mineralogy of Albien sediments in the Paris and Vocontian basins (France). *Cretaceous Research*, **108**: 18 p. [Online 10/12/2019] ; DOI:10.1016/j.cretres.2019.104342
- COUREL L., FEUILLÉE P., RAT P., SEDDOH F. & TRECARTES J. (1972). – Les sables albiens dans le sud-est du Bassin parisien. Analyse sédimentologique. Essai paléogéographique. *Revue de Géographie physique et Géologie dynamique*, **2** (14) : 171-188.
- ÉBRAY Th. (1864). – Stratigraphie de l'étage Albien dans les départements de l'Yonne, de l'Aube, de la Haute-Marne, de la Meuse et des Ardennes. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 2^e série, **20** : 209-220.
- GALE A.S., HUGGETT J.M. & GILL M. (1996). – The stratigraphy and petrography of the Gault Clay Formation (Albian, Cretaceous) at Redcliff, Isle of Wight. *Proceedings of the Geologists' Association*, **107** : 287-298.
- GALE A.S. et OWEN H.G. (2010). – Introduction to the Gault. In YOUNG J.R., GALE A.S., KNIGHT R.I. & SMITH A.B. édit. – Fossils of the Gault Clay. *Palaeontological Association, Field Guide to Fossils*, London, **12** : 342 p., 57 pls.
- GUILLOCHEAU F., ROBIN C., ALLEMAND P., BOURQUIN S., BRAULT N., DROMART G., FRIEDENBERG R., GARCIA J.-P., GAULIER J.-M., GAUMET F., GROSDOY B., HANOT F., LE STRAT P., METTRAUT M., NALPAS T., PIJAC C., RIGOLLET C., SERRANO O. & GRANDJEAN G. (1999) – Évolution géodynamique du Bassin de Paris : apports d'une base de données 3D. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, **36** : 3-35.
- HÉBERT E. (1863). – Observations géologiques sur quelques points du département de l'Yonne. *Bulletin de la Société des Sciences et d'Histoire Naturelle de l'Yonne*, **18** : 40-56.
- HOLTZAPFFEL T. (1985 a). – Les minéraux argileux : préparation, analyse diffractométrique et détermination. *Société Géologique du Nord, Publication*, **12** : 136 p.
- HOLTZAPFFEL T. (1985 b). – Smectites authigènes et glauconitisation dans les Argiles du Gault (Albien du Boulonnais). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **CIV** : 33-39.
- HOUDARD J. (1932). – Notes sur l'étage Albien aux environs de Saint-Florentin. *Bulletin de la Société des Sciences et d'Histoire Naturelle de l'Yonne*, **86** : 45-56.
- ICS (International Commission of Stratigraphy) (2020). – International chronostratigraphic chart (v2020/01). World Wide Web address: <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.jpg> [consulté le 2/04/2020]
- KENNEDY W.J. et LATIL J.-L. (2007). – The Upper Albien succession in the Montloux section, Hautes-Alpes, France. *Acta Geologica Polonica*, **57** : 453-478.
- LAMBERT J. (1894). – Études comparatives sur la répartition des échinides crétacés dans l'Yonne et dans l'est du Bassin de Paris. *Bulletin de la Société des Sciences et d'Histoire Naturelle de l'Yonne*, **48** : 3-84, pl. 1-2.
- LAUVERJAT J. (1967). – Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de l'Albien dans le centre du bassin de Paris. Thèse, Faculté des Sciences de Paris, Rapport Bureau de Recherches Géologiques et Minières, DSGR, **67.A15** : 211 p., 28 pl.
- LAUVERJAT J. (1969). – L'Albien de l'Aube et de l'Yonne : corrélations stratigraphiques. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **269**, D : 1942-1945.
- MÉGNIEU C. (1964). – Observations hydrogéologiques sur le Sud-Est du bassin de Paris. Les circulations aquifères dans le Jurassique et le Crétacé de l'Yonne. *Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, **25** : 287 p.
- OWEN H.G. (1971). – Middle Albien Stratigraphy in the Anglo-Paris Basin. *Bulletin of the British Museum Natural History (Geology)*, **8** : 164 p., 3 pl.
- RAT P, MAGNIEZ-JANNIN F., CHATEAUNEUF J.-J., DAMOTTE R., DESTOMBES P., FAUCONNIER D., FEUILLÉE P., MANIVIT H., MONGIN D. & ODIN G.S. (1979). – L'Albien de l'Aube. In: *Les stratotypes français*, C.N.R.S. édition, Paris, **5** : 446 p., 51 pl.

RÉSUMÉ TOUT PUBLIC

LITHOLOGIE ET MINÉRALOGIE DES ARGILES ALBIENNES DE SAINT-FLORENTIN (YONNE)...

Au sud-est du Bassin de Paris, les argiles albiennes (environ -110 millions d'années), nommées « Argiles des Pommerats » dans l'Yonne, affleurent à 1 km à l'ouest de Saint-Florentin dans la carrière du Bois des Joncs. Le front de taille expose le sommet des Sables de Frécambault (vus sur 3 m) et, au-dessus, la quasi-totalité des Argiles des Pommerats (recoupées sur 10,50 m de hauteur, seuls les deux ou trois derniers décimètres de la formation n'étant pas atteints dans l'affleurement). Les Argiles des Pommerats sont des argiles silteuses noires contenant de nombreuses empreintes de bivalves (inocérames) et des ammonites appartenant essentiellement à une famille, les Hoplitinae, caractéristique de la Province nord-européenne du Domaine boréal. Les récoltes d'ammonites montrent que les Argiles des Pommerats couvrent l'intervalle stratigraphique compris entre le sommet de l'Albien moyen et la base de l'Albien supérieur. Six lits de nodules phosphatés bien exprimés sont présents au sein de la succession argileuse. Chacun de ces niveaux est interprété comme une surface de transgression d'une séquence eustatique de 3^e ordre, et souvent aussi comme une limite de séquence. Une comparaison est effectuée avec les séries équivalentes du département de l'Aube, distantes de 75 km. Si la succession des événements lithologiques (lits de nodules phosphatés) et biologiques (apparition ou disparition d'espèces) est la même, en revanche l'enregistrement sédimentaire est bien différent (38,91 m dans l'Aube ; 10,70 m dans l'Yonne) et révèle le caractère condensé des Argiles des Pommerats. La fraction argileuse (particules de taille inférieure à 2 micromètres) des argiles albiennes est constituée principalement de trois minéraux argileux : l'illite, la smectite et la kaolinite. Avant d'être transportés et de sédimenter en milieu marin, les minéraux argileux se forment par altération des roches affleurant sur les continents. Ce sont notamment les conditions climatiques qui favorisent la formation de tel ou tel minéral argileux. Par exemple, la kaolinite se forme sous climat chaud et humide, alors que la smectite se forme dans des conditions plus sèches. Au cours de l'Albien moyen, les proportions de kaolinite diminuent au profit des smectites, ce qui suggère l'installation d'un climat de plus en plus sec, tandis qu'à l'Albien supérieur, la tendance s'inverse suggérant un retour à un climat plus humide.

ALL AUDIENCE ABSTRACT

LITHOLOGY AND CLAY MINERALOGY OF THE ALBIAN FROM SAINT-FLORENTIN (YONNE)...

In the south-east of the Paris Basin, the Albian clays (around -110 million years old), called «Argiles des Pommerats» in the Yonne department, outcrop 1 km west of Saint-Florentin in the "Bois des Joncs" Quarry. The working face shows the summit of the "Sables de Frécambault" Formation (seen over 3 m) and, above them, almost all of the Argiles des Pommerats (10,50 m in height, only the last two or three decimeters of the formation is not visible in the outcrop). The Argiles des Pommerats consist of black silty clays containing numerous bivalves (inoceramids) and ammonites essentially belonging to a family (the Hoplitinae), characteristic of the North European Province of the Boreal Realm. Ammonites show that the Argiles des Pommerats Formation covers the stratigraphic interval between the top of the middle Albian and the base of the upper Albian. Six well-expressed phosphate nodule beds are present within the clay succession. Each of these levels is interpreted as a transgressive surface of a 3rd order eustatic sequence, and often also as a sequence boundary. A comparison is made with the equivalent series of the Aube department, 75 km apart. If the succession of lithological events (phosphate nodule beds) and biological events (appearance or disappearance of species) is the same, the sedimentary recording is very different in thickness (38,91 m in Aube department; 10,70 m in Yonne department) and reveals the condensed nature of the Argiles des Pommerats. The clay fraction (particles less than 2 microns in size) of Albian clays consists mainly of three clay minerals: illite, smectite and kaolinite. Before being transported and deposited in the marine environment, clay minerals are formed by weathering processes of rocks outcropping on continents. It is notably the climatic conditions which favor the formation of the different clay minerals. For example, kaolinite is formed in a hot, humid climate, while smectite is formed in drier conditions. During the middle Albian, the proportions of kaolinite decrease in favor of smectites which suggests the installation of an increasingly drier climate, while in the upper Albian, the trend reverses suggesting a return to more humid conditions.

GÉOCHRONIQUE

n°154

Magazine des Géosciences
Juin 2020 / 20 €

Disponible également sur
notre boutique en ligne
www.geosoc.fr/boutique



en version électronique
ou
en version papier

Le Massif ardennais un jeune massif ancien

une coédition SGF/BRGM

BON DE COMMANDE

Public : Prix par n° : 20 € - **Abonnement 2020 : 56 €**
Adhèrent : Prix par n° : 16 € - **Abonnement 2020 : 28 €**

Ci-joint mon règlement pour l'achat de ____ exemplaires de ce numéro (154) soit un total de ____ TTC (frais d'expédition offerts)
ou un abonnement annuel à la revue (4 numéros par an) pour un montant de ____ TTC (frais d'expédition offerts)

- par chèque à l'ordre de la SGF par bon de commande administratif
 par virement bancaire (les frais sont à votre charge) : IBAN : FR76-3000-4028-3700-0104-5048-494 / BIC : BNPAFRPPAA
 par carte bancaire (Visa ou Eurocard-Mastercard)

Nom : _____ N° de carte : _____

Date de validité : _____ N° de sécurité : _____ (7 chiffres au dos de la carte)

Adresse de livraison : Nom et prénom : _____
Adresse : _____
Code postal : _____ Ville : _____
Téléphone : _____ EMail : _____

Adressez votre règlement accompagné de ce bon de commande à l'adresse suivante :
Société géologique de France - 77 rue Claude Bernard - 75005 Paris

LA GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE EN HAUTS-DE-FRANCE : ANALYSE DE DEUX CAS D'ÉTUDE DÉMONSTRATEURS DE SON POTENTIEL

The geothermal very low energy in Hauts-de-France: analysis of two case studies demonstrating its potential

par Olivier LOUART

EGEE Développement - 270 rue des Fusillés à Villeneuve d'Ascq 59650
olivier.louart@egeedev.fr

Résumé

La géothermie très basse énergie est un atout indéniable pour atteindre les objectifs fixés par la loi de Transition Énergétique. En effet, celle-ci est une énergie renouvelable, décarbonée, locale et constante toute l'année. Les nombreux procédés géothermiques permettent également de balayer une large gamme de puissance et ainsi de répondre à des besoins pouvant aller d'une habitation individuelle jusqu'à un centre hospitalier. Les deux principaux procédés existant pour prélever l'énergie au sous-sol sont le procédé sur nappe et celui sur sondes verticales. À travers deux exemples d'installations sur le territoire des Hauts-de-France, il apparaît que cette énergie peut répondre aux besoins de chauffage et de rafraîchissement - climatisation de bâtiments de différentes envergures. Les contextes géologique et hydrogéologique régionaux permettent en Hauts-de-France de présenter un potentiel relativement important à travers ces deux principaux aquifères que sont celui de la craie du Sénonien-Turonien supérieur et celui du Calcaire carbonifère. Certaines études permettent d'investiguer le sol jusqu'à environ 200 mètres de profondeur et participent ainsi à l'enrichissement des connaissances géologiques régionales.

Abstract

Geothermal energy assisted by heat pump is an undeniable asset for achieving the objectives set by the "loi de Transition Énergétique". Indeed, it is a renewable, decarbonized and local energy, which is constant throughout the year, and having a low greenhouse gas emission power. The numerous geothermal processes also make it possible to sweep a wide range of power and thus meet needs ranging from a village hall to a hospital center. The two main processes for extracting energy from the basement are the aquifer and vertical probes. Through two examples of installations in Hauts-de-France, it appears that this energy can meet the heating and cooling - air conditioning needs of buildings of different sizes. Regional geological and hydrogeological contexts allow Hauts-de-France to present a relatively significant potential through both main aquifers that are the Upper Senonian-Turonian chalk and Carboniferous limestone. Some studies make it possible to investigate the soil up to about 200 meters deep and, thus, participate in the enrichment of regional geological knowledge.

INTRODUCTION

Afin de lutter contre le dérèglement climatique, de nombreux pays se sont engagés en avril 2016, à travers l'accord de Paris (COP 21), à réduire de manière conséquente leurs émissions de gaz à effet de serre (GES), à l'origine du réchauffement climatique. En 2016, 70 % des émissions de GES provenaient de la consommation d'énergie d'origine fossile, et 61 % de la chaleur produite était également d'origine fossile (Ministère de la transition écologique et solidaire, 2019). Pour répondre à cet objectif, l'État Français s'est doté de différents outils législatifs dont la loi relative à la Transition Énergétique pour la Croissance Verte (LTECV) du 17 août 2015, modifiée le 24 mai 2019, ainsi que d'une Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC) qui décrit la feuille de route de la France pour réduire les émissions de GES à l'horizon 2050. Afin d'atteindre les objectifs fixés par la LTECV et suivre la feuille de route décrite par la SNBC, la France a mis en œuvre une Programmation Pluriannuelle de l'Énergie (PPE), à travers le décret n° 2020-456 du 21 avril 2020, qui fixe les priorités d'actions des pouvoirs publics dans le domaine de l'énergie. Les objectifs de cette programmation sont : la

maîtrise de la demande en énergie, la maîtrise des coûts des énergies, la promotion des énergies renouvelables, la garantie de la sécurité d'approvisionnement et l'indépendance énergétique. La PPE décrit les mesures à prendre, pour qu'en France l'énergie soit décarbonée et ainsi atteindre la neutralité carbone en 2050. La PPE fixe ainsi les premiers objectifs chiffrés à atteindre en 2028 pour arriver à la neutralité carbone en 2050. Parmi ces objectifs, nous pouvons nommer :

- ✧ La diminution de 35 % de la consommation primaire des énergies fossiles d'ici 2028 par rapport à 2012 ;
- ✧ La diminution de 30 % des émissions de GES issues de la combustion d'énergie par rapport à 2016 (et 40 % par rapport à 1990) ;
- ✧ L'augmentation de 40 à 60 % de consommation de chaleur renouvelable par rapport aux chiffres de 2017.

Dans ce contexte de transition énergétique et afin d'atteindre les objectifs de la COP21, le mixte énergétique semble être la meilleure, si ce n'est l'unique, solution. En effet, il apparaît comme fantaisiste de penser qu'une unique source d'énergie pourrait répondre à l'ensemble des besoins de la

France. Parmi ces énergies, nous pouvons notamment citer le solaire thermique et photovoltaïque, l'éolien, la biomasse et la géothermie. Cette dernière, bien que trop peu répandue, à un rôle majeur à jouer dans la transition énergétique.

La géothermie, du grec *géo* signifiant la Terre, et *thermos* signifiant la chaleur, est une technologie qui vise à exploiter la ressource énergétique du sous-sol. Il existe plusieurs types de géothermie : la géothermie profonde et celle dite de surface. La géothermie profonde exploite des réservoirs géothermiques compris en moyenne entre 1 000 et 3 000 mètres de profondeur. Elle permet d'exploiter des réseaux de chaleur, avec une ressource présentant une température comprise entre 30 et 80 °C. De nombreuses installations fonctionnent d'ailleurs sur ce principe en Région Parisienne et dans le Bassin Aquitain. Dans le Nord et le Pas-de-Calais cette ressource géothermale profonde n'est actuellement pas exploitée, car les connaissances géologiques sont insuffisantes. Il semblerait cependant qu'un potentiel puisse exister dans le Hainaut, par analogie avec ce qui est développé de l'autre côté de la frontière en Belgique dans la région de Mons notamment. Dans certains contextes géologiques singuliers, la géothermie profonde permet également la production d'électricité lorsque la température est suffisamment élevée (elle doit être supérieure à 100 °C). Les deux installations françaises de ce type sont 1) la centrale de Bouillante en Guadeloupe, située dans une zone volcanique active et qui présente une température supérieure à 300 °C, et 2) la centrale géothermique de Soultz-sous-Forêts. Située dans le fossé rhénan, cette installation présente une température de la ressource de l'ordre de 165 °C captée à travers trois forages de 5 000 mètres de profondeur. De l'eau est injectée dans la roche et de la vapeur d'eau est récupérée afin de produire de l'électricité. Le second type de géothermie est celle dite de surface, ou géothermie dite de très basse température en raison d'une température généralement inférieure à 20 °C qui nécessite l'usage d'une Pompe à Chaleur (PAC) pour valoriser cette 'chaleur' naturellement disponible. Elle est exploitée à de faibles profondeurs (inférieures à 200 mètres) et est exploitable sur 90 % du territoire des Hauts-de-France. Toutefois, celle-ci reste très largement sous-exploitée.

Dans l'objectif de partager quelques éléments d'expériences, cet article présente dans un premier temps la géothermie très basse énergie, les gammes de puissances concernées ainsi que les domaines d'applications. Les deux principaux procédés géothermiques sur axes verticaux, à savoir le procédé sur nappe et celui sur sondes, sont ensuite détaillés. Enfin, deux projets géothermiques régionaux, différant tant par leur envergure que par leur technicité seront exposés afin d'illustrer le fait que cette énergie renouvelable est en capacité de répondre aux besoins de chauffage et de rafraîchissement-climatisation des bâtiments neufs ou existants et de taille variable. Ces exemples sont situés à Lille (le bâtiment BIOTOPE, nouveau siège de la Métropole Euro-

péenne de Lille) et à Cuincy (Médiathèque Municipale) dans des contextes géologiques sensiblement différents.

PRÉSENTATION DE LA GÉOTHERMIE TRÈS BASSE ÉNERGIE

Généralités

Même s'il nécessite des investissements plus importants que pour les traditionnelles utilisations d'énergies fossiles, le recours à la géothermie est un mode de fonctionnement économiquement très intéressant et indépendant des conditions climatiques. En effet, il est reconnu qu'à partir de 10 mètres de profondeur la température du sous-sol reste stable toute l'année. Selon le procédé mis en œuvre, l'économie d'exploitation en chauffage peut atteindre 60 % du coût de l'énergie primaire de référence qu'est le gaz. Dans ce cadre, faire appel au potentiel géothermique revêt un intérêt primordial, non seulement en termes économiques, mais aussi dans le respect des politiques de protection de l'environnement engagées tant au niveau de l'État qu'à celui des collectivités territoriales : diminution des consommations d'énergies primaires fossiles et diminution de l'émission des gaz à effet de serre.

Dans la région des Hauts-de-France, la température du sous-sol de la surface jusqu'à 200 mètres de profondeur est comprise entre 10 et 14 °C en moyenne (Picot & Pira, 2011). À ce niveau de température, l'usage d'une pompe à chaleur (PAC) est nécessaire pour valoriser cette chaleur pour la restituer aux bâtiments. Si la faible température de cette ressource énergétique peut apparaître pénalisante à première vue, elle est en fait un atout pour les usages de rafraîchissement et de climatisation des bâtiments. La PAC constitue un organe central du système géothermique car elle va assurer le transfert d'énergie entre le sous-sol et les bâtiments. Son principe de fonctionnement repose essentiellement sur l'exploitation des propriétés thermodynamiques des fluides frigorigènes/caloporteurs soumis à des opérations de compressions et de détente successives (cycles thermodynamiques). Elle prélève de l'énergie dans un environnement à faible température (le sol ou la nappe) et la restitue dans un autre (les émetteurs du bâtiments) à une température plus forte. Pour satisfaire les besoins en rafraîchissement, les échanges peuvent se faire soit en direct, il est question alors de "Géocooling" (la PAC ne fonctionne pas), soit par l'intermédiaire d'une PAC dite réversible.

Gamme de puissance et domaines d'application

La filière de la géothermie très basse énergie offre des gammes de puissance et des domaines d'application très larges que ce soit en matière de chauffage, de rafraîchissement, de climatisation et de production d'eau chaude sanitaire. Ces nombreuses applications sont dues aux nombreux

procédés existants : sondes géothermiques verticales, champs de sondes géothermiques verticales, doublet (ou multiplet) de forages sur nappe, capteurs horizontaux, capteurs compacts, fondations thermoactives et puits canadiens (Tab. 1).

PROCÉDÉ	SECTEURS D'APPLICATION LES PLUS COURANTS	GAMME INDICATIVE DE PROFONDEURS
Capteur horizontal	Habitat individuel	0,7 à 1,5 m
Puits Canadien	Habitat individuel Résidentiel collectif Tertiaire	1 à 10 m
Capteurs compacts	Habitat individuel Résidentiel collectif Tertiaire	2 à 6 m
Doublet de forages sur nappe	Habitat individuel Résidentiel collectif Tertiaire Complexe socioculturel ou sportif Agricole	10 à 200 m
Sonde verticale	Habitat individuel Résidentiel collectif Tertiaire	50 à 100 m
Champ de sondes	Résidentiel collectif Tertiaire Complexe socioculturel ou sportif	50 à 200 m
Fondations thermoactives	Bâtiment avec fondations profondes	10 à 40 m

Tableau 1. — Ensemble des procédés géothermiques et leurs domaines d'application (source EGEE Développement).

Table 1. — Set of geothermal processes and their areas of application (after EGEE Développement).

Le choix du procédé va généralement être orienté par les besoins à satisfaire. Ainsi, les capteurs horizontaux et compacts, mais aussi les sondes géothermiques individuelles seront plutôt adaptés aux installations de faible puissance (habitation individuelle notamment, Tab. 2).

par la PAC lors de son fonctionnement. Aujourd'hui, les machines atteignent des performances comprises entre 4 et 5 en moyenne. Autrement dit, 1 kW (kilowatt) d'énergie électrique utilisé pour faire fonctionner la PAC peut fournir 5 kW de chaleur. La différence de 4 kW correspond à l'énergie renouvelable prélevée au sous-sol. Pour ce qui est de l'EER, ce coefficient peut atteindre la valeur de 6 lorsque la pompe à chaleur est en fonctionnement (mode actif). En mode "géocooling" (dit mode passif, la PAC ne fonctionne pas), l'EER peut atteindre des valeurs dépassant 20.

La réglementation en vigueur

Du point de vue réglementaire, la géothermie relève du Code Minier. D'après l'article L112-2 de ce Code, les gîtes géothermiques sont classés soit en haute soit en basse température. Cette classification se base sur la température du fluide caloporteur mesurée au forage de prélèvement : supérieure ou inférieure à 150 °C (Fig. 1). Par ailleurs, la géothermie basse température renferme un sous-ensemble appelé « géothermie de minime importance ». Le décret n° 2015-15 du 8 janvier 2015 définit les conditions générales d'application de ce sous-ensemble ; il s'accompagne de quatre arrêtés datés du 25 juin 2015 :

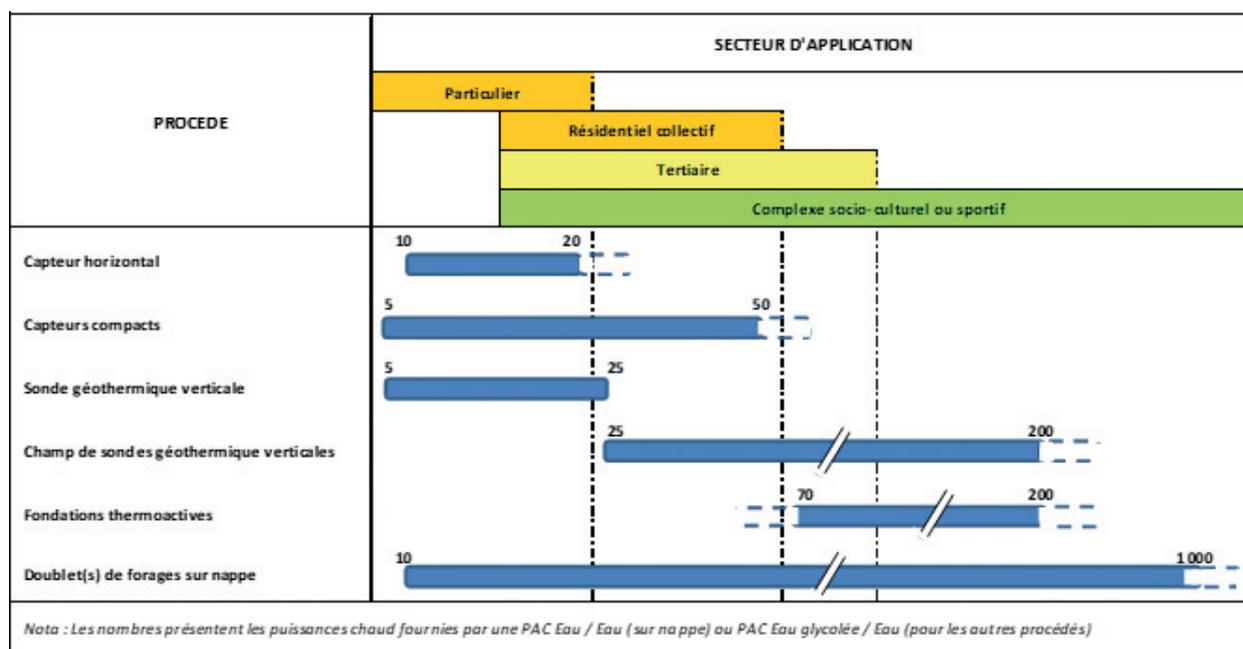


Tableau 2. — Gamme de puissance en chauffage des différents procédés géothermiques (source EGEE Développement).

Table 2. — Heating power range of the geothermal processes (after EGEE Développement)

Performance

Le Coefficient de Performance (COP) et le coefficient d'efficacité frigorifique (EER) représentent la performance d'une installation, respectivement en mode chauffage et en mode rafraîchissement - climatisation. Ce sont des rapports entre l'énergie utile (c'est-à-dire l'énergie fournie par la PAC aux émetteurs du bâtiment) et l'énergie consommée

◇ Arrêté relatif aux prescriptions générales applicables aux activités géothermiques de minime importance : il s'agit des conditions relatives à l'implantation d'une installation, des mesures à mettre en œuvre lors de la réalisation des forages, des conditions d'exploitation et de cession d'exploitation, et des modalités de surveillance et d'entretien de l'installation.

✧ Arrêté relatif à la cartographie des zones réglementaires. Au niveau national, il s'agit d'une carte concernant les échangeurs géothermiques fermés (comme les sondes géothermiques ou les fondations thermoactives) et d'une carte concernant les échangeurs géothermiques ouverts (comme les doublets de forages sur nappe). Ces cartes définissent 3 zones réglementaires distinctes (zones vertes, oranges et rouges) et conditionnent le régime déclaratif.

✧ Arrêté relatif à la qualification des entreprises de forage intervenant en matière de géothermie de minime importance : il définit les qualifications que doivent nécessairement avoir les entreprises de forage pour effectuer les travaux. Ces qualifications sont attribuées distinctement pour les échangeurs géothermiques ouverts (forages d'eau) et les échangeurs géothermiques fermés (sondes).

✧ Arrêté relatif à l'agrément d'expert en matière de géothermie de minime importance : il fixe les modalités d'agrément des experts et les compétences requises. La liste des experts agréés est publiée par Arrêté interministériel.

Il existe différents régimes administratifs qui s'appliquent en fonction du type de géothermie et des critères de seuil (profondeur, puissance extraite au sous-sol, réinjection, zone réglementaire...) (Tab. 3). Toute installation de géothermie basse température ne répondant pas aux critères de la géothermie de minime importance doit faire l'objet d'une demande d'autorisation de travaux et d'exploitation qui sera instruite par les services de l'État (DREAL) au titre du Code Minier.

Le potentiel géothermique régional sur nappe

Le potentiel géothermique régional sur nappe est relativement important. La carte régionale, consultable sur le

site Internet www.geothermies.fr, est divisée selon les quatre principaux potentiels suivants :

✧ Potentiel fort : il représente les 2/3 du territoire. Ce fort potentiel est dû à la présence de l'aquifère de la craie du Séno-Turonien. Cette ressource d'importance régionale peut présenter, par endroit, des débits d'exploitation très supérieurs à 100 m³/h par ouvrage ;

✧ Potentiel moyen : il s'agit de secteur où la(les) nappe(s) présente(nt) une productivité moindre. C'est notamment le cas de la plaine de la Flandre avec la nappe des sables landéniens ;

✧ Potentiel faible : il s'agit de secteurs où la(les) nappe(s) présente(nt) une productivité très faible. C'est par exemple le cas des secteurs où l'aquifère de la craie est peu épais ;

✧ Potentiel inconnu : il s'agit de secteurs où les données scientifiques sont incomplètes pour estimer un potentiel régional et des secteurs où les caractéristiques hydrogéologiques sont très hétérogènes localement. C'est le cas des régions de l'Avesnois et du Boulonnais.

Cependant, il est important de préciser que cette carte ne présente que le potentiel sur nappe. Dans les zones où ce potentiel sur nappe est peu favorable ou inconnu, le procédé sur sondes peut tout à fait répondre à certains besoins. Le potentiel de ce procédé est relativement important puisque applicable sur 90 % du territoire. En effet, seules les zones où se trouvent un périmètre de protection d'un captage d'eau potable, les zones présentant des cavités souterraines ou les secteurs très faillés ou fracturés peuvent empêcher la mise en œuvre d'un tel procédé.

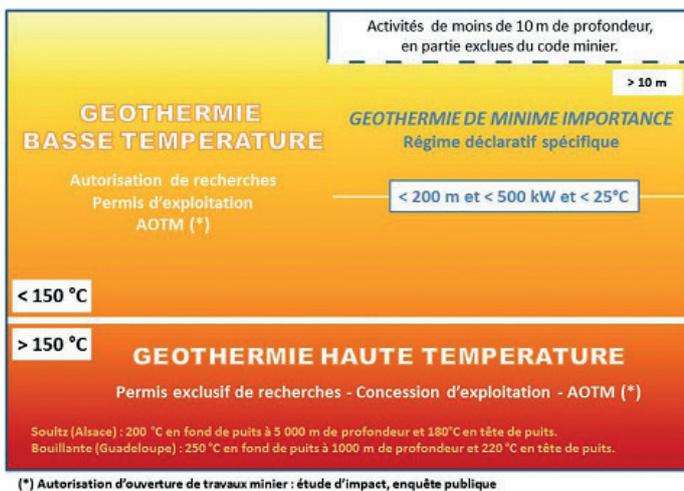


Fig. 1. — Classification et cadre législatif des gîtes géothermique dans le code minier (source : Martin *et al.*, 2015).
 Fig. 1. — Classification and legislative framework of geothermal fields in the mining code (after Martin *et al.*, 2015)

Type de géothermie	Conditions générales	Régime administratif
Géothermie avec puits canadiens ou géostructures thermiques	Aucune	Code minier non applicable (*)
Géothermie avec des échangeurs thermiques horizontaux ou hybrides (corbeilles)	Profondeur < à 10 m	Code minier non applicable (*)
Echangeurs géothermiques ouverts	Profondeur < à 10 m et Puissance < 500 kW et Débit < 80 m ³ /h Réinjection dans la même nappe	Code minier non applicable (*)
	Profondeur de 10 m à 200 m et Puissance < 500 kW et Débit < 80 m ³ /h Réinjection dans la même nappe et Zone verte ou orange	Déclaration simplifiée
Echangeurs géothermiques fermés	Profondeur de > 200 m ou Puissance > 500 kW ou Débit > 80 m ³ /h ou Pas de réinjection dans la même nappe ou Zone rouge	Autorisation instruite par les services de l'Etat
	Profondeur de 10 m à 200 m et Puissance < 500 kW et Zone verte ou orange	Déclaration simplifiée
Code minier non applicable (*)	Déclaration simplifiée	Autorisation instruite par les services de l'état

Tableau 3. — Synthèse des procédures applicables pour les différentes gammes de géothermie (source : Martin *et al.*, 2015).
 Table 3. — Summary of the applicable proceeding for the different ranges of geothermal energy (after Martin *et al.*, 2015).

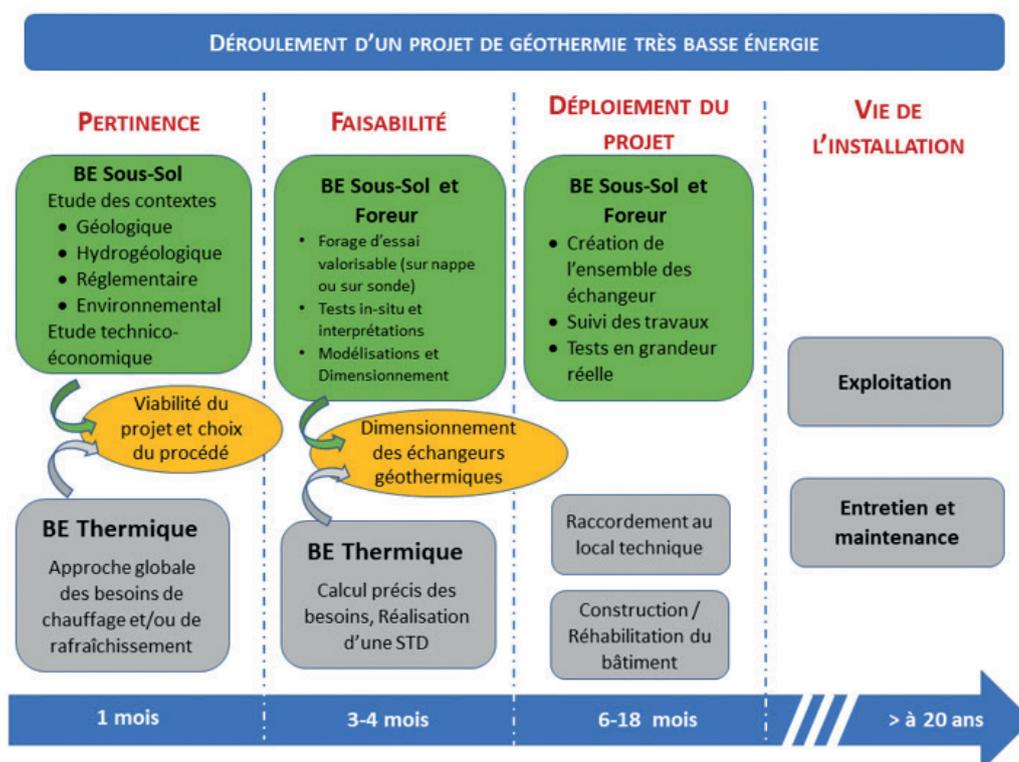


Fig. 2. — Déroulement d'un projet géothermique en quatre étapes clés (source : EGEE Développement). – Abréviation : BE - bureau d'études.
 Fig. 2. — *Geothermal project progress in four crucial steps (after EGEE Développement). Abbreviation: BE - design office.*

Un projet réussi en quatre étapes

Pour mener à bien un projet géothermique, quatre étapes successives apparaissent comme indispensables (Fig. 2). Ces quatre étapes peuvent être résumées ainsi :

✧ 1^{re} étape : Étude de pertinence

Cette première étape se déroule sans travaux, sur la base d'une première approche des besoins thermiques du bâtiment, et d'un examen documentaire du contexte géologique, hydrogéologique, environnemental et réglementaire. En conclusion de cette première étape est réalisée une première approche technico-économique afin de valider la pertinence de mise en œuvre d'un procédé sur nappe ou sur sondes verticales.

✧ 2^e étape : Étude de faisabilité

Si la première étape s'avère concluante, la poursuite d'un projet consiste en la mise en œuvre d'une étude de faisabilité géothermique en créant un forage d'essai captant un aquifère ou en créant une sonde verticale test. Les forages d'essai permettront de réaliser un certain nombre d'essais *in-situ* qui seront détaillés dans les exemples présentés ci-après. L'interprétation de ces essais et la définition précise des besoins thermiques du bâtiment permettront notamment de dimensionner les forages d'exploitations. Pour le procédé sur nappe, il s'agira de définir le débit d'exploitation du doublet ou multiplet de forages ainsi que l'écartement entre les ouvrages. Pour le procédé sur sondes verticales, l'objectif sera de déterminer le nombre, la profondeur et la géométrie du champ de sondes.

✧ 3^e étape : Déploiement du projet

La 3^e étape du projet consiste à créer les échangeurs géothermiques supplémentaires (forage(s) sur nappe ou sondes verticales), à raccorder ces échangeurs au local technique accueillant la PAC et ces équipements.

✧ 4^e étape : Suivi de l'installation

Cette dernière étape n'est pas la moins importante. Si la géothermie nécessite des investissements plus importants que pour une installation plus 'standard' utilisant une énergie fossile, elle trouve tout son bénéfice dans son exploitation et sa maintenance. En effet, pour ce qui est des ouvrages souterrains, s'ils sont réalisés dans les règles de l'art, leur durée de vie peut être considérée comme illimitée pour le procédé sur sondes verticales, et supérieur à 40 ans pour le procédé sur nappe. En ce qui concerne la durée de vie d'une pompe à chaleur, des exemples montrent certaines installations en fonctionnement depuis plus de 25 ans. Par ailleurs, en termes de coût d'exploitation, même si l'énergie électrique reste plus chère que l'énergie fossile, les performances des PAC permettent de diminuer très sensiblement le coût d'exploitation (par 3 au minimum).

LES DEUX PRINCIPAUX PROCÉDÉS GÉOTHERMIQUES SUR AXES VERTICAUX

Le procédé sur nappe

Le procédé sur nappe est composé d'un doublet, ou multiplet, de forages permettant le pompage et la réinjection de l'eau en profondeur. La réglementation impose que cela soit dans la même nappe (Fig. 3). Le transfert d'énergie se fait alors entre la nappe et l'installation (avec ou sans PAC) *via* un échangeur géothermique. La faisabilité d'un tel procédé dépendra notamment de la disponibilité et de la pérennité de la ressource en eau souterraine, de l'influence effective ou potentielle de pompages existant à proximité, de la direction générale d'écoulement de la nappe, de la compatibilité de la qualité de l'eau avec les équipements de surface et de la possibilité de réinjection. Par ailleurs, le dimensionnement du doublet ou du multiplet de forages dépendra, en plus des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère exploité, des besoins thermiques du bâtiment (puissance, débit d'exploitation...) et des usages (chauffage, rafraîchissement par géocooling et /ou climatisation).

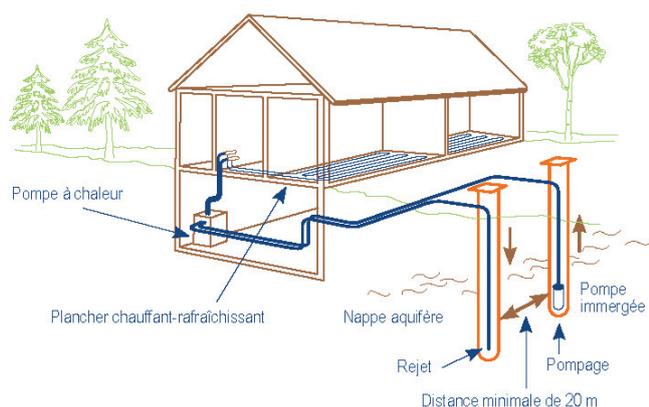


Fig. 3. — Schéma de principe du procédé de doublet de forages sur nappe (source : BRGM *et al.*, 2010 - GEOQUAL).

Fig. 3. — Block diagram of the geothermal doublet on groundwater process (after BRGM *et al.*, 2010 - GEOQUAL).

Le procédé sur sondes verticales

Le champ de sondes géothermiques (Fig. 4) est composé d'un ensemble de forages de petits diamètres dans lesquels est insérée une sonde verticale composée de tubes de polyéthylène haute densité (PEHD) dans lesquels circule un fluide caloporteur (eau glycolée) qui permet de transférer l'énergie du sous-sol via un échangeur. Ces sondes sont scellées au terrain naturel par un ciment aux propriétés thermiques adaptées. Le nombre de sondes verticales à créer est proportionnel à la puissance de la PAC. La faisabilité de ce procédé dépend de moins de paramètres que celui sur nappe. En effet, seule la nature des terrains traversés peut présenter des difficultés à la mise en œuvre de ce procédé et notamment la présence de cavités souterraines ou de fractures importantes.

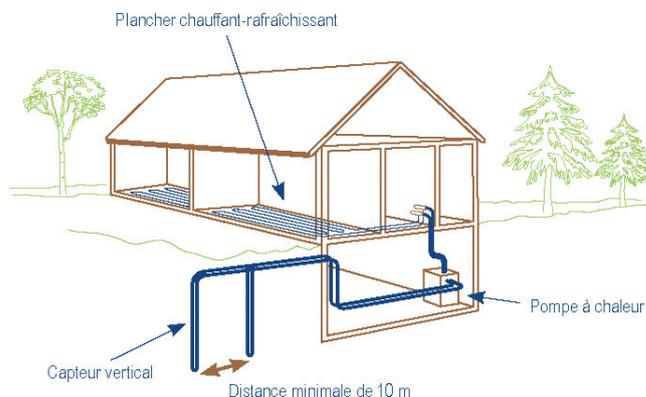


Fig. 4. — Schéma de principe du procédé de sondes géothermiques verticales (SGV) (source : BRGM *et al.*, 2010 - GEOQUAL).

Fig. 4. — Block diagram of the borehole heat exchanger process (BHE) (after BRGM *et al.*, 2010 - GEOQUAL).

QUAND LA GÉOTHERMIE S'INVITE AU SIÈGE DE LA MÉTROPOLE EUROPÉENNE DE LILLE

Le projet

À l'origine le bâtiment dénommé 'BIOTOPE' devait accueillir le siège de l'Agence Européenne du Médicament. En effet, dans le cadre du 'Brexit' un certain nombre d'institutions européennes basées au Royaume-Uni doivent trouver de nouveaux lieux afin de les accueillir. Dans ce contexte, la ville de Lille a candidaté pour accueillir cette instance européenne. Si sa candidature n'a pas été retenue, la Métropole Européenne de Lille (MEL) y a vu une opportunité pour déménager son siège au sein de ce bâtiment respectant toutes les nouvelles normes environnementales. Le 'BIOTOPE' peut être présenté avec les quelques chiffres suivants :

- ✧ 29 300 m² de surfaces utiles,
- ✧ 5 labellisations environnementales, dont le label E+C- pour la performance énergétique du bâtiment et sa faible empreinte carbone,
- ✧ 75 arbres et arbustes plantés en toiture,
- ✧ 19 mois de travaux.

L'étude de pertinence

Dans un premier temps, une étude de pertinence a été mise en œuvre. Cette étude s'est limitée au procédé sur nappe au regard de l'importance du projet et de la disponibilité foncière. Cette première étape a démontré l'absence de contraintes majeures d'un point de vue environnemental et réglementaire. Elle a également permis d'identifier deux aquifères exploitables de façon pérenne au droit du projet :

✧ La craie du Séno-Turonien supérieur exploitable, d'après cette première étape, à un débit compris entre 30 m³/h et 80 m³/h. Cependant, en période d'étiage sévère, cette productivité pourrait être inférieure ;

✧ Le Calcaire carbonifère exploitable à un débit au moins égal à 90 m³/h. Toutefois, la productivité de cet aquifère dépendant essentiellement de sa perméabilité liée au développement de fractures ou fissures, elle peut être très variable d'un forage à l'autre.

Au regard de l'étude de pertinence, l'objectif recherché par le constructeur et ses partenaires, a été de mettre en œuvre une installation géothermique restant sous le seuil d'autorisation administrative, sous peine d'entraîner des délais d'instruction incompatibles avec ceux de la construction (c'est-à-dire un débit d'exploitation maximal de 80 m³/h). Sachant qu'aucun des deux aquifères identifiés ne pouvait garantir un tel débit, et que la disponibilité foncière ne permettait pas un écartement important entre les forages d'exploitation, il a donc été décidé de mettre en œuvre une étude de faisabilité en créant deux forages d'essai, transformables en forages d'exploitation, pour chacun des aquifères identifiés.

L'étude de faisabilité

La seconde étape du projet a consisté à réaliser deux forages d'essais, transformables en forages de réinjection, dont voici les principaux résultats.

Forage Fr1cr (Fig. 5)

Le forage d'essai captant la nappe de la craie, désigné Fr1cr et situé en aval hydraulique par rapport au sens d'écoulement de la nappe de la craie, a été créé en octobre 2017. D'une profondeur de 24,5 mètres, il capte l'aquifère libre de la craie sous 5 mètres de couverture limoneuse, et sur 18 mètres d'épaisseur. L'ouvrage a été développé par acidification. Il s'agit d'une procédure communément réalisée dans le cadre de la création de forage d'eau potable. L'objectif est « d'ouvrir » les fissures afin de permettre à une quantité plus importante d'eau de circuler dans l'ouvrage et ainsi augmenter la productivité de ce dernier. Le micromoulinet de forage réalisé sur cet ouvrage a démontré que l'épaisseur réellement efficace de l'aquifère est de 5,3 mètres.

Fig. 5. — Coupe géologique et technique du forage d'essai Fr1cr captant la nappe de la craie, qui constitue aujourd'hui le forage de rejet du doublet géothermique sur la nappe de la craie séno-turonienne pour le bâtiment BIOTOPE, réalisé par l'entreprise de forage Boniface SARL (source : Boniface SARL, 2017a).

Fig. 5. — Geological and technical log of the test drilling Fr1cr intercepting the chalk groundwater, which is now the reject hole of the geothermal doublet on the Seno-Turonian chalk groundwater for the BIOTOPE building, executed by the drilling company Boniface SARL (after Boniface SARL, 2017a).

Un pompage d'essai par paliers de débit croissant a permis de définir :

✧ L'équation caractéristique de l'ouvrage : $s = 1.10 \cdot 10^{-3} Q + 4,7 \cdot 10^{-3} Q^2$

Où, s signifie le rabattement, c'est-à-dire la différence entre le niveau d'eau au repos et le niveau d'eau en pompage, et Q le débit. Cette équation démontre que l'ouvrage est de bonne qualité avec des pertes de charges linéaires et quadratiques cohérentes avec l'équipement de l'ouvrage et le contexte hydrogéologique local.

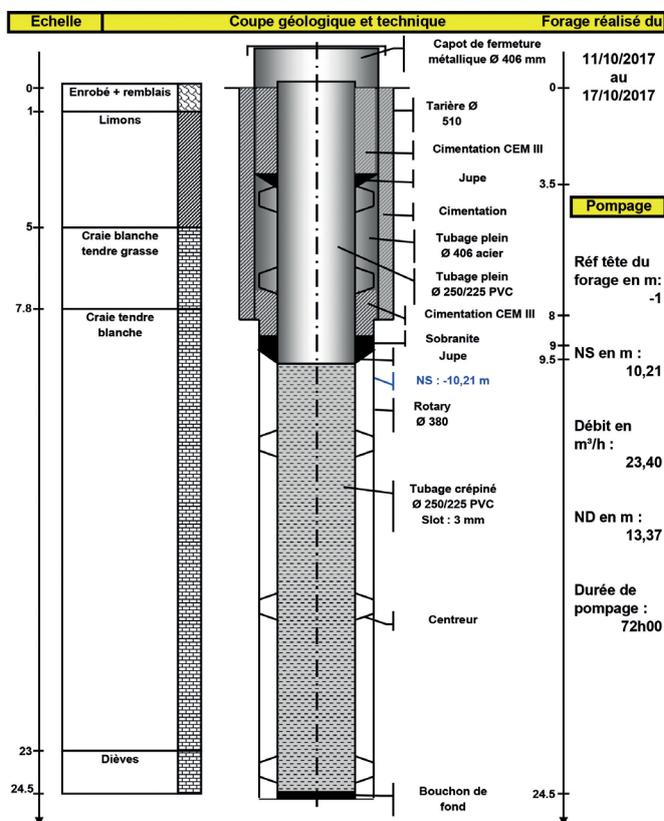
✧ Le débit critique de l'ouvrage : $Q_{cr} = 25 \text{ m}^3/\text{h}$

✧ Le débit Q exploitable en période d'étiage = 15 m³/h.

Ce débit est déterminé sur la base de l'équation caractéristique de l'ouvrage, du résultat du micromoulinet de forage et de l'estimation du niveau de très basses eaux en période d'étiage. Un pompage d'essai de 72 heures au débit constant de 23 m³/h a permis de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère crayeux. Ce test s'est déroulé du

RAPPORT DE CHANTIER

Entreprise :	Sarl BONIFACE 51420 WITRY LES REIMS	TEL :	03.26.97.11.61
Client :	LINKCITY, 1 av. de l'Horizon - 59652 Villeneuve d'Ascq Cedex		
Date :	11/10/2017	n° Inst :	2243
Affaire suivie par :	Mr BECKELYNCK, EGEE Développement		
Type de chantier :	Forage de reconnaissance à la Craie (Fr1cr)		
Lieu du chantier :	Lille, boulevard des Cités Unies		



09/11/2017

Pascal BONIFACE

30 octobre au 2 novembre 2017. L'interprétation de ce test a fait ressortir une valeur de transmissivité de l'ordre de $9.10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, valeur conforme au contexte hydrogéologique local. Lors de ce même test la température de la nappe a été mesurée à $12,3 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui est dans la moyenne régionale. Un test de réinjection a également montré une capacité d'absorption de l'ouvrage supérieure à $30 \text{ m}^3/\text{h}$. Enfin, une analyse d'eau physico-chimique au forage Fr1cr a également mis en évidence l'absence de contre-indication à l'exploitation énergétique de cet aquifère.

Forage Fr2cc (Fig. 6)

Le forage d'essai désigné Fr2cc, a été créé en octobre 2017. D'une profondeur de 180 mètres, ce forage capte l'aquifère du Calcaire carbonifère sur une épaisseur de 117,5 mètres. Avec un niveau d'eau statique mesuré à $-20,3 \text{ m/sol}$ le 13 novembre 2017, et un toit de l'aquifère situé à 62 mètres de profondeur,

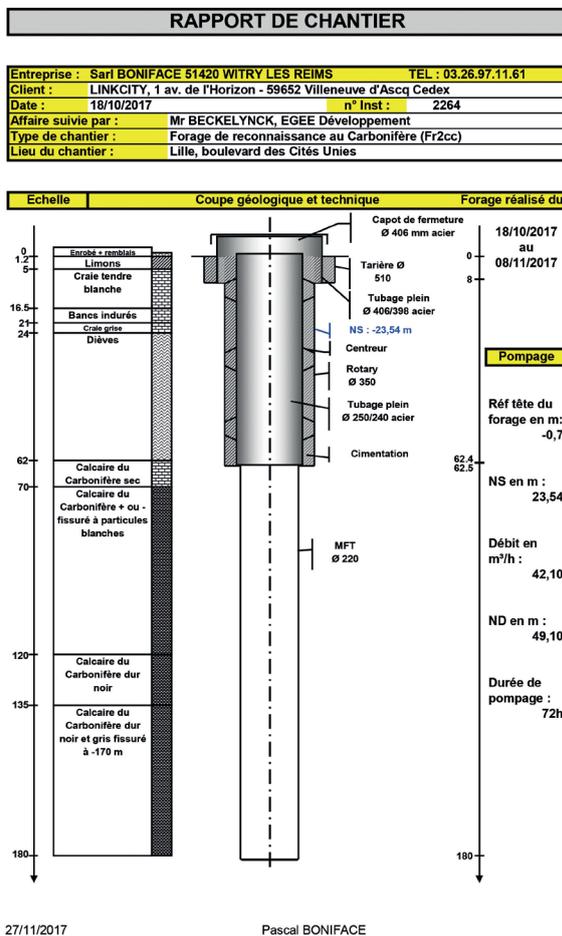


Fig. 6. — Coupe géologique et technique du forage d'essai Fr2cc captant la nappe du Carbonifère, qui constitue aujourd'hui le forage de rejet du doublet géothermique sur la nappe du Calcaire carbonifère pour le bâtiment BIOTOPE, réalisé par l'entreprise de forage Boniface SARL (source : Boniface SARL, 2017b).

Fig. 6. — Geological et technical log of the test drilling Fr2cc intercepting the Carboniferous groundwater, which is now the reject hole of the geothermal doublet on the Carboniferous limestone groundwater for the BIOTOPE building, executed by the drilling company Boniface SARL (after Boniface SARL, 2017b)

cet aquifère est donc captif avec plus de 40 mètres de charge. L'ouvrage a été développé par 5 tonnes d'acides non prévue à l'origine. En effet, l'interprétation d'un premier pompage d'essai par paliers de débit avait mis en évidence un débit critique de l'ordre de $45 \text{ m}^3/\text{h}$ (Fig. 7). Celui-ci étant très en dessous de celui attendu ($90 \text{ m}^3/\text{h}$), il a donc été décidé de mettre en œuvre une acidification de l'ouvrage. Cette acidification a permis d'augmenter de façon significative la qualité de l'ouvrage sur les différents points suivants :

- ❖ Nouvelle équation caractéristique du forage : $s = 1,9.10^{-4} Q + 6,57.10^{-3} Q^2$. Les pertes de charges quadratiques sont divisées quasiment par 3 ;
- ❖ Augmentation du débit critique de l'ouvrage pour atteindre quasiment $60 \text{ m}^3/\text{h}$;
- ❖ Une réduction du rabattement au débit d'exploitation de 14 mètres.

Par ailleurs, un pompage d'essai de 72 heures au débit constant de $42 \text{ m}^3/\text{h}$ a permis de définir la valeur de la transmissivité de l'aquifère capté. Celle-ci s'élève à $T_{\text{Calc Carbonifère}} = 7,4.10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ et apparaît tout à fait cohérente avec les valeurs rencontrées pour cet aquifère dans des contextes similaires. Au cours de cet essai la température de la nappe a été mesurée à $13,7 \text{ }^\circ\text{C}$. Cette ressource étant plus profonde que celle de la craie, cela explique la température légèrement plus élevée au sein du Calcaire carbonifère.

Un micromoulinet de forage a également permis d'identifier les horizons productifs de l'aquifère du Calcaire carbonifère (Fig. 8). Si pour l'aquifère crayeux les niveaux productifs se trouvent essentiellement dans les premiers mètres (sauf

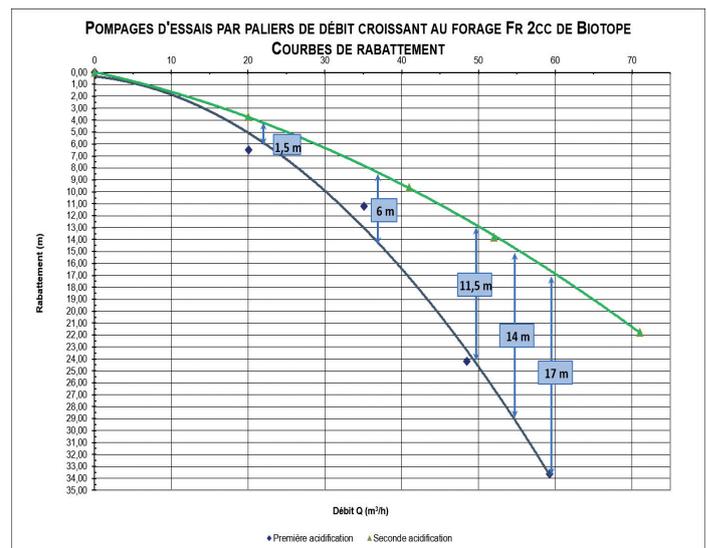


Fig. 7. — Courbe de rabattement du pompage d'essai par paliers de débit croissant au forage Fr2cc, captant la nappe du Calcaire carbonifère - bâtiment BIOTOPE (source : EGEE Développement, 2018).

Fig. 7. — Draw-down curve of the pumping test by increasing flow levels in the Fr2cc drilling, intercepting the Carboniferous limestone – BIOTOPE builds (after EGEE Développement, 2018).

sur certains secteurs du bassin minier où l'on retrouve des niveaux productifs à quelques mètres du mur de l'horizon crayeux), nous trouvons ici des niveaux productifs jusqu'à 157 mètres de profondeur, soit quasiment 100 mètres sous le toit de l'aquifère. Ainsi l'épaisseur réellement productive de cet aquifère s'élève à 40,5 mètres. Une diagraphie caméra

réalisée sur toute la hauteur du forage met particulièrement bien en évidence que l'horizon du Calcaire carbonifère n'est aquifère que s'il est fissuré (Fig. 9). Tout comme pour le forage à la craie, une analyse d'eau a été réalisée au forage Fr2cc et aucune contre-indication à son exploitation à des fins géothermiques n'a été mise en évidence.

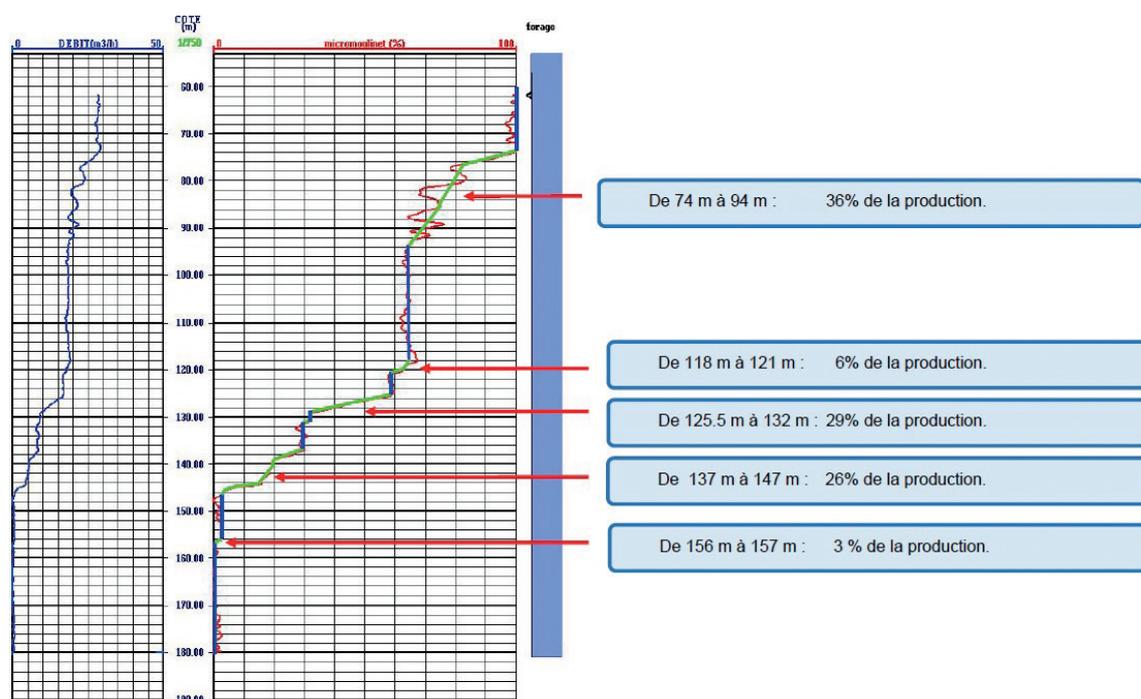


Fig. 8. — Extraits de la diagraphie caméra au niveau du Calcaire carbonifère dans le forage Fr2cc, montrant des fissures (source : CONTROL'APIC, 2018).
 Fig. 8. — Extracts from the video logging at the depth of the Carboniferous limestone in the Fr2cc drilling, showing some fractures (after CONTROL'APIC, 2018).

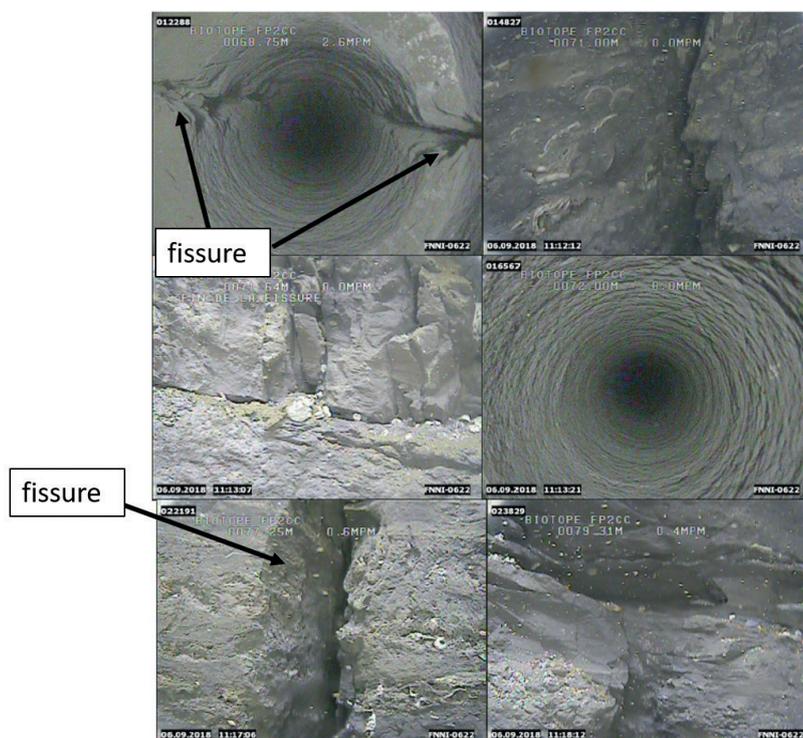


Fig. 9. — Résultats de l'essai au micromoulinet dans le forage captant la nappe du Calcaire carbonifère (source : EGEE Développement, 2019).
 Fig. 9. — Results of the microwell test in the drilling intercepting the Carboniferous limestone groundwater (after EGEE Développement, 2019).

Conclusions

La création des forages d'essais Fr1c et Fr2c, et une série de simulations de fonctionnement des doublets de forages, ont permis de valider la faisabilité du projet géothermique de chauffage et de rafraîchissement du bâtiment BIOTOPE avec un débit d'exploitation cumulé de 80 m³/h. L'aquifère crayeux sera exploité au débit de 25 m³/h, et celui du Calcaire carbonifère au débit de 55 m³/h. Avec cette configuration, la géothermie pourra couvrir jusqu'à 70 % des besoins en chauffage qui représente une puissance de 1,5 MW.

QUINCY CHOISIT LA GÉOTHERMIE POUR LE CHAUFFAGE ET LE RAFRAÎCHISSEMENT DE SA MÉDIATHÈQUE

Le projet

Dans le cadre de la construction de sa médiathèque, la collectivité de Quincy a voulu étudier la faisabilité de mise en œuvre d'un procédé géothermique pour répondre aux besoins de chauffage et de rafraîchissement du nouvel établissement. La nouvelle construction sera une extension des bâtiments et des anciens communs du château de Quincy qui abritent le Centre Culturel et de Loisirs Louis Aragon. Le projet de la commune peut être résumé de la manière suivante : surface : 840 m² ; puissance chaud de la PAC : 80 kW ; puissance froid de la PAC : 45 kW ; taux de couverture de chauffage : 100 % de la médiathèque. Il est à noter que la géothermie ne pouvait répondre à l'ensemble des besoins des bâtiments existants en raison des régimes de températures trop élevés de leurs émetteurs, moins bien adaptés à la géothermie très basse température. En effet, plus l'écart de température entre la source froide, c'est à dire le sous-sol, et celle de l'eau circulant dans les émetteurs, les radiateurs par exemple, est faible plus l'installation géothermique sera performante. Ainsi, il est préférable, lorsqu'un procédé géothermique est mis en œuvre, que les régimes de température des émetteurs soient compris entre 35 et 45 °C. Sur le projet de Quincy, les régimes de températures des émetteurs présents dans les bâtiments existants sont supérieurs à 60 °C.

L'étude de pertinence

La première étape de la mission a donc consisté à la mise en œuvre d'une étude de pertinence technico-économique du projet géothermique, avec notamment une étude comparative entre le procédé sur nappe et celui sur sondes verticales. Cette étude a mis en évidence la présence d'un unique aquifère exploitable au droit du projet, à savoir la nappe de la craie du Sénonien-Turonien supérieur. Celle-ci présente un débit supérieur à 100 m³/h par ouvrage, très largement au-dessus des besoins du projet. Toutefois, sa qualité physico-chimique

ne semblait pas satisfaisante, notamment en raison de la présence de fer dans plusieurs ouvrages exploitant cette même ressource à proximité du projet. De plus, la présence des anciennes fondations du château de Quincy auraient contraint l'implantation d'un doublet de forages dans l'emprise du projet. Pour terminer, l'étude technico-économique comparative du procédé sur nappe et de celui sur sondes verticales a démontré la pertinence de ce dernier avec un impact financier moins important pour le maître d'ouvrage.

L'étude de faisabilité

Au regard de l'étude de pertinence, la maîtrise d'ouvrage a donc choisi de retenir le procédé sur sondes verticales afin de couvrir une partie des besoins de chauffage et de rafraîchissement de la nouvelle médiathèque. Afin de valider définitivement le projet géothermique, il a donc été mis en œuvre une étude de faisabilité géothermique sur sondes verticales.

Création de la sonde test (Fig. 10)

En mars 2019, une sonde verticale test de 190 mètres de profondeur a été créée. Cette dernière a confirmé la coupe géologique prévisionnelle à savoir une craie affleurante et d'une puissance de 90 mètres, attribuée à l'horizon du Sénonien-Turonien supérieur, puis une marne grise jusqu'à 190 mètres de profondeur, attribuée à l'horizon des dièves du Turonien moyen-inférieur.

Mise en œuvre d'un TRT

À la suite de la création de la sonde test, il a été mis en œuvre un Test de Réponse Thermique (TRT) afin de définir les caractéristiques thermiques du sous-sol. Le principe consiste à appliquer au sol un 'stress' thermique *via* la sonde test. Le sol en contact avec la sonde se réchauffe et le fluide présent dans la sonde se refroidit. L'objet du test est de mesurer l'intensité du réchauffement qui est variable selon la conductivité thermique moyenne du sous-sol. Sur Quincy, le TRT qui s'est déroulé du 1^{er} au 5 avril 2019, a permis de définir :

- ✧ La température moyenne du sous-sol : 12,17 °C ; cette température est dans la moyenne de celles rencontrées dans la région dans des contextes similaires ;
- ✧ La capacité thermique volumique du sol : 2,20 MJ / m³K ; cette valeur correspond à celle qui est rencontrée habituellement ;
- ✧ La conductivité thermique du sol : 4,51 W/mK ; cette conductivité est relativement élevée et s'explique par la présence d'une quantité relativement importante d'eau dans l'horizon crayeux. Cette eau favorise effectivement une conductivité thermique élevée du sol.

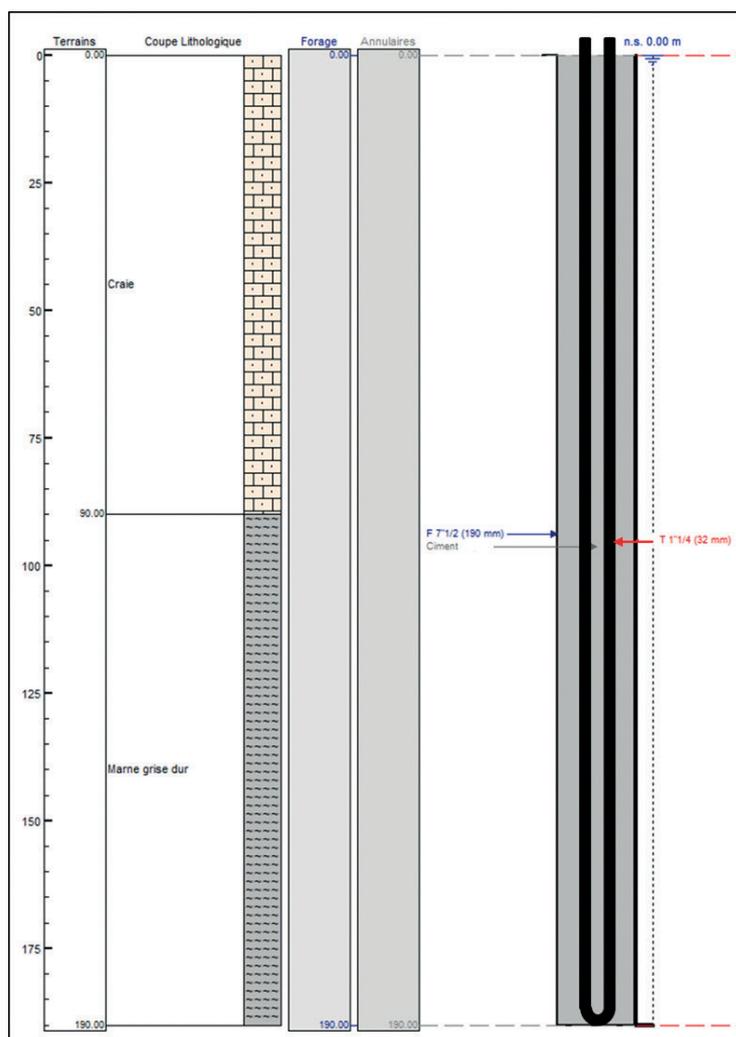


Fig. 10. — Coupe géologique et technique de la sonde géothermique verticale test sur le projet de la médiathèque de Cuincy, exécuté par l'entreprise de forage GEOFORAGE (source : EGEE Développement, 2019).

Fig. 10. — Geological and technical log of the test borehole heat exchanger at the media-library of Cuincy, executed by the drilling company GEOFORAGE (after EGEE Développement, 2019).

Réalisation de la géomodélisation

Pour définir la composition du champ de sondes verticales, doit être réalisée une simulation de fonctionnement appelée 'géomodélisation'. Celle-ci se base sur les résultats du TRT (Tab. 4) mais aussi sur les besoins en chauffage (Fig. 11) et en rafraîchissement (Fig. 12) définis par le bureau d'études thermique.

Résultat du Test de Réponse Thermique	
Résistance thermique de la sonde SGV1	0,11 K/(W/m)
Température moyenne du sol	12,17 °C
Capacité thermique volumique du sol	2,20 MJ/(m³K)
Conductivité thermique du sol	4,51 W/(mK)

Tableau 4. — Résultats du Test de Réponse Thermique réalisé sur la sonde test pour le projet de la médiathèque de Cuincy (source : EGEE Développement, 2019).

Table 4. — Results of the Thermal Stress Restrained Specimen Test realized on the test borehold heat exchanger, for the project of the media-library of Cuincy (after EGEE Développement, 2019).

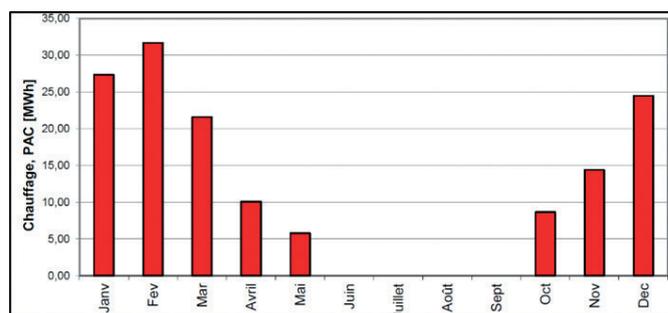


Fig. 11. — Histogramme des besoins mensuels de chauffage de la médiathèque de Cuincy, définis par le bureau d'études SIRETEC (source : EGEE Développement, 2019). Abréviations : PAC - Pompe à chaleur. Fig. 11. — Histogram of the heating monthly needs of the media-library of Cuincy, defined by SIRETEC (after EGEE Développement, 2019). Abbreviation: PAC - heat pump.

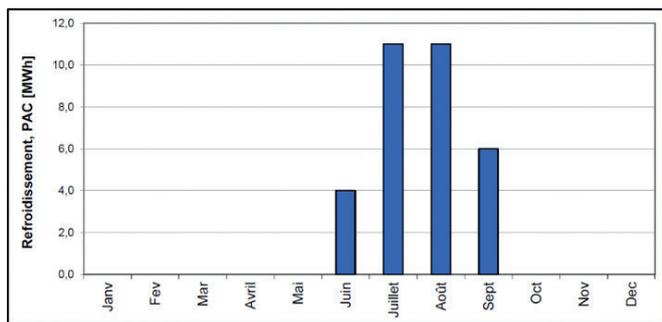


Fig. 12. — Histogramme des besoins mensuels de rafraîchissement de la médiathèque de Cuincy, définis par le bureau d'études SIRETEC (source : EGEE Développement, 2019). Abréviations : PAC - Pompe à chaleur.
 Fig. 12. — Histogram of the refreshment monthly needs of the media-library of Cuincy, defined by SIRETEC (after EGEE Développement, 2019). Abbreviation: PAC - heat pump.

La géomodélisation va permettre de définir de manière optimale le nombre de sondes verticales nécessaires pour répondre aux besoins du bâtiment. Le modèle calcule ainsi l'évolution de la température du fluide en entrée et en sortie du champ de sondes, et cela durant 25 ans. Ainsi, sur la Figure 13 ci-après on peut s'apercevoir que le dimensionnement choisi (8 sondes de 190 mètres de profondeur) atteint ses températures d'équilibres après 20 ans d'exploitation avec une température maximale de l'ordre de 16 °C et une température minimale de l'ordre de 0,8 °C.

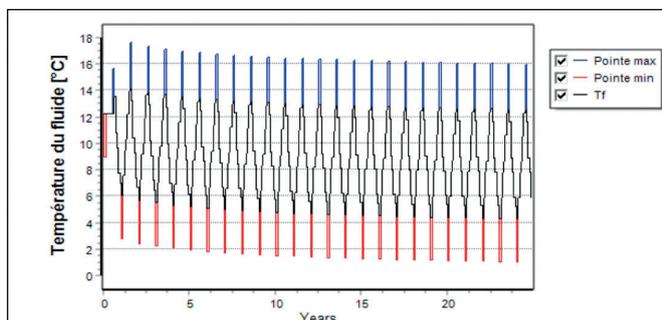


Fig. 13. — Modélisation de l'évolution de la température du fluide circulant dans le champ de sondes verticales sur 25 ans au niveau de la sortie de l'échangeur (source : EGEE Développement, 2019).
 Fig. 13. — Modelling of temperature change of the fluid circulating through the borehole heat exchanger field during 25 years, at the exit of the heat exchanger (after EGEE Développement, 2019).

Conclusion

Le projet géothermique de la commune de Cuincy a pu aboutir à la suite de la réalisation de l'étude de faisabilité. Le champ de sondes verticales a été créé et la médiathèque est en fonctionnement depuis maintenant plusieurs mois.

CONCLUSIONS

À travers cette publication nous avons voulu montrer à quel point l'usage de la géothermie pouvait se démocratiser sur l'ensemble du territoire des Hauts-de-France et à

travers des projets de différentes envergures. Les exemples choisis (Métropole Européenne de Lille et Bassin Minier) proviennent de territoires géologiques différents et mettent en œuvre des procédés géothermiques différents. Ces deux exemples démontrent que la géothermie très basse énergie présente de multiples atouts, à savoir :

- ✧ Elle est disponible sur une grande partie du territoire ;
- ✧ Elle est régulière car indépendante des conditions climatiques ;
- ✧ Elle est locale. Le prélèvement (chauffage) et la réinjection (rafraîchissement - climatisation) de l'énergie s'effectuent au droit même ou à proximité immédiate du projet ;
- ✧ Elle présente une large gamme de procédé et de puissance permettant de répondre au moins à une partie des besoins de chauffage et de rafraîchissement de la plupart des projets de bâtiments neufs ou en rénovation ;
- ✧ Elle est discrète. Une fois les travaux de forages réalisés ils deviennent invisibles. Le local technique accueillant la PAC se résume à une chaufferie classique et aucun stockage de matière première n'est nécessaire ;
- ✧ Elle est respectueuse de l'environnement avec un faible impact sur les émissions de GES par rapport aux autres énergies conventionnelles.

Pour l'ensemble de ces raisons, la géothermie se place comme l'une des principales énergies renouvelables pouvant contribuer aux objectifs fixés par la loi de Transition Énergétique. Malgré ces nombreux atouts, cette énergie reste trop peu développée et nécessite d'être promue auprès des collectivités et des entreprises du secteur privé.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier la Société Géologique du Nord pour m'avoir mis à disposition un temps de parole afin d'exposer et mettre en lumière les grands principes de fonctionnement de la géothermie sur le territoire des Hauts-de-France et ainsi lui donner une exposition importante. Merci également à l'ensemble des relecteurs qui m'ont permis de rendre cet article, je l'espère, compréhensible pour le plus grand nombre. Enfin, un grand merci à mes collègues pour leur aide dans cet exercice, au combien difficile, de présentation de cette technologie qui représente une des solutions à la transition énergétique et à la décarbonation totale voulue pour 2050.

BIBLIOGRAPHIE

BONIFACE SARL (2017a). — Dossier du sous-sol BSS003VJKW/X. Infoterre. World Wide Web address: <http://ficheinfoterre.brgm.fr/>

BONIFACE SARL (2017b) – Dossier du sous-sol BSS003VJKS/X. Infoterre. World Wide Web address: <http://ficheinfoterre.brgm.fr/>

BRGM, EGEE Développement, Chambre des Métiers et de l'Artisanat de la région Centre, Préfecture de la Région Centre, Conseil Régional Centre & ADEME (2010). – La géothermie, l'énergie du sous-sol pour chauffer ou rafraîchir votre habitation ; le forage géothermique de qualité en région Centre : GEOQUAL. Brochure.

CONTROL'APIC (2018). – Rapport du passage caméra du forage de production FPCCC situé sur le site BIOTOPE à Lille (59000). 50 p.

EGEE Développement (2018). – Linkcity, Programme de construction de l'immeuble de bureaux « BIOTOPE » à Lille (59), Application du procédé de géothermie basse température pour le chauffage / rafraîchissement assisté par PAC sur nappe. Rapport de synthèse, R-2018-03-06 Sections 1 et 2.

EGEE Développement (2019). – Construction d'une médiathèque, Chauffage et rafraîchissement par un champ de sondes géothermiques verticales de 190 mètres de profondeur, Faisabilité géothermique, Ville de Cuincy. Rapport R-2019-05-04.

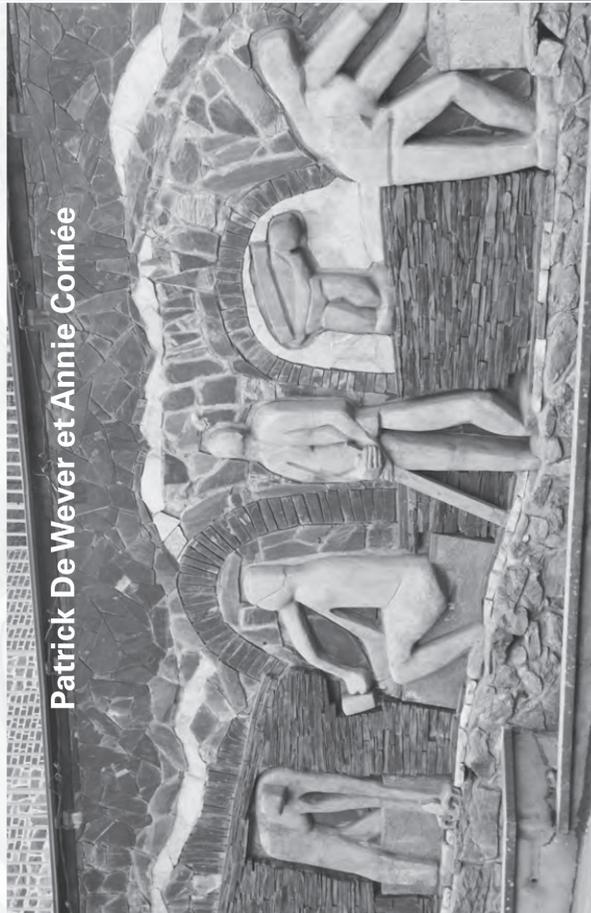
MARTIN J.-C., DURST P. & JAUDIN F. (2015). – Éléments de présentation de la nouvelle réglementation française pour la géothermie de minime importance. Rapport BRGM-65264-FR : 12 p., 4 fig.

MINISTÈRE de la transition écologique et solidaire (2019). – Stratégie Française pour l'énergie et le climat / Programmation pluriannuelle de l'énergie / 2019-2023 et 2024-2028. Rapport, 400 p. ; World Wide Web address: <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27énergie.pdf>

PICOT J. & PIRA K. (2011). – Atlas du potentiel géothermique très basse énergie des aquifères de la région Nord - Pas-de-Calais. Rapport final, BRGM/RP-60244-FR, 2 tomes, 274 p., 90 fig., 19 tabl., 10 annexes.

ROCHES À TOUT FAIRE

Patrick De Wever et Annie Cornée



edp sciences

ROCHES À TOUT FAIRE

Patrick De Wever et Annie Cornée

Quand l'Homme parle de nature, il pense surtout aux organismes vivants (végétaux, animaux) et omet qu'ils vivent tous aux dépens des roches.

L'Homme semble oublier ce qu'il doit à la Terre : il boit dans un verre, mange dans une assiette et coupe avec un couteau le steak qu'il a fait cuire sur sa plancha. Pour cela, une dizaine de carrières ont dû être ouvertes pour recueillir calcaire, sable, argile, fer, nickel-chrome, charbon, sel, lave... Il y a également des cailloux poisons ou médicaments, certains donnent l'heure, d'autres nous éclairaient : on ne sait rien faire sans le recours à la Terre.

Cet ouvrage nous révèle quelques aspects de l'utilisation des ressources minérales, certaines évidentes, d'autres inattendues. Ainsi le lecteur pourra dire, en plagiant Molière : « *Par ma foi ! il y a plus de quarante ans que j'utilise les roches sans que je n'en suse rien ; et je vous suis le plus obligé du monde de m'avoir appris cela* » (Molière, *Le Bourgeois gentilhomme*, acte II, scène 4).



Patrick De Wever, géologue, professeur émérite, Muséum national d'histoire naturelle, est l'auteur d'une trentaine d'ouvrages.

Annie Cornée, ingénieure au Muséum national d'histoire naturelle (en retraite), est co-auteur de plusieurs ouvrages.

Parution : 18 juin 2020

ISBN : 978-2-7598-2433-5

Format : 22 x 25 cm

304 pages en couleur / 29 €

En vente sur : laboutique.edpsciences.fr



edp sciences
www.edpsciences.org

ANALYSE D'UN PROCESSUS D'OBDUCTION : L'EXEMPLE DE L'OCÉAN TÉTHYSIEN MALIAQUE (HELLENIDES)

Analysis of an obduction process: the example of the Tethyan Maliac Ocean (Hellenides)

par Jacky FERRIÈRE

Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F 59000 Lille, France
Jacky.ferriere@univ-lille.fr

Frank CHANIER

Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F 59000 Lille, France
Frank.chanier@univ-lille.fr

Résumé

L'obduction, charriage de la lithosphère océanique sur la croûte continentale, à l'origine des ophiolites, a été défini suite à la révolution de la tectonique des plaques. Dans un premier temps, les analyses ont surtout porté sur la pétrographie et la géochimie des ensembles ophiolitiques (par ex. Vourinos en Grèce, Troodos à Chypre, nappe du Semail en Oman). Notre étude concerne principalement un secteur des Hellénides, le massif de l'Othrys, où l'on peut observer un système ophiolitique complet représenté par un empilement de nappes mises en place pendant l'obduction de l'Océan téthysien Maliaque. L'existence d'une couverture crétacée discordante sur ces nappes, permet de les attribuer, sans équivoque, au processus d'obduction du Jurassique moyen-supérieur. Le dispositif structural est constitué de trois nappes ophiolitiques recouvrant un ensemble de cinq autres nappes correspondant à l'écaillage de la marge continentale sous ces nappes ophiolitiques. Dans ce massif, les ophiolites datées du Jurassique moyen (Mega Isoma et Metalleion) présentent des caractéristiques en partie comparables (répartition, nature pétrographique, âge) à celles des ophiolites du Vourinos-Pinde du Nord, supposées être nées au sein de la plaque supérieure d'une zone de subduction. En revanche, nous avons pu mettre en évidence, en Othrys, des nappes originales : i) une nappe ophiolitique de pillow-lavas du Trias (Fourka, de type MORB) témoin de la période initiale de l'océan ; ii) des nappes issues de la marge distale permettant de reconstituer précisément cette marge. L'analyse de ces différentes nappes nous a permis de reconnaître ou de préciser certaines modalités du processus d'obduction : i) la mise en place tectonique d'une unité (Fourka) appartenant à la plaque plongeante au niveau d'une subduction (et non pas à la plaque supérieure) ; ii) la genèse de certaines nappes à partir de failles normales listriques liées au rifting triasique (processus d'inversion tectonique positive) ; iii) les modalités de déplacement des nappes sur le domaine continental (marge et plate-forme) par l'analyse des mélanges à blocs nés à l'avant des nappes. Deux événements tardi-obduction ont également été étudiés : la genèse d'un bassin d'avant-chaîne et le développement de fenêtres tectoniques au cœur des nappes.

Abstract

The obduction, thrusting of the oceanic lithosphere on the continental crust, at the origin of ophiolites, has been defined following the plate tectonics revolution. Initially, the analyzes focused on the petrography and geochemistry of the ophiolites (e.g. Vourinos in Greece, Troodos in Cyprus, Semail in Oman). Our study mainly concerns a sector of the Hellenides, the Othris massif, where can be observed a complete ophiolitic system made of a pile of thrust sheets emplaced during the obduction of the Tethyan Maliac Ocean. The presence of Cretaceous layers covering unconformably these thrust sheets, allows to attribute these latter, without any doubt, to the Middle-Late Jurassic obduction process. The structural device comprises three ophiolitic nappes overlying five other nappes corresponding to the deformation of the continental margin under these ophiolitic nappes. In this massif, the Middle Jurassic ophiolites (Mega Isoma and Metalleion) have characteristics partly comparable (location, petrographic characteristics, age) to those of the Vourinos-North Pindos ophiolites supposed to be born in the upper plate of a subduction zone. On the other hand, we were able to highlight in Othris, some original nappes: i) an ophiolitic nappe made of Triassic pillow-lavas (Fourka unit, with MORB lavas) witness of the initial period of the ocean; ii) nappes coming from the distal margin, allowing this margin to be reconstructed fairly precisely. Thanks to the analysis of these different nappes we have been able to determine or to precise some characteristics of the obduction process: i) the tectonic emplacement of a thrust sheet (Fourka) coming from the lower diving plate in the subduction zone (and not to the upper plate as the other ophiolitic nappes); ii) the genesis of some nappes from Triassic normal listric faults linked to the rifting event (positive tectonic inversion process); iii) the characteristics of emplacement of the nappes on the continental domain by analyzing the mélanges born in front of the syn-obduction nappes. Two late-obduction events have been also studied: the genesis of a foreland basin and the development of tectonic windows within the thrust sheets pile.

INTRODUCTION

Les ophiolites (dites parfois roches vertes) ont toujours attiré l'attention des géologues, mais ce n'est qu'au début des années 1970 avec la révolution de la tectonique des plaques que le processus d'obduction, c'est-à-dire le charriage de lithosphère océanique sur un élément continental a été défini (Coleman, 1971) et que le processus tectonique a été envisagé (Dewey & Bird, 1971). Alors que certains auteurs avaient précédemment établi un parallèle entre les ophiolites et les fonds océaniques (Brunn, 1959), il a fallu attendre 1972 pour qu'un consensus sur la définition de ces ophiolites et leur origine en tant que lithosphère océanique soit largement adopté (Anonymous, 1972). Si les ophiolites sont assez abondantes dans les chaînes de montagnes, elles sont souvent reprises dans des collisions ultérieures entre blocs continentaux et plus ou moins affectées par le métamorphisme associé à l'orogénèse. De ce fait, les processus liés à ce phénomène d'obduction sont souvent difficiles à analyser, c'est le cas notamment dans les Alpes. Des secteurs privilégiés tels que le Vourinos en Grèce (par ex. Moores, 1969), le Troodos à Chypre (par ex. Miyashiro, 1973) et le Semail en Oman (par ex. Glennie *et al.*, 1973), où les ophiolites sont peu reprises dans les tectoniques ultérieures, ont permis d'avancer dans ce

domaine (pour plus de détails, voir l'évolution des concepts *in* Dilek & Newcomb, 2003). Une équivalence entre ophiolites et lithosphère née au niveau d'une dorsale médio-océanique a d'abord été largement admise. Par la suite, des origines impliquant des subductions ont été envisagées, en relation : i) avec des particularités géochimiques des roches ophiolitiques (par ex. Miyashiro, 1973 pour le Troodos). Ces ophiolites typiques des zones de subduction ont alors été définies comme ophiolites de « Supra-Subduction Zone » (SSZ) ; ii) avec le problème de la mise en place tectonique des nappes ophiolitiques. Des subductions océan/océan ont notamment été proposées pour expliquer le passage de la lithosphère océanique sur la lithosphère continentale entraînée secondairement dans la subduction (par ex. Lippard *et al.*, 1986 pour l'Oman). Le charriage sur le domaine continental des nappes issues de la plaque supérieure au niveau de la zone de subduction, autrement dit, l'obduction, est la conséquence logique de ce dispositif.

La chaîne des Hellénides comporte l'un des dispositifs ophiolitiques les mieux préservés au monde. Ces ophiolites affleurent dans de bonnes conditions dans un grand nombre de massifs de Grèce continentale (Vourinos, Pinde du Nord, Othrys, *etc.*) où elles sont souvent préservées du métamorphisme et où les structures liées à l'obduction (d'âge jurassique supérieur) sont clairement scellées par la couverture crétacée. Leur nature pétrographique et géochimique est ainsi bien préservée ainsi que leurs structures tectoniques associées à l'obduction. Il reste cependant d'importants débats, notamment sur la position paléogéographique de l'océan à l'origine des principales nappes ophiolitiques par rapport au bloc continental (Dercourt, 1970, 1972 ; Bernoulli & Laubscher, 1972, et de nombreux autres auteurs par la suite ; cf. discussion *in* Ferrière *et al.*, 2012 et *infra* § II). Pour notre part, nous nous sommes surtout intéressés au dispositif ophiolitique présent au sein du massif de l'Othrys en Grèce continentale (Fig. 1 et 2). Ce massif présente en effet plusieurs avantages :

- i) le dispositif structural syn-obduction comprend de nombreuses nappes (8 nappes majeures) dont des nappes ophiolitiques, mais aussi, ce qui est beaucoup plus rare en Grèce, des nappes issues de la marge de l'océan, notamment de la marge distale. La relation entre les failles initiales issues du rifting triasique et les contacts de nappes mises en place pendant l'obduction jurassique a pu de ce fait être envisagée ;
- ii) l'analyse des mélanges à blocs remaniant certaines de ces nappes permet de reconstituer l'évolution de leur déplacement ;
- iii) des structures liées à des mouvements verticaux accompagnent l'obduction (par ex. bassin d'avant-chaine et fenêtres tectoniques au sein de l'empilement des nappes).

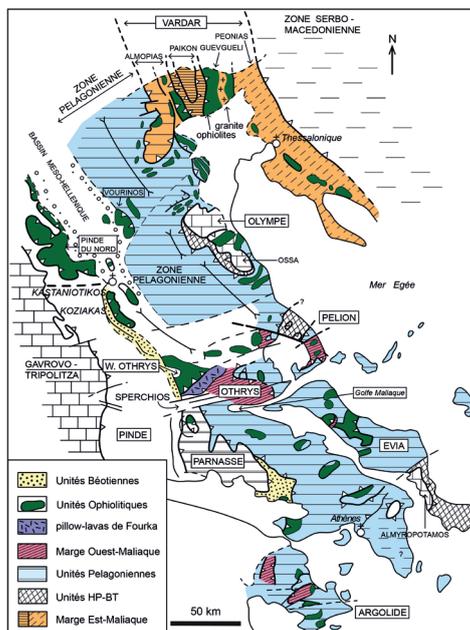


Fig. 1. — Carte géologique des Hellénides avec les principales unités maliaques syn-obduction (modifié d'après Ferrière *et al.*, 2016). Seules les zones internes helléniques affectées par l'obduction jurassique (présence d'ophiolites) et la zone béotienne qui résulte de ce processus (bassin d'avant-chaine) sont représentées en couleur. Les zones externes (dont le bassin du Pinde), les formations récentes (Oligocène-Quaternaire) et les domaines marins (Mer Égée) sont en blanc.

Fig 1. — Geological map of the Hellenides with the main syn-obduction Maliac units (modified from Ferrière *et al.*, 2016). The Hellenic internal zones having undergone the Jurassic obduction (existence of ophiolites) and the Beotian zone linked to these events (foreland basin) are shown in color. The external zones (among which the Pindos Basin), the recent formations (Oligocene-Quaternary) and the marine areas are in white color.

Dans un premier temps, les études faites en Othrys ont permis de mettre en évidence les principales nappes syn-obduction, de déterminer la stratigraphie de leurs séries et la nature pétrographique des ophiolites ou des laves issues du rifting initial (Ferrière, 1972, 1974, 1982, 1985 ; Hynes *et al.*, 1972 ; Hynes, 1974 ; Smith *et al.*, 1975). Par la suite, des travaux partiels ont apporté quelques précisions sur l'âge de certaines laves (Bortolotti *et al.*, 2008), ou celui de mélanges à blocs (Photiades *et al.*, 2003) ainsi que sur la géochimie de roches mafiques d'Othrys (Barth & Gluhak, 2009). Récemment, des datations et des analyses de terrain, surtout en Othrys occidentale, nous ont permis de préciser certains points fondamentaux concernant les ophiolites d'Othrys et l'océan correspondant : i) l'âge de deux des unités ophiolitiques a été précisé (Ferrière *et al.*, 2015) ; ii) la position de l'océan Maliaque a été discutée en détail. Une origine à l'est du Pélagonien a été retenue (Ferrière *et al.*, 2012) ; iii) la totalité de l'océan Maliaque, avec ses deux marges, a été décrit (Ferrière *et al.*, 2016). À partir des résultats précédents et de données nouvelles acquises principalement en Othrys occidentale, nous nous proposons ici de décrire de façon générale un processus d'obduction mais aussi de préciser certaines modalités de ces processus d'obduction en nous fondant sur des éléments originaux présents dans le secteur concerné.

également en Grèce. Le plus connu est celui du Vourinos, déjà étudié par Brunn (1956) puis Moores (1969) et Rassios *et al.* (1994) notamment. Le contexte d'obduction est plus ou moins le même en Albanie et en Grèce. Dans ces deux secteurs existent de puissantes nappes d'ophiolites dont celle de la Mirdita en Albanie et celles du Vourinos-Pinde du nord, d'Othrys et d'Eubée (Evia) en Grèce (Fig. 1). Ces différents ensembles ophiolitiques résultent d'un même processus d'obduction d'âge jurassique moyen-supérieur.

Malgré cela, les reconstitutions paléogéographiques diffèrent s'agissant de la localisation de l'océan à l'origine des ophiolites par rapport à l'autochtone relatif représenté en Grèce par le bloc pélagonien à croûte continentale épaisse. Cet océan serait situé soit : i) à l'ouest du Pélagonien, au niveau de la zone du Pinde (Dercourt, 1970 ; Smith *et al.*, 1975 ; Jones & Robertson, 1991 ; Saccani *et al.*, 2004 ; Saccani & Photiades, 2004) ; ii) à l'est du Pélagonien au niveau de la cicatrice du Vardar (Bernoulli & Laubscher, 1972 ; Dercourt, 1972 ; Ferrière, 1982, 1985 ; Ferrière & Stais, 1995 ; Ferrière *et al.*, 2012 ; Bortolotti *et al.*, 2013) ; iii) ou enfin, des deux côtés du Pélagonien, en admettant l'existence de deux aires océaniques indépendantes (Vergely, 1984 ; Robertson, 2012 ; Rassios *et al.*, 2019). S'agissant plus particulièrement de la Grèce, les ophiolites du Vourinos-Pinde du Nord ont fait l'objet de

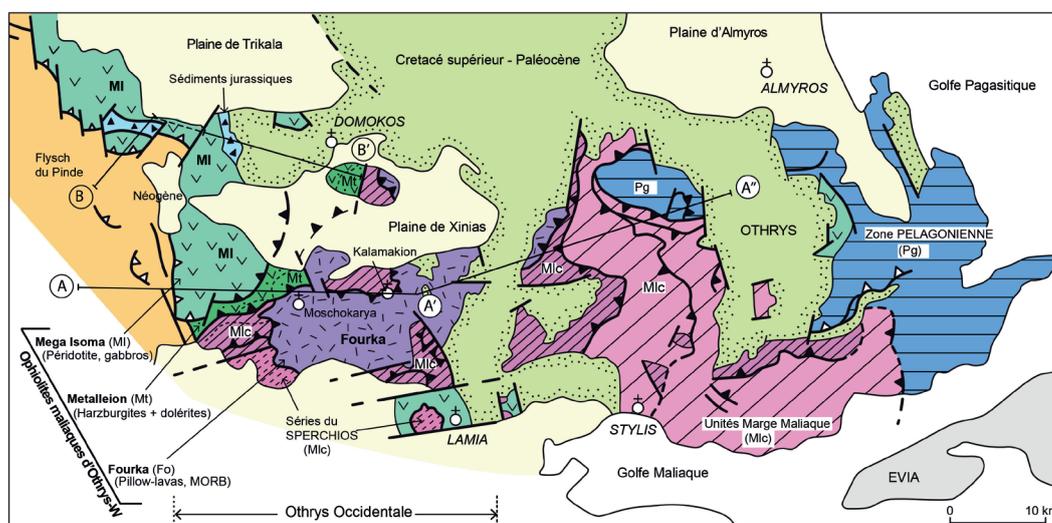


Fig. 2. — Carte géologique schématique de l'Othrys (modifié d'après Ferrière *et al.*, 2016). AA'A'' : localisation de la coupe Fig. 3. Série de la marge Maliaque (Mlc, lignes obliques, rose), lignes serrées : marge distale ; lignes espacées : marge proximale. Vert clair : Couverture crétacée discordante sur les nappes syn-obduction. Jaune pâle : dépôts d'âge néogène-quaternaire.

Fig. 2. — Schematic geological map of Othrys (modified from Ferrière *et al.*, 2016). AA'A'' : location of cross-section Fig. 3. Maliaic margin series (Mlc, oblique lines, pink), closely spaced lines: distal margin; spaced lines: proximal margin. Light green: Cretaceous cover unconformably overlying the syn-obduction nappes. Light yellow: Neogene-Quaternary deposits.

CONTEXTE GÉOLOGIQUE

Le phénomène d'obduction (Coleman, 1971) correspondant au charriage de lithosphère océanique sur un élément de croûte continentale, à l'origine des ophiolites, est maintenant assez bien décrit d'un point de vue général. Si plusieurs secteurs de référence ont fait l'objet d'analyses détaillées (par ex. Chypre, Oman), des exemples intéressants existent

nombreuses études. Celles-ci portent principalement sur la pétrographie des ophiolites (Brunn, 1956 ; Moores, 1969 ; Beccaluva *et al.*, 1984 ; Saccani *et al.*, 2004), sur les déformations au sein des ophiolites (Rassios *et al.*, 1994 ; Rassios & Smith, 2000 ; Rassios & Moores, 2006 ; Rassios & Dilek, 2009 ; Smith & Rassios, 2003) ou sur le contexte volcanique et sédimentaire (Jones & Robertson, 1991 ; Ghikas *et al.*, 2010).

Les affinités géochimiques de ces ophiolites, notamment des laves, ont conduit les auteurs à proposer l'existence de subductions. Cela les a conduits à détailler le dispositif en proposant des contextes de type arrière-arc ou d'avant-arc (par ex. Beccaluva *et al.*, 2005 ; Saccani *et al.*, 2004, 2011).

Si de nombreuses nappes ophiolitiques existent dans la chaîne des Hellénides, en revanche les secteurs présentant un nombre important de nappes syn-obduction, dont des nappes issues de la marge, sont rares. En Grèce, deux régions présentent de tels dispositifs, l'Argolide (Vrielynck, 1982 ; Baumgartner, 1985) et surtout le massif de l'Othrys. En ce qui concerne les ophiolites d'Othrys, les premiers résultats ont concerné :

- i) la mise en évidence des nappes syn-obduction et la description de leur empilement (Ferrière, 1972, 1974 ; Hynes *et al.*, 1972 ; Smith *et al.*, 1975 ; Celet *et al.*, 1980) ;
- ii) la pétrographie et la géochimie des ophiolites, notamment celles des laves (Hynes, 1974 ; Ferrière, 1982), avec la mise en évidence du caractère MORB des laves de l'une des unités (nappe de Fourka) ;
- iii) la stratigraphie des séries présentes au niveau des nappes sédimentaires (Ferrière, 1972, 1974, 1982 ; Smith *et al.*, 1975) et par suite l'océan à l'origine des nappes syn-obduction, défini sous le nom d'Océan Maliaque (Ferrière, 1974, 1976) ;
- iv) les grands traits de l'obduction (Smith *et al.*, 1975 ; Celet *et al.*, 1980 ; Ferrière, 1982, 1985).

Ces résultats ont alors permis de distinguer deux périodes principales d'évolution de l'Océan Maliaque :

- i) tout d'abord une période d'accrétion océanique en contexte de divergence avec les différents stades d'évolution des océans à savoir les stades anté-rift, syn-rift (Trias moyen *p.p.*) et post-rift (Trias moyen *p.p.*-Jurassique moyen *p.p.*) des océans ;

- ii) et ensuite, la période de convergence marquée par les processus de subduction et d'obduction dès le Jurassique moyen *p.p.*

Plus récemment, des auteurs ont effectué des analyses pétrographiques et géochimiques plus précises sur les laves syn-rift (Trias moyen) et sur les pillow-lavas de la nappe ophiolitique de Fourka, la plus basse du dispositif (Bortolotti *et al.*, 2008 ; Monjoie *et al.*, 2008 ; Barth & Gluhak, 2009), confirmant le caractère MORB de ces derniers. Parmi les résultats les plus récents acquis en Othrys, figurent aussi des datations paléontologiques. Celles-ci ont permis d'attribuer un âge triasique à ces mêmes pillow-lavas de Fourka (Bortolotti *et al.*, 2008) et plus précisément Anisien supérieur pour les plus anciennes ainsi qu'un âge jurassique moyen à l'unité ophiolitique principale (Mega-Isoma) (Ferrière *et al.*, 2015).

LES FAITS : LES NAPPES SYN-OBDUCTION EN OTHRYS

Dispositif d'ensemble

Le massif de l'Othrys est constitué d'une couverture sédimentaire d'âge crétacé-éocène discordante sur les différentes nappes qui, de ce fait, sont avec certitude des nappes liées à l'obduction des ophiolites au Jurassique moyen-supérieur. Ce dispositif tectonique syn-obduction est assez régulier : les nappes ophiolitiques correspondant à la lithosphère océanique reposent sur des nappes issues de la marge de l'océan concerné (Océan Maliaque) qui recouvrent elles-mêmes l'autochtone relatif pélagonien (Fig. 2 et 3).

Les unités ophiolitiques provenant de la lithosphère océanique Maliaque

L'ensemble des ophiolites d'Othrys comprend trois unités majeures (Celet *et al.*, 1980 ; Ferrière, 1982, 1985 ; Ferrière *et al.*, 2015) : deux unités possèdent des péridotites à leur base (Mega Isoma et Metalleion) tandis que la troisième est uniquement constituée de pillow-lavas (Fourka) (Fig. 2-4). D'Ouest en Est, il est possible de rencontrer sur le terrain :

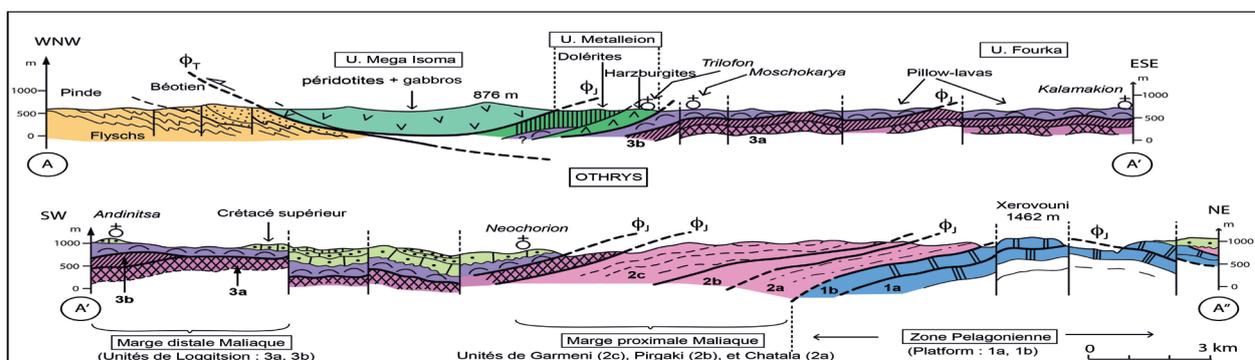


Fig. 3. — Coupe AA'A' au travers des nappes maliaques syn-obduction en Othrys (localisation sur la Fig. 2). Les unités supérieures sont les unités ophiolitiques (Mega Isoma, Metalleion, Fourka). Les unités inférieures au-dessus des unités pélagoniennes correspondent à la marge maliaque (modifié d'après Ferrière *et al.*, 2016).
 Fig. 3 - Cross section AA'A' across the Maliac syn-obduction thrust sheets of the Othris area (location on Fig. 2). The upper units are the ophiolitic ones (Mega Isoma, Metalleion, Fourka). The lower units above the Pelagonian units correspond to the Maliac margin (modified from Ferrière *et al.*, 2016)

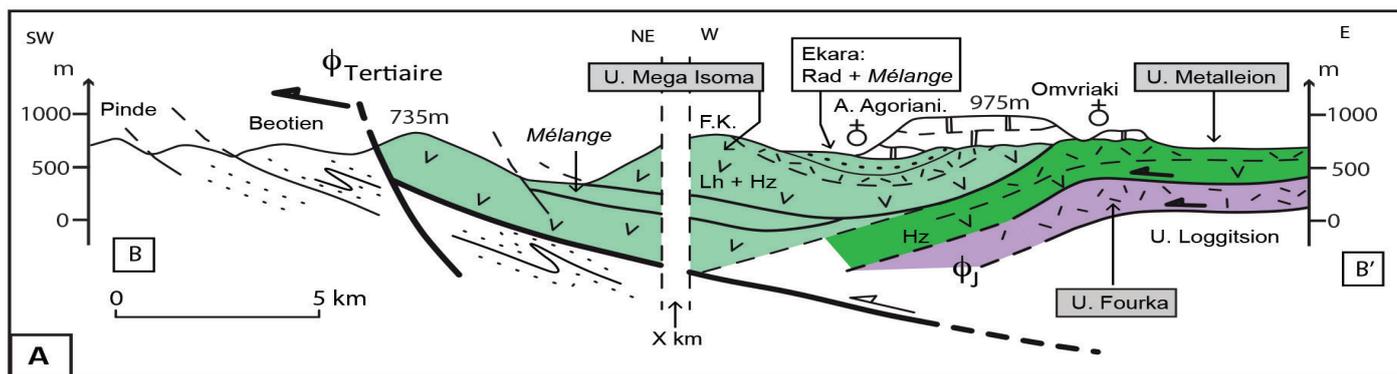


Fig. 4. — Les ophiolites d'Othrys-Ouest : A - coupe de détail des ophiolites issues de l'Océan Maliaque montrant les trois nappes principales (Mega Isoma, Metalleion, Fourka) reposant sur les unités issues de la marge distale (unités de Loggitsion) ; B - colonne schématique illustrant la superposition des principales nappes ophiolitiques avec le détail de leurs séries sédimentaires (séries d'Ekara et de Moschokarya). Modifié d'après Ferrière *et al.* (2015).
 Fig. 4. — The ophiolites of the West-Othris Maliaq ophiolites showing the three main nappes (Mega Isoma, Metalleion, Fourka) overlying the distal margin units (Loggitsion units); B - Schematic column summarizing the structural set of the ophiolitic nappes with details of their sedimentary series (Ekara and Moschokarya series). Modified from Ferrière *et al.* (2015).

inférieure faite de péridotites de type harzburgites. Des chromites ont été localement exploitées dans ces péridotites. Nous n'avons observé aucune couverture sédimentaire en place sur cette unité.

L'unité ophiolitique inférieure (Fourka)

Cette unité est surtout constituée de pillow-lavas verdâtres passant au brun lorsqu'ils sont altérés (Fig. 5). Elle est largement représentée en Othrys avec une extension latérale d'environ 20 km d'ouest en est, et une épaisseur estimée entre 200 et 300 m. Elle présente en plusieurs endroits une couverture sédimentaire essentiellement faite de radiolarites, de pélites siliceuses et de mélanges (Bortolotti *et al.*, 2008 ; Ferrière *et al.*, 2015). Nous considérons qu'il s'agit là d'une unité ophiolitique témoin de la lithosphère océanique maliaque initiale. En effet, ces laves relativement anciennes (triasiques et non jurassiques) sont de type MORB (Hynes, 1974 ; Ferrière, 1982 ; Bortolotti *et al.*, 2008 ; Barth & Gluhak, 2009) et recouvertes de séries uniquement siliceuses révélatrices d'un environnement profond. Les âges les plus anciens obtenus pour ces laves de Fourka (Anisien supérieur, Ferrière *et al.*, 2015) proches de celui du rifting initial, conduisent à placer cette unité ophiolitique de Fourka au niveau de la lithosphère océanique à proximité de la marge distale. Ce résultat est en accord avec la position structurale de l'unité localisée entre les nappes ophiolitiques à péridotites au-dessus et les unités sédimentaires issues de la marge distale en-dessous.

L'unité ophiolitique supérieure (Mega Isoma)

Cette épaisse nappe (environ 500 m), est surtout constituée de péridotites. Il s'agit d'une unité mixte faite de lherzolites et de harzburgites fréquemment recouverte de gabbros ainsi que de rares dolérites et laves très altérées. Une couverture sédimentaire faite de radiolarites passant à des mélanges à blocs repose localement sur ces laves (secteur d'Agoriani-Ekara, Fig. 4). Les radiolarites ont donné un âge jurassique moyen, plus précisément bajocien-bathonien (Ferrière *et al.*, 2015).

L'unité ophiolitique intermédiaire (Metalleion)

Il s'agit en fait d'une unité tectonique composite dans laquelle nous avons réuni deux sous-unités : i) une unité supérieure faite de laves et surtout de dolérites ; ii) une unité

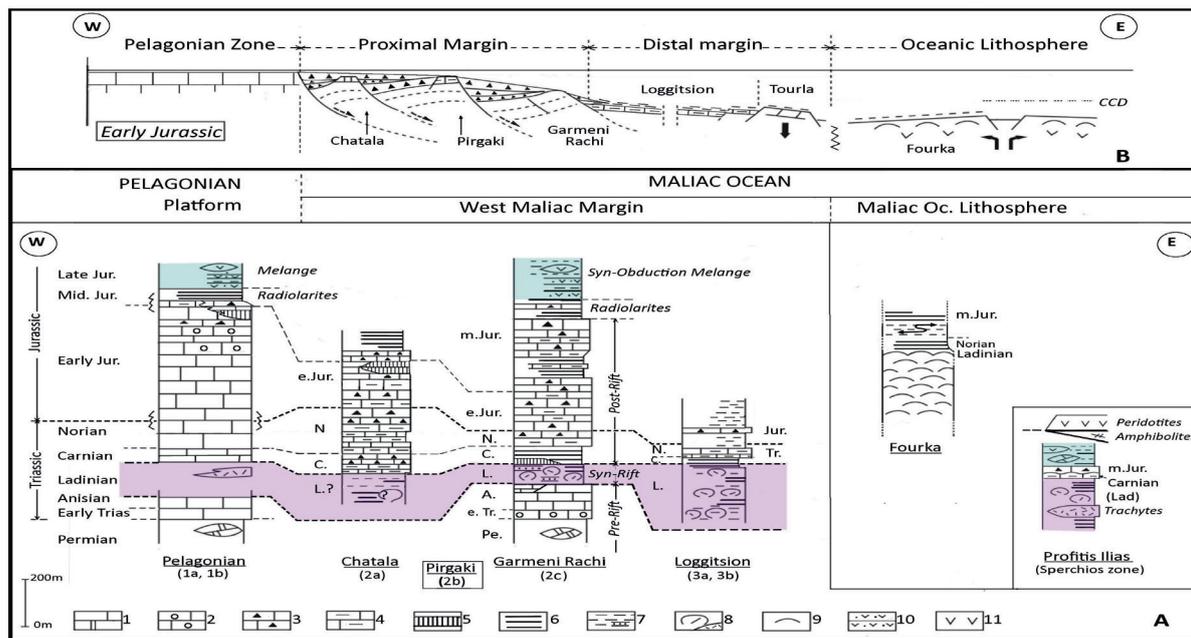


Fig. 5. — Les séries de l’océan Maliaque (d’après Ferrière *et al.*, 2016) : A - Logs stratigraphiques synthétiques de l’Othrys : les séries de la marge Ouest-Maliaque et de l’unité de Fourka ; B - coupe interprétative de la marge au Jurassique inférieur. Les nombres 1a à 3b (logs) renvoient aux unités tectoniques de la figure 3. Violet : rifting triasique ; bleu : mélanges syn-obduction jurassiques. 1-5 : calcaires. 1 : néritiques (plate-forme) ; 2 : oolitiques ; 3 : calcarénites ; 4 : à grain fin et siliceux ; 5 : noduleux ; 6 : radiolarites ; 7 : shales ; 8 et 9 : laves triasiques ; 8 : pillow-lavas de la marge (tirets : tuffites du Pélagonien) ; 9 : pillow-lavas de l’unité ophiolitique de Fourka ; 10 : graywackes dans les mélanges ; 11 : péridotites.

Fig. 5. — The Maliaque oceanic series (from Ferrière *et al.*, 2016): A - Synthetic stratigraphic sections from the Othrys area: the West Maliaque margin and the Fourka series; B - Interpretative cross-section of the margin during Early Jurassic times. The numbers 1a to 3b (logs) refer to the tectonic units of Fig. 3. Violet: Triassic rifting; blue: Jurassic syn-obduction melanges. 1-5: limestones. 1: neritic (platform); 2: oolitic; 3: redeposited calcarenites; 4: fine-grained and cherty; 5: nodular; 6: radiolarites; 7: shales; 8 and 9: Triassic lavas; 8: pillow-lavas of the West-Margin; dashes: tuffites (Pelagonian); 9: pillow-lavas of the ophiolitic Fourka uni; 10: graywackes in the melanges; 11: peridotites.

Les séries des nappes provenant de la marge Maliaque

Les unités issues de la marge distale

On considère que les nappes de Loggitsion proviennent de la marge Maliaque distale en raison de la nature de leur série sédimentaire, essentiellement siliceuse, et de leur position structurale sous les nappes ophiolitiques, notamment sous l’unité des pillow-lavas de Fourka (Fig. 2, 3 et 6A). Il s’agit de deux nappes principales présentes sur l’ensemble de l’Othrys soit sur 40 km d’ouest en est. Les unités de Loggitsion sont constituées de formations volcaniques recouvertes de séries sédimentaires totalement pélagiques et peu diversifiées (Fig. 5). Dans le cas général, on observe de bas en haut (Ferrière, 1982 ; Ferrière *et al.*, 2016) :

- ✧ une formation épaisse (une centaine de mètres en moyenne) de pillow-lavas violacés à amygdales de calcite. De rares corps de trachytes s’y intercalent. Les affinités géochimiques de ces laves sont hétérogènes allant de tholéïtes de type MORB à des tholéïtes d’arc, des basaltes arrière-arc ou encore des laves calco-alcalines (Hynes, 1974 ; Ferrière, 1982 ; Lefèvre *et al.*, 1993 ; Bortolotti *et al.*, 2008 ; Monjoie *et al.*, 2008). Ces laves ont été datées localement du Trias moyen (Celet *et al.*, 1980 ; Ferrière 1982 ; Ferrière *et al.*, 2016) ;

- ✧ des radiolarites roses à rouges du Ladinien supérieur-Carnien (10 à 20 m) ;
- ✧ des calcaires fins à silex riches en conodontes du Norien (10 à 30 m) ;
- ✧ des pélites siliceuses de couleur lie-de-vin d’épaisseur pluri-décamétrique, mal datées. Des radiolarites présentes à leur base ont donné un âge norien terminal-rhétien. Ces niveaux sont donc très probablement du Lias.

En Othrys-Ouest, une unité (Tourla-Trilofon) qui repose sur les unités de Loggitsion typiques (et donc en position initiale très proche de la croûte océanique) présente certaines particularités (Fig. 6A) : i) une très forte épaisseur de laves triasiques (plus de 200 m) ; ii) la présence locale de blocs de calcaires benthiques témoins de hauts-fonds au Trias moyen (monts sous-marins volcaniques et/ou éléments isolés à croûte continentale) ; iii) l’existence de mélanges à blocs reposant sur des radiolarites du Jurassique moyen.

Les unités issues de la marge proximale

De par la nature de leurs séries et leur position structurale sous les unités issues de la marge distale (Fig. 2 et 3), ces unités structurales sont attribuées à la marge Maliaque proximale (la moins profonde et la plus proche de la plate-forme

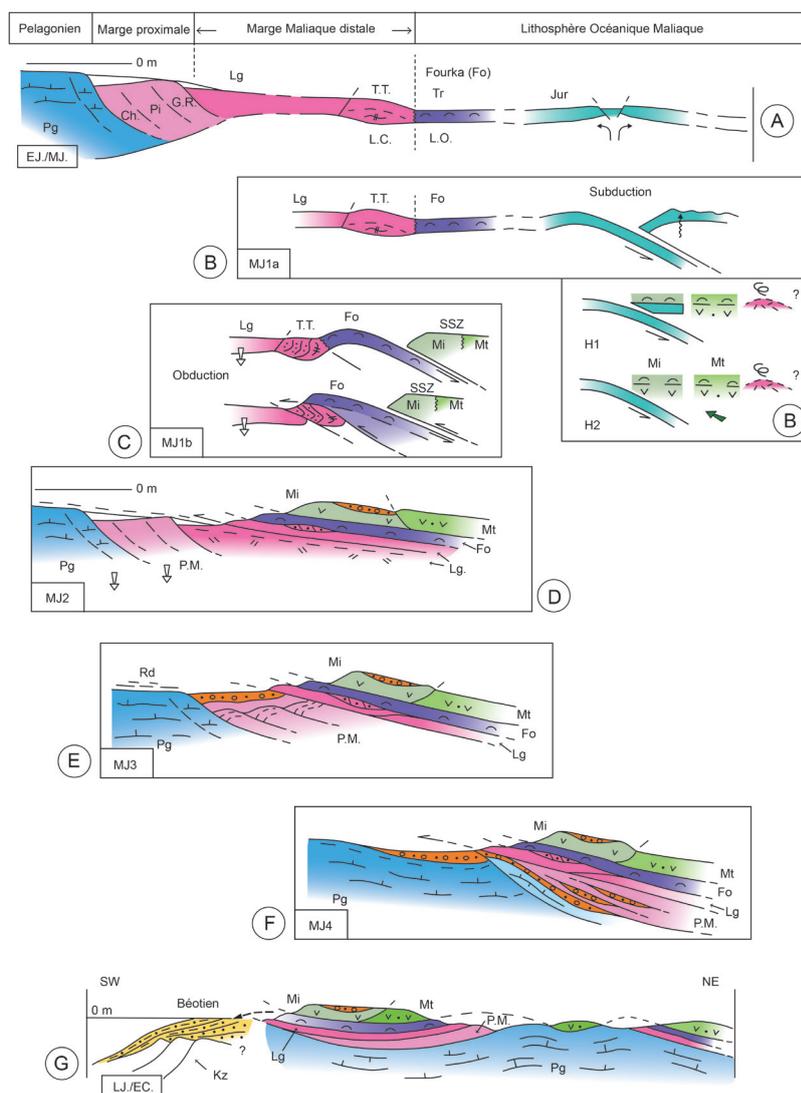


Fig. 6. — Évolution de l'obduction au Jurassique moyen-supérieur : **A à G** - étapes successives du processus d'obduction. **A** - l'Océan Maliaque anté-convergence (Jurassique inférieur) ; **B** - initiation de la subduction intra-océanique ; **H1 et H2** - 2 hypothèses de formation des unités ophiolitiques supra-subduction (SSZ) riches en péridotites, en position d'avant-arc ; **H1** - piégeage d'un morceau de lithosphère océanique évoluant ensuite en position SSZ ; **H2** - création d'une néo-lithosphère océanique de type SSZ dans un espace ouvert par extension à proximité de la fosse de subduction ; **C** - déformation (bombement) au niveau de la transition entre les lithosphères océanique et continentale ; chevauchement de la nappe de Fourka sur le pied de la marge distale représenté par l'unité TT (Tourla-Trilofon) ; **D à F** - tectonisation de la marge distale (**D**) puis proximale (**E**) avec développement d'épais mélanges ; arrivée des nappes syn-obduction sur le para-autochtone Pélagonien (**F**) ; **G** - États tardi-obduction (Jurassique supérieur et Crétacé basal) avec développement du bassin Béotien à l'ouest de l'empilement principal de nappes syn-obduction et d'une fenêtre de Pélagonien à l'est de cet empilement. **Les couleurs** - Lithosphère océanique Maliaque anté-convergence : violet : Trias (unité de Fourka) ; Bleu-vert : Jurassique ; vert : unités SSZ de Mega Isoma (MI) et Metalleion (Mt) ; rose : Arc volcanique éventuel non identifié ; Bloc continental : rose soutenu : marge distale (unités de Loggitsion, Lg) ; rose clair : marge proximale (PM) ; bleu : plate-forme pélagonienne (Pg) ; l'unité supérieure est représentée en bleu clair (**F**). Orange : mélanges à blocs déposés sur les différentes unités. Flèches blanches vers le bas : forte subsidence. **Abbreviations** - **J** : Jurassique ; **E** : inférieur (Early) ; **M** : Moyen ; **L** : supérieur (Late) ; **C** : Crétacé. **Fo** : Fourka ; **Kz** : Koziakas ; **LC et LO** : lithosphères continentale et océanique ; **Lg** : Loggitsion ; **MI** : Mega Isoma ; **Mt** : Metalleion ; **Pg** : Pélagonien ; **Rd** : radiolarites ; **SSZ** : Supra-Subduction Zone ; **TT** : Tourla-Trilofon. Fig. 6. — Evolution of the Middle-Late Jurassic obduction: **A to G**: successive steps of the obduction process. **A** - the pre-convergence Maliaque Ocean (Early Jurassic); **B** - initiation of the intra-oceanic subduction. **H1 & H2** - two hypotheses relative to the origin of the supra-subduction (SSZ) peridotite-rich ophiolite units in a fore-arc domain. **H1** - Trapped oceanic lithosphere then evolving as a SSZ unit; **H2** - genesis of a new SSZ oceanic lithosphere in an extensional open space close to the subduction zone. **C** - deformation (bulge) at the boundary between the oceanic and continental lithospheres; thrusting of the Fourka nappe on the toe of the distal margin represented by the TT unit (Tourla-Trilofon); **D to F** - underthrusting of the distal margin (**D**), then of the proximal one (**E**) with development of thick melanges. Finally, the syn-obduction nappes arrive on the Pelagonian domain (**F**). **G** - Late Jurassic-Early Cretaceous final step with the development of the Beotian trough on the western side of the main syn-obduction nappes pile and of a Pelagonian tectonic window on the eastern side of this pile. **The colors** - The Maliaque pre-convergence oceanic lithosphere: violet: Triassic (Fourka unit); blue-green: Jurassic; green: Mega Isoma (MI) and Metalleion (Mt) SSZ units; pink: unknown possible volcanic arc; The continental block: dark pink: distal margin (Loggitsion units, Lg); light pink: proximal margin; blue: Pelagonian platform (Pg); the upper unit is shown in pale blue (**F**). Orange: mélanges with blocks deposited on the different units. White arrows toward bottom: main subsiding events. **Abbreviations** - **J**: Jurassic; **E**: Early; **M**: Middle; **L**: Late; **C**: Cretaceous. **Fo**: Fourka; **Kz**: Koziakas; **LC et LO**: continental and oceanic lithospheres; **Lg**: Loggitsion; **MI**: Mega Isoma; **Mt**: Metalleion; **Pg**: Pelagonian; **Rd**: radiolarites; **SSZ**: Supra-Subduction Zone; **TT**: Tourla-Trilofon.

pélagonienne). Trois nappes principales, transportées tectoniquement au dessus de l'autochtone relatif pélagonien, peuvent être distinguées.

- i) *L'unité supérieure (Garmeni Rachi, Fig. 5)* : elle est située immédiatement sous celles de Loggitsion. On y observe une série diversifiée avec de bas en haut (Ferrière, 1982 ; Ferrière *et al.*, 2016) :
 - des grès et calcaires à fusulines du Permien ;
 - une formation de calcaires massifs à algues et à foraminifères benthiques d'âge triasique inférieur-anisien ;
 - une formation volcano-sédimentaire syn-rift d'épaisseur faible. Elle comporte des pillow-lavas et des dolérites associés à des niveaux sédimentaires variés : quelques calcaires brêchiques et radiolarites, des grès jaunâtres et des pélites noires ;
 - des radiolarites rouges (10 m environ) d'âge carnien ;
 - des calcarénites et des calcaires siliceux fins d'épaisseur hectométrique (jusque 400 m). Ils sont datés du Norien à leur base (par conodontes) et du Jurassique moyen dans leur moitié supérieure (foraminifères dont *Protopenneroplis striata* Weynschenk, en abondance) ;
 - des radiolarites lie-de-vin du Jurassique moyen (Bajocien supérieur et Bathonien) ;
 - des mélanges à blocs provenant des unités ophiolitiques et des unités de la marge distale. Ils ne sont pas présents sur l'ensemble de l'unité.
- ii) *Les unités inférieures (Pirgaki et Chatala, Fig. 2 et 3)* : les séries de ces unités présentent des variations importantes par rapport à celle de Garmeni Rachi. L'unité de Pirgaki est la plus complète. Sa série se distingue de celle de Garmeni Rachi par une plus grande richesse en niveaux calcaires (plate-forme anisienne plus épaisse, calcaires siliceux à conodontes au Carnien) et des mélanges à blocs du Jurassique moyen également très épais. L'unité de Chatala est incomplète (Fig. 5).

Les séries de l'autochtone relatif : la plate-forme pélagonienne

Deux unités pélagoniennes syn-obduction affleurent en Othrys centrale (l'unité supérieure du Messouvouni-Xerovouni et l'ensemble inférieur ou autochtone relatif Pélagonien) alors qu'une seule unité majeure constitue l'essentiel de l'Othrys orientale (Fig. 2 et 3). Les niveaux les plus anciens sont des niveaux d'arkoses, de conglomérats siliceux et de calcaires à fusulines du Permien. En Othrys orientale ces niveaux reposent sur un soubassement plus métamorphique daté à 307-310 Ma (Ferrière, 1982). Au Trias-Jurassique, les

séries sont constituées pour l'essentiel de calcaires massifs blancs à fossiles benthiques typiques d'une plate-forme peu profonde : algues Dasycladacées, gros lamellibranches de type *Mégalogodon* et *Lithiotis*, foraminifères benthiques nombreux. Ces calcaires sont d'âge Trias inférieur à Dogger-Malm inférieur. Le sommet de la série passe à des radiolarites puis à des mélanges à blocs déposés à l'avant des nappes lors de l'obduction. Les radiolarites déposées sur les calcaires de plate-forme sont datées à l'ouest de l'Othrys centrale où elles sont d'âge jurassique moyen (Bajocien-Bathonien). Cependant, localement, les calcaires infra-radiolaritiques pourraient monter dans la base du Malm (présence de *Conicospirillina basiliensis* Mohler et *Cladocoropsis mirabilis* Felix ; Ferrière, 1982).

LES MODALITÉS DU PROCESSUS D'OBDUCTION : INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Comme cela a été dit précédemment, notre étude dans le secteur de l'Othrys nous permet d'apporter des précisions sur certaines modalités du processus d'obduction (Fig. 6 A-G).

Les premiers signes de convergence après l'expansion de l'océan Maliaque

Naissance d'une subduction : un mécanisme conduisant à l'obduction

Le problème principal concernant la mise en place d'ophiolites est évidemment lié à la forte densité de la lithosphère océanique qui doit être transportée sur une lithosphère continentale moins dense. La solution la plus souvent envisagée pour entraîner du matériel « léger » sous du matériel « dense » (et/ou réciproquement du matériel dense sur du plus léger) est celle d'une subduction intra-océanique conduisant progressivement l'élément continental (ici le Pélagonien) sous la lithosphère océanique de la plaque supérieure. Dans le domaine de l'Océan Maliaque, il existe des témoins d'une telle subduction précédant l'obduction. Ces témoins de subduction se rencontrent notamment dans le massif ophiolitique du Vourinos (Fig. 1) où l'on observe des laves d'âge jurassique moyen (Chiari *et al.*, 2003) à affinités géochimiques de type supra-subduction montrant des anomalies en titane, tantale, niobium notamment (Beccaluva *et al.*, 2005). Outre des basaltes de type MORB, les laves de la nappe ophiolitique du Pinde du Nord comportent également des tholéites d'arc ainsi que des boninites (Saccani *et al.*, 2004, 2011). Il n'existe pas d'arc volcanique clairement identifié, associé à ces ophiolites du Vourinos-Pinde du Nord ou à ceux de l'Othrys. Il est même possible que l'obduction ait eu lieu avant le développement d'un tel arc volcanique. Un arc volcanique calco-alcalin (Paikon) et un bassin arrière-arc (Guevgueli) d'âge jurassique existent à l'est des Hellénides (Fig. 1) (Mercier *et al.*, 1975 ; Ferrière & Stais, 1995 ; Saccani *et al.*, 2008). Cependant, leur

âge précis au sein du Jurassique moyen-supérieur doit être affiné par rapport au processus d'obduction observé en Othrys ou dans le Vourinos (pour les âges du Paikon, voir Ferrière *et al.*, 2001, 2016 ; pour ceux des ophiolites de Guevgueli voir Danelian *et al.*, 1996 et Kukoc *et al.*, 2015). En bref, la présence, dès le Jurassique moyen, d'une subduction à plongement vers l'est, au sein de l'océan Maliaque, est le processus de premier ordre que nous retenons pour expliquer la mise en place des nappes de lithosphère océanique à péridotites (Mega Isoma et Metalleion) sur la croûte continentale pélagonienne (Fig. 6B).

la subsidence syn-convergence de la marge et de la plate-forme pélagonienne

Avant le dépôt des mélanges à blocs et olistolites lié à l'érosion des nappes sus-jacentes, les séries de la marge (surtout la marge proximale) et la plate-forme calcaire pélagonienne, sont caractérisées par des dépôts profonds de radiolarites avec parfois quelques fines calci-turbidites. Cette transition vers des dépôts profonds exprime une subsidence généralisée de la bordure occidentale, à croûte continentale, de l'Océan Maliaque. L'âge jurassique moyen de ces radiolarites, semblable à celui des laves SSZ du Vourinos (cf. supra), indique qu'il s'agit d'un événement lié au développement de la convergence (subduction-obduction). La mise sous contrainte lors du passage à la convergence et le poids des nappes appuyant progressivement sur la bordure de la plaque inférieure sont très probablement les causes de cette subsidence.

Sens de mise en place des nappes syn-obduction

Bien que de nombreuses nappes issues de la lithosphère océanique ou de la marge de l'océan Maliaque existent en Grèce, notamment en Othrys, le sens de mise en place de ces nappes est encore l'objet d'hypothèses contradictoires. Ce débat a commencé très tôt en Grèce, dès l'assimilation des ophiolites à la lithosphère océanique et la mise en évidence du processus d'obduction par Coleman (1971) et Dewey & Bird (1971). Une analyse des différents arguments utilisés a été récemment proposée (Ferrière *et al.*, 2012). Les publications récentes montrent cependant que le problème est toujours d'actualité (Saccani *et al.*, 2011; Ferrière *et al.*, 2012; Robertson, 2012; Bortolotti *et al.*, 2013; Rassios *et al.*, 2019). En ce qui nous concerne, nous considérons que l'océan Maliaque, à l'origine des nappes ophiolitiques helléniques, était situé à l'est du domaine Pélagonien, en raison notamment de structures tectoniques pluri-hectométriques à vergence SW au sein des nappes mais absentes de la couverture crétacée discordante (cf. discussion in Ferrière *et al.*, 2012, 2016). C'est le cas par exemple de grands plis-failles (trois principaux) présents dans les niveaux triasico-jurassiques des nappes issues de la marge proximale. Des structures tectoniques majeures existent également dans l'ensemble pélagonien pourtant constitué de séries calcaires épaisses à bancs massifs, notamment en Othrys centrale. Il s'agit de plis couchés pluri-hectométriques

clairement syn-obduction mais le sens de déversement de ces structures uniquement visibles en falaise n'a pu être déterminé précisément.

Modalités de mise en place des nappes issues de la lithosphère océanique

Les nappes principales à péridotites d'Othrys

L'évolution de la subduction intra-océanique conduit normalement au charriage de la lithosphère océanique de l'unité supérieure (unité SSZ = Supra-Subduction Zone) sur l'ensemble plongeant dans la subduction. Des écailles d'amphibolites présentes à la base des nappes à péridotites ont été datées du Jurassique moyen (Spray *et al.*, 1984). Elles correspondent aux premiers stades d'évolution de l'obduction à savoir le démarrage des nappes de lithosphère océanique SSZ au sein de l'océan. Notre interprétation de la mise en place des nappes majeures à péridotites d'Othrys est la suivante (Fig. 6) :

- i) *La nappe supérieure (Mega Isoma)* : Les laves de cette unité ophiolitique principale sont datées du Jurassique moyen (Ferrière *et al.*, 2015). Il s'agit donc de laves synchrones de la subduction mais leur altération n'a pas permis de préciser leur géochimie. Par comparaison avec l'unité d'Aspropotamos située plus au nord au sein des ophiolites du Pinde du Nord, qui montre une position structurale comparable, des péridotites de même nature et des laves de même âge (Jurassique moyen), on peut admettre que l'unité de Mega Isoma occupait elle aussi une position d'avant-arc (Fig. 6 A-B) selon l'interprétation de Saccani *et al.* (2004, 2011), pour les ophiolites du Pinde du Nord.
- ii) *La nappe ophiolitique intermédiaire (Metalleion)* : cette unité composite est constituée d'une unité de dolérites chevauchant sur une unité essentiellement harzburgitique. Là encore, notamment de par sa nature pétrographique, elle peut être comparée à une unité du Pinde du Nord à savoir l'unité du Vourinos-Dramala, typiquement de type SSZ (Beccaluva *et al.*, 2005). Cependant, alors qu'en Othrys la nappe de Metalleion est située sous celle de Mega Isoma, l'unité harzburgitique de Dramala repose sur celle d'Aspropotamos équivalent probable de Mega Isoma. Des rétro-chevauchements, dont certains, à vergence vers le SE, sont bien exprimés en Othrys-Ouest, permettent d'expliquer cette particularité du dispositif structural d'Othrys (Fig. 6 D-E). Les mélanges à blocs présents sur les laves de l'unité de Mega Isoma pourraient avoir été alimentés par celle de Metalleion, au début du processus d'obduction (Fig. 6D).

Mise en place de la nappe des pillow-lavas de Fourka

La nappe des pillow-lavas de Fourka est un élément majeur essentiellement connu en Othrys. Cette nappe est située entre les nappes ophiolitiques à péridotites et les unités issues de la marge distale (Fig. 2 et 6). La nature tholéitique de type MORB de ces pillows, et leur genèse sur une période assez longue (au minimum de l'Anisien supérieur au Norien compris) conduisent à considérer cette unité comme un élément de la croûte océanique et non pas comme un corps magmatique particulier de type SDR propre aux marges passives volcaniques (Geoffroy, 2005). Leur âge ancien (dès l'Anisien supérieur) proche de l'âge du rifting initial oblige à admettre qu'il s'agit d'un secteur océanique très proche de la marge distale. De ce fait, la mise en place de l'unité de Fourka sur le bloc continental adjacent ne peut pas être liée, comme pour les autres unités ophiolitiques, à une position structurale privilégiée dans le cadre de la subduction jurassique puisque cette unité de Fourka appartient à la plaque inférieure en subduction. On peut alors envisager le développement à la limite entre les deux croûtes océanique et continentale, au début de la convergence, de structures particulières, tel un bombement anticlinal à proximité de la zone de subduction selon un modèle connu dans le Pacifique SW (Dubois *et al.*, 1988). Ce bombement évoluerait ensuite en chevauchement à partir de failles inverses (Fig. 6C). Le développement de ces structures précoces (bombement) serait en outre favorisé par la rencontre avec la croûte continentale plus légère offrant, même amincie, une certaine résistance au raccourcissement. L'importante subsidence observée au niveau de la marge avant l'arrivée des nappes a pu ensuite faciliter le passage de la croûte océanique de Fourka sur cette marge (Fig. 6 A-C). Ces difficultés particulières s'agissant du passage de cette nappe de Fourka sur la marge adjacente sont sûrement une des causes majeures de l'absence de péridotites à la base de cette unité.

Modalités de mise en place des nappes issues de la marge

Le processus d'ensemble est assez simple : les nappes de lithosphère océanique emmènent avec elles les différentes parties de la marge continentale qui correspond à la marge occidentale de l'océan Maliaque. Plusieurs observations faites en Othrys apportent des précisions sur ce processus de mise en place des nappes issues de la marge.

L'empilement des nappes : une inversion tectonique positive

Les différentes nappes issues de la marge (5 nappes majeures) sont empilées dans un ordre précis avec les nappes possédant les séries déposées sur les parties profondes de la marge (marge distale) reposant sur les unités moins profondes de la marge proximale. Les séries des différentes nappes sont assez homogènes et relativement différentes entre elles (Fig. 5). L'absence de nappes possédant des séries intermédiaires entre

les principales unités plaide en faveur d'un passage brutal entre ces différentes nappes et notamment entre les parties distale et proximale de la marge avant l'obduction. Ces observations conduisent à penser que les contacts tectoniques limitant les différentes nappes issues de la marge se sont développés aux dépens d'anciens contacts tectoniques majeurs. Ces accidents seraient les importantes failles normales listriques qui séparaient les différents ensembles de la marge dès le rifting triasique à l'origine de l'Océan Maliaque (Fig. 6 A-F). Le nombre de nappes issues de la marge (5 nappes majeures) et donc le nombre supposé de failles normales syn-rift importantes à l'origine de ces contacts de nappes, est compatible avec cette hypothèse. La régularité de l'empilement des nappes est également un argument en faveur de cette hypothèse. Les failles syn-rift étant généralement inclinées vers l'océan, cette géométrie a pu faciliter la transformation de ces failles normales en contacts chevauchants.

L'unité de Fourka et celles provenant de la marge distale (Loggitsion et Tourla-Trilofon) représentent une Transition Océan-Continent (TOC) affleurant dans de très bonnes conditions, ce qui est plutôt rare. S'agissant du processus d'obduction, la nature contrastée de cette TOC en fait évidemment une zone de faiblesse. Cependant il est à remarquer qu'en dehors de l'unité mineure de Tourla-Trilofon les différents ensembles de la TOC constituent des unités relativement bien conservées lors de l'obduction.

Les mélanges à blocs : des formations syn-obduction témoins de l'avancée des nappes

Lors de l'avancée des nappes, des formations sédimentaires chaotiques à blocs et olistolites ophiolitiques et sédimentaires, se déposent en milieu marin à l'avant des nappes en mouvement (Fig. 6 E-F). Ces mélanges sédimentaires représentent les derniers dépôts sur les différentes séries avant l'arrivée des nappes. En Othrys, ces mélanges sont épais sur certaines unités ophiolitiques (par ex. Mega Isoma, près d'Ekara, Fig. 2 et 4) et sur les unités de la marge proximale ; en revanche, ils sont pratiquement absents des unités de la marge distale. Cette particularité semble indiquer que la majeure partie des unités de la marge distale, peu épaisses, à croûte amincie, ont été très rapidement recouvertes tectoniquement par les unités supérieures, avant que des mélanges significatifs ne puissent s'y développer. Inversement, la forte épaisseur de mélanges sur les séries de la marge proximale (Fig. 6E) peut être mise en relation avec l'épaisseur importante de la croûte de cet élément qui entraîne une difficulté au niveau du sous-charriage et donc une augmentation de l'accumulation des produits d'érosion. Cette forte accumulation serait due, d'une part, à la surélévation des nappes supérieures soumises à l'érosion (ophiolites et unités de la marge distale) et d'autre part, à la durée plus longue de la période de dépôt des mélanges du fait de la faible vitesse du sous-charriage. De façon surprenante, les mélanges déposés

au sommet des séries pélagoniennes sont riches en éléments provenant des nappes ophiolitiques et de la marge distale mais aucun élément typique de la marge proximale n'y a été reconnu. Après un ralentissement dans l'avancée des nappes supérieures au moment du sous-charriage des séries à croûte épaisse de la marge proximale (Fig. 6E), ces nappes supérieures ont semble-t-il repris leur mouvement et atteint la zone pélagonienne en dépassant les unités de la marge proximale. Par la suite, ces dernières, entraînées à la base des nappes supérieures, ont alors recouvert tectoniquement les séries pélagoniennes sans pouvoir fournir de matériel aux mélanges pélagoniens (Fig. 6 F-G).

Les stades tardi-obduction

Le sillon béotien : un bassin d'avant-chaîne

Entre les domaines ayant subi l'obduction au Jurassique (zones internes helléniques) et les zones externes uniquement tectonisées au Tertiaire (Fig. 1) existe un domaine caractérisé par le développement d'un flysch riche en éléments ophiolitiques dès le Tithonien : le « sillon Béotien » (Celet *et al.*, 1976) (Fig. 6G). L'existence de ce bassin particulier de type « bassin d'avant-chaîne » à l'ouest des zones à ophiolites, est aussi un argument en faveur d'une origine orientale des ophiolites.

Surrection locale de l'autochtone relatif pélagonien

La reconstitution des structures avant la transgression crétacée en Othrys, révèle l'existence d'une surrection de l'autochtone relatif Pélagonien à l'est de l'empilement principal des nappes syn-obduction (Fig. 6G). Par comparaison avec d'autres secteurs soumis à des obductions, tels que l'Oman où s'observe de telles structures (fenêtres de Akhdar et Saih Hatat) deux possibilités sont envisageables : i) un rééquilibrage isostatique en fin du processus d'obduction en relation avec la localisation des surcharges occasionnées par la mise en place des nappes et les caractéristiques thermiques syn-obduction, selon l'un des modèles envisagés en Oman (Lippard *et al.*, 1986) ; ii) une rampe tectonique à pendage vers l'est développée dans l'autochtone pélagonien. Le raccourcissement sur cette rampe entraînerait une remontée de l'unité située au-dessus de la rampe, là aussi selon un modèle déjà proposé pour l'Oman (Bernoulli & Weissert, 1987 ; Michard *et al.*, 1989).

CONCLUSIONS

Dans les Hellénides, le massif de l'Othrys offre des conditions particulièrement propices à l'analyse des modalités d'une obduction de par la présence de nombreuses nappes syn-obduction issues de l'océan Maliaque, qu'il s'agisse de la lithosphère océanique (ophiolites) ou de la marge de cet océan transportée sur le bloc continental pélagonien. De plus, cet empilement de nappes est relativement régulier, avec les nappes issues des secteurs distaux profonds (du côté de l'océan Maliaque) sur les unités provenant de secteurs plus

proximaux (du côté de la plate-forme pélagonienne à croûte continentale). Si l'obduction d'âge jurassique moyen-supérieur, développée dans l'ensemble des Dinarides-Hellénides notamment en Grèce et en Albanie, est connue dans ses grandes lignes, nos travaux antérieurs et de nouvelles données, notamment en Othrys occidentale (par ex. datations de diverses unités), nous permettent de préciser certaines modalités de ce processus d'obduction.

La subsidence d'ensemble du bloc continental dès le début de la convergence

Les âges Jurassique moyen des radiolarites des différentes unités de la marge Maliaque et de la plate-forme carbonatée Pélagonienne indiquent une subsidence majeure de ce domaine à croûte continentale lors de la mise sous contrainte en convergence et donc dès le début des processus de subduction-obduction (Fig. 6 B-C). Cette subsidence généralisée va faciliter l'avancée des nappes ophiolitiques, notamment celle de l'unité des pillow-lavas de Fourka.

Les nappes ophiolitiques supérieures : des unités supra-subduction au Jurassique moyen

L'Unité ophiolitique de Mega Isoma, d'âge jurassique moyen (Ferrière *et al.*, 2015), est contemporaine du processus de subduction attesté dès le Jurassique moyen plus au nord (laves de type SSZ du Vourinos-Pinde du Nord). Sa position sommitale dans le dispositif de nappes syn-obduction conduit à considérer que cet ensemble était localisé dans la plaque supérieure au niveau de la subduction intra-océanique. Par analogie avec la nappe du Pinde du Nord (Saccani *et al.*, 2004), un contexte d'avant-arc est envisageable pour l'origine de cette unité de Mega Isoma. De même, l'unité ophiolitique de Metalleion est comparable à celle du Vourinos-Dramala située plus au nord. Nous montrons cependant qu'un rétro-charriage a dû affecter le dispositif initial acquis lors de la mise en place des nappes de Mega Isoma et Metalleion (Fig. 6 D-F).

Un mécanisme de mise en place particulier : la nappe ophiolitique de Fourka issue de la plaque océanique infra-subduction

La présence de cette unité de Fourka, essentiellement développée en Othrys, permet d'affiner le processus d'obduction. L'âge le plus ancien observé dans cette unité des pillow-lavas de Fourka (Anisien supérieur) et leur géochimie de type MORB, conduisent à placer cet ensemble initial en domaine océanique et plus précisément en bordure de la marge continentale. Ce matériel océanique s'est donc initialement formé dès le Trias à partir d'une dorsale océanique indépendamment de la subduction intra-océanique du Jurassique moyen. Il s'agit donc d'une nappe issue de la plaque infra-subduction au Jurassique moyen. Le mécanisme de mise en place de cette nappe de Fourka est donc différent

du mécanisme plus classique évoqué précédemment pour les nappes issues de la plaque supra-subduction. La position de la nappe de Fourka, reposant directement sur les séries de la marge distale, conduit à envisager une mise en place à l'avant des nappes ophiolitiques principales (Fig. 6C). Le mécanisme envisagé est le développement à la limite entre les croûtes océanique et continentale (TOC : Transition Océan-Continent) d'un bombement anticlinal à proximité de la zone de subduction, évoluant par la suite en chevauchement lors de l'avancée des nappes ophiolitiques majeures (Fig. 6C). Cette particularité et le passage de la nappe de Fourka sur la croûte continentale adjacente, même amincie, sont des éléments qui permettent d'expliquer la perte de la partie inférieure de la lithosphère océanique au niveau de cette unité.

Les nappes issues de la marge Maliaque : un processus irrégulier d'inversion tectonique

La présence de nombreuses nappes syn-obduction issues de la marge Maliaque permet de préciser les modalités d'évolution de ce domaine au cours de l'obduction.

Développement des contacts tectoniques à la base des nappes issues de la marge

Le nombre de nappes issues de la marge et les importantes différences de faciès entre les séries de nappes contiguës (absence de nappes à séries intermédiaires) nous ont conduits à admettre que la majeure partie des contacts de base de ces nappes s'est développée aux dépens de failles listriques nées lors du rifting au Trias moyen puis inversées en régime compressif durant le Jurassique moyen. Il s'agit là d'un processus d'inversion tectonique positive.

L'emplacement des nappes : des avancées irrégulières

L'absence de mélanges sur les nappes issues de la marge distale montre que la majeure partie de celles-ci ont été sous-charriées très rapidement sous l'unité ophiolitique de Fourka, en raison de leur croûte continentale peu épaisse et de leur forte profondeur accentuée par la subsidence dès le Jurassique moyen. Inversement, l'épaisseur importante de la croûte continentale de la marge proximale engendre des difficultés au niveau du sous-charriage de cet élément. La conséquence de ces difficultés est une forte épaisseur de mélanges sur les séries de cette partie proximale de la marge dues à une forte érosion liée à la surrection des nappes et à une longue durée de sédimentation en raison d'une faible vitesse de recouvrement des séries chevauchées (Fig. 6D-E). Il en est de même sur la plate-forme pélagonienne où des mélanges épais se déposent, en raison de la très forte épaisseur de la croûte continentale de ce domaine. L'analyse des blocs indique que les nappes issues de la marge proximale n'ont pas fourni d'éléments à ces mélanges et qu'elles ont donc été probablement entraînées sur le domaine Pélagonien alors qu'elles étaient déjà sous les nappes supérieures et non pas à l'avant de celles-ci (Fig. 6F).

Les stades tardifs de l'obduction

Parmi les conséquences de l'obduction, avant la transgression du Crétacé, on peut citer (Fig. 6G) :

- i) la surrection, à l'est de l'empilement principal des nappes syn-obduction, de l'autochtone relatif pélagonien. Les causes envisageables, non incompatibles, sont un réajustement isostatique et/ou les effets d'une rampe présente dans cet autochtone ;
- ii) le développement d'un bassin d'avant-chaîne à l'ouest du domaine des nappes syn-obduction : le sillon béotien. Ce bassin sédimentaire riche en matériel détritique d'origine ophiolitique, s'avère être oblique sur les zones isopiques anté-obduction mais il se situe toujours en bordure des nappes ophiolitiques. Ce bassin qui naît en relation avec la présence de nappes importantes évoque un bassin flexural d'avant-chaîne. C'est là encore un argument en faveur d'une origine orientale des ophiolites.

Un ou plusieurs modèle(s) d'obduction

Grâce aux caractéristiques favorables du secteur étudié (Othrys) de nombreuses précisions ont été obtenues sur le processus d'obduction depuis les premiers indices de convergence au Jurassique moyen (par ex. subsidence d'ensemble) jusqu'aux conséquences finales de l'obduction (bassin avant-chaîne, rééquilibrage isostatique) en passant par l'essentiel du processus actif, la mise en place des différentes nappes obduites. Ces précisions concernent un modèle souvent proposé de façon globale pour des exemples d'obduction avec une subduction initiale intra-lithosphère océanique et l'obduction d'importantes nappes appartenant à la plaque supra-subduction. C'est notamment le cas pour les ophiolites des Dinarides *s.l.* (Vourinos-Pinde du nord en Grèce, Mirdita en Albanie, Zlatibor en ex-Yougoslavie) ou encore les ophiolites du Troodos à Chypre et du Semail en Oman. Cependant les ophiolites n'apparaissent pas toujours sous la forme d'importantes nappes avec des flèches d'échelle hectométrique. Ainsi en Nouvelle-Zélande, les « Dun Mountain Ophiolites » mises en place au Permien affleurent selon un linéament de plus de 1 000 km de long sur quelques km (de 5 à 10 km) de large. Divers modèles ont été proposés pour ces ophiolites : un modèle classique d'ophiolites d'avant-arc (Robertson *et al.*, 2019) mais aussi des modèles faisant intervenir des subductions multiples (Coombs *et al.*, 1976) ou des dispositifs de type arrière-arc comparables par exemple au domaine actuel des Tonga-Kermadec (Ferrière, 1987).

Remerciements

Les auteurs adressent leurs remerciements sincères au comité éditorial (Didier Torz et Alain Blicck) ainsi qu'aux relecteurs (Olivier Averbuch et Fabien Graveleau) pour leur patience, leur efficacité et leurs corrections avisées. Nous tenons à remercier également les organismes et les personnes qui ont permis de réaliser nos travaux au laboratoire et sur le terrain : le Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG, UMR 8187) et le CNRS-INSU au plan financier, avec la mise en œuvre fiable et efficace de Monique Gentric, ainsi que Marion Delattre, Cindy Maliverney, Philippe Recourt et Sandra Ventalon pour les travaux de laboratoire et les autres urgences techniques. Remerciements sincères à toutes et à tous.

BIBLIOGRAPHIE

- ANONYMOUS (1972). — Penrose field conference on ophiolites. *Geotimes*, **17** (12) : 24-25.
- BARTH M.G. & GLUHAK M.T. (2009). — Geochemistry and tectonic setting of mafic rocks from the Othrys Ophiolite, Greece. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, **157** : 23-40.
- BAUMGARTNER P.O. (1985). — Jurassic sedimentary evolution and nappe emplacement in the Argolis peninsula (Peloponnesus, Greece). *Denkschriften der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft*, **99** : 111 p.
- BECCALUVA L., COLTORTI M., SACCANI E. & SIENA F. (2005). — Magma generation and crustal accretion as evidenced by supra-subduction ophiolites of the Albanide-Hellenide Subpelagonian zone. *The Island Arc*, **14** : 551-563.
- BECCALUVA L., OHNENSTETTER D., OHNENSTETTER M. & PAUPY A. (1984). — Two magmatic series with island arc affinities within the Vourinos ophiolite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **85** : 253-271.
- BERNOULLI D. & LAUBSCHER H. (1972). — The palinspastic problem of the Hellenides. *Eclogae Geol. Helvet.*, **65** : 107-118.
- BERNOULLI D. & WEISSERT H. (1987). — The upper Hawasina nappes in the central Oman Mountains : stratigraphy, palinspastics and sequence of nappe emplacement. *Geodynamica Acta*, **1** (1) : 47-58.
- BORTOLOTTI V., CHIARI M., MARCUCCI M., PHOTIADES A., PRINCIPI G. & SACCANI E. (2008). — New geochemical and age data on the ophiolites from the Othrys area (Greece): implication for the Triassic evolution of the Vardar Ocean. *Ophioliti*, **33** (2) : 135-151.
- BORTOLOTTI V., CHIARI M., MARRONI M., PANDOLFI L., PRINCIPI G. & SACCANI E. (2013). — Geodynamic evolution of ophiolites from Albania and Greece, Dinaric-Hellenic belt : one, two or more oceanic basins?. *International Journal of Earth Sciences*, **102** : 738-811.
- BRUNN J.H. (1956). — Contribution à l'étude du Pinde septentrional et d'une partie de la Macédoine occidentale. *Annales Géologiques des Pays Helléniques*, **7** : 1-358.
- BRUNN J.H. (1959). — La dorsale médio-Atlantique et les épanchements ophiolitiques. *Comptes rendus sommaires des sciences de la Société géologique de France*, **8** : 234-237.
- CELET P., CLEMENT B. & FERRIÈRE J. (1976). — La zone béotienne en Grèce : Implications paléogéographiques et structurales. *Eclogae Geol. Helvet.*, **69** (3) : 577-599.
- CELET P., COURTIN B. & FERRIÈRE J. (1980). — Les ophiolites des Hellénides centrales dans leur contexte géotectonique. In: *Ophiolites (Proceedings of the International Ophiolite Symposium, Cyprus, 1979)* : 360-371.
- CHIARI M., BORTOLOTTI V., MARCUCCI M., PRINCIPI G. & PHOTIADES A. (2003). — The Middle Jurassic siliceous sedimentary cover at the top of the Vourinos Ophiolite (Greece). *Ophioliti*, **28** (2) : 95-103.
- COLEMAN R.-G. (1971). — Plate tectonic emplacement of upper mantle peridotites along continental edges. *Jl. Geophys. Res.*, **76** : 1212-1222.
- COOMBS D.S., LANDIS C.A., NORRIS R.J., SINTON J.M., BURNS D.J. & CRAW D. (1976). — The Dun Mountain Ophiolite belt, New Zealand, Its tectonic setting, constitution, and origin, with special reference to the southern portion. *Amer. Jl. Science*, **276** : 561-603.
- DANELIAN T., ROBERTSON A.H.F. & DIMITRIADIS S. (1996). — Age and significance of radiolarian sediments within basic extrusives of the marginal basin Guevgueli Ophiolite (northern Greece). *Geol. Mag.*, **133** : 127-136.
- DERCOURT J. (1970). — L'expansion océanique actuelle et fossile : ses implications géotectoniques. *Bull. Soc. Géol. France*, **XII** (7) : 261-317.
- DERCOURT J. (1972). — The Canadian Cordillera, the Hellenides and the seafloor spreading theory. *Can. Jl. Earth Sci.*, **9** : 709-743.
- DEWEY J.F. & BIRD J.M. (1971). — Origin and emplacement of the ophiolite suite: Appalachian ophiolites in Newfoundland. *Jl. Geophys. Res.* **76** : 3179-3206.
- DILEK Y. & NEWCOMB S. (2003). — Ophiolite Concept and the Evolution of Geological Thought. *Geological Society of America, Special Paper* **373** : 504 p.
- DUBOIS J., DEPLUS C., DIAMENT M., DANIEL J. & COLLOT J.Y. (1988). — Subduction of the Bougainville seamount (Vanuatu): mechanical and geodynamic implications. *Tectonophysics*, **149** : 111-119.
- FERRIÈRE J. (1972). — Sur l'importance des déplacements tangentiels en Othrys centrale au NE d'Anavra (Grèce). *C. R. Acad. Sci. Paris*, **274** : 174-176.
- FERRIÈRE J. (1974). — Étude géologique d'un secteur des zones helléniques internes sub-pélagoniennes (massif de l'Othrys, Grèce orientale). Importance et signification de la période

- orogénique anté-Crétacé supérieur. *Bull. Soc. Géol. France*, **XVI** (5) : 543-562.
- FERRIÈRE J. (1976). — Sur la signification des séries du massif de l'Othrys (Grèce continentale) : la zone isopique Maliaque. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **96** (2) : 121-134.
- FERRIÈRE J. (1982). — Paléogéographies et tectoniques superposées dans les Hellénides internes au niveau de l'Othrys et du Pelion (Grèce). *Soc. Géol. Nord*, **8** : 970 p.
- FERRIÈRE J. (1985). — Nature et développement des ophiolites helléniques du secteur Othrys-Pelion. *Ofioliti*, **10** (2-3) : 255-278.
- FERRIÈRE J. (1987). — Nouvelle-Zélande : quelques aspects de la « tectonique alpine » post-Carbonifère d'une chaîne péri-Pacifique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **305**, II : 615-618.
- FERRIÈRE J., BAUMGARTNER P.O. & CHANIER F. (2016). — The Maliac Ocean : the origin of the Tethyan Hellenic Ophiolites. *Intern. Jl. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*, **105** (7) : 1941-1963.
- FERRIÈRE J., BONNEAU M., CARIDROIT M., BELLIER J.P., GORICAN S. & KOLLMANN H. (2001). — Les nappes tertiaires du Paikon (zone du Vardar, Macédoine, Grèce) : arguments stratigraphiques pour une nouvelle interprétation structurale. *C. R. Acad. Sci. Earth Planet. Sci.*, **332** : 695-702.
- FERRIÈRE J., CHANIER F., BAUMGARTNER P.O., CARIDROIT M., BOUT-ROUMAZEILLES V., GRAVELEAU F., DANELIAN T. & VENTALON. S (2015). — The evolution of the Triassic-Jurassic oceanic lithosphere: insights from the supra-ophiolitic series of Othris (continental Greece). *Bull. Soc. Géol. France*, **186** (6) : 71-84.
- FERRIÈRE J., CHANIER F. & DITBANJONG P. (2012). — The Hellenic ophiolites: eastward or westward obduction of the Maliac Ocean, a discussion. *Intern. Jl. Earth Sci.*, **101** : 1559-1580.
- FERRIÈRE J. & STAIS A. (1995). — Nouvelle interprétation de la suture téthysienne vardarienne d'après l'analyse des séries de Peonias (Vardar oriental, Hellénides internes). *Bull. Soc. Géol. France*, **166** (4) : 327-339.
- GEOFFROY L. (2005). — Volcanic passive margin. *C. R. Géosciences*, **337** : 1395-1408.
- GHIKAS C., DILEK Y. & RASSIOS A. (2010). — Structure and tectonics of a subophiolitic mélanges in the western Hellenides (Greece) : Implications for ophiolite emplacement tectonics. *International Geology Review*, **52** : 423-453.
- GLENNIE K.W., BOEUF M.G.A., HUGUES CLARKE M.W., MOODY-STUART M., PILAAR W.F.H. & REINHARDT B.M. (1973). — Late Cretaceous nappes in Oman mountains and their geologic evolution. *Am. Assoc. Petroleum Geologists Bull.*, **57** : 5-27.
- HYNES A. (1974). — Igneous activity at the birth of an ocean basin in eastern Greece. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **11** : 842-853.
- HYNES A., NISBET E.G., SMITH A.G., WELLAND M.J.P. & REX D.C. (1972). — Spreading and emplacement ages of some ophiolites in the Othris region (eastern central Greece). *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft.*, **123** : 455-468.
- JONES G. & ROBERTSON A.H.F. (1991). — Tectono-stratigraphy and evolution of the Mesozoic Pindos Ophiolite and related units, northwestern Greece: an integrated supra-subduction zone spreading and subduction-accretion model. *Journal of the Geological Society, London*, **148** : 267-288.
- KUKOC D., GORICAN S., KOSIR A., BELAK M., HALAMIC J. & HRVATOVIC H. (2015). — Middle Jurassic age of basalts and the post-obduction sedimentary sequence in the Guevgueli Ophiolite Complex (Republic of Macedonia). *Intern. Jl. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*, **104** : 435-447.
- LEFEVRE C., CABANIS B., FERRIÈRE J., THIEBAULT F & PLATEVOET R. (1993). — Mise en évidence d'une dualité dans le volcanisme triasique hellénique : apport de la géochimie des éléments traces. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **II** : 1311-1318.
- LIPPARD S.J., SHELTON A.W. & GASS I.G. (1986). — The ophiolite of northern Oman. *The Geological Society, Memoir* **11** : 178 p.
- MERCIER J., VERGELY P. & BEBIEN J. (1975). — Les ophiolites helléniques « obductées » au Jurassique supérieur sont-elles les vestiges d'un Océan téthysien ou d'une mer marginale péri-européenne ? *C. R. Somm. Soc. Géol. France*, **17** : 108-112.
- MICHARD A., LE MER O., GOFFE B. & MONTIGNY R. (1989). — Mechanism of the Oman mountains obduction onto the Arabian continental margin, reviewed. *Bull. Soc. Géol. France*, (8), **V** (2) : 241-252.
- MIYASHIRO A. (1973). — The Troodos ophiolitic complex was probably formed in an island arc. *Earth and Planetary Science Letters*, **19** : 218-224.
- MONJOIE P., LAPIERRE H., TASHKO A., MASCLE G., DECHAMP A., MUCEKU B. & BRUNET P. (2008). — Nature and origin of the Triassic volcanism in Albania and Othrys: a key to understanding the Neo-Tethys opening?. *Bull. Soc. Géol. France*, **179** : 411-425.
- MOORES E.G. (1969). — Petrology and structure of the Vourinos Ophiolitic Complex of Northern Greece. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* **118** : 1-74.
- PHOTIADES A., SACCANI E. & TASSINARI R. (2003). — Petrogenesis and tectonic setting of volcanic rocks from the Subpelagion ophiolitic melange in the Agoriani area (Othris, Greece). *Ofioliti*, **28** : 121-135.
- RASSIOS A., GRIVAS E., KONSTANTOPOULOU G. & VACONDIOS I. (1994). — The geometry of structures forming around the ductile-brittle transition in the Vourinos-Pindos-Othris Oceanic Slab. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, **XXX** (2) : 109-121.
- RASSIOS A.H.E. & SMITH A.G. (2000). — Constraints on the formation and emplacement of western Greek ophiolites (Vourinos, Pindos and Othris) inferred from deformation structures in peridotites. *In*: DILEK Y., MOORES E.M., ELTHON D.A. & NICOLAS A. eds, *Ophiolites and oceanic crust: new insights*



- from field studies and oceanic drilling program. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* **349** : 473–483.
- RASSIOS E. & DILEK Y. (2009). — Rotational deformation in the Jurassic Mesohellenic ophiolites, Greece, and its tectonic significance. *Lithos*, **108** : 207–223.
- RASSIOS A.H.E. & MOORES E.M. (2006). — Heterogeneous mantle complex, crustal processes and obduction kinematics in a unified Pindos-Vourinos ophiolitic slab (northern Greece). In: ROBERTSON A.H.F. & MOUNTRAKIS D. eds, Tectonic development of the eastern Mediterranean region. *Geological Society, London, Special Publication* **260** : 237–266.
- RASSIOS A., GHIKAS C., DILEK Y. & KOSTOPOULOS D. (2019). — « Rootless » ophiolites above the exhuming Pelagonian Core Complex, Northern Greece. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, **54** (1) : 60–94.
- ROBERTSON A.H.F. (2012). — Late Palaeozoic-Cenozoic tectonic development of Greece and Albania in the context of alternative reconstructions of Tethys in the eastern Mediterranean region. *International Geology Review*, **54** : 373–454.
- ROBERTSON A.H.F., CAMPBELL H.J., JOHNSTON M.R., & PALAMAKUMBRA R. (2019). — Construction of a Paleozoic-Mesozoic accretionary orogeny along the active continental margin of SE Gondwana (South Island, New Zealand): summary and overview. In ROBERTSON A.H.F. ed, Paleozoic–Mesozoic Geology of South Island, New Zealand: Subduction-related Processes Adjacent to SE Gondwana. *Geological Society, London, Memoirs*, **49** : 331–373.
- SACCANI E., BECCALUVA L., COLTORTI M. & SIENA F. (2004). — Petrogenesis and tectono-magmatic significance of the Albanide-Hellenide subpelagonian ophiolites. *Ofioliti*, **29** : 75–93.
- SACCANI E., BECCALUVA L., PHOTIADES A. & ZEDA O. (2011). — Petrogenesis and tectono-magmatic significance of basalts and mantle peridotites from the Albanian-Greek ophiolites and sub-ophiolitic mélanges. New constraints for the Triassic-Jurassic evolution of the Neo-Tethys in the Dinaride sector. *Lithos*, **124** : 227–242.
- SACCANI E., BORTOLOTTI V., MARRONI M., PANDOLFI L., PHOTIADES A. & PRINCIPI G. (2008). — The Jurassic Association of Back-arc basin ophiolites and calc-alkaline volcanics in the Guevgueli Complex (Northern Greece): implication for the evolution of the Vardar Zone. *Ofioliti*, **33** (2) : 209–227.
- SACCANI E. & PHOTIADES A. (2004). — Mid-ocean ridge and supra-subduction affinities in the Pindos ophiolites (Greece): implications for magma genesis in a forearc setting. *Lithos*, **73** : 229–253.
- SMITH A.G., HYNES A.J., MENZIES M., NISBET E.G., PRICE I., WELLAND M.J. & FERRIÈRE J. (1975). — The stratigraphy of the Othris mountains, eastern Central Greece: a deformed Mesozoic continental margin sequence. *Eclogae Geologicae Helveticae*, **68** : 463–481.
- SMITH A.G. & RASSIOS A. (2003). — The evolution of ideas for the origin and emplacement of the western Hellenic ophiolites. In: DILEK Y. & NEWCOMB S. eds, Ophiolite concept and the evolution of geological thought. *Geol. Soc. Amer. Spec. Pap.* **373** : 337–350.
- SPRAY J.G., BEBIEN J., REX D.C. & RODDICK J.C. (1984). — Age constraints on the igneous and metamorphic evolution of the Hellenic-Dinaric ophiolites. In: DIXON J.E. & ROBERTSON A.H.F. eds, The geological evolution of the Eastern Mediterranean. *Geol. Soc. London Spec. Publ.* **17** : 619–627.
- VERGELY P. (1984). — *Tectonique des ophiolites dans les Hellenides internes. Conséquences sur l'évolution des régions téthysiennes occidentales*. Thèse de doctorat, Université de Paris-Sud Orsay, 2 vol. : 250 & 411 p.
- VRIELYNCK B. (1982). — Evolution paléogéographique et structurale de la presqu'île d'Argolide (Grèce). *Rev. Géogr. Phys. Geol. Dyn.*, **23** (4) : 277–288.

RÉSUMÉ GRAND PUBLIC

ANALYSE D'UN PROCESSUS D'OBDUCTION : L'EXEMPLE DE L'OcéAN TÉTHYSIEN MALIAQUE (HELLENIDES)

Parmi les processus liés à la convergence des plaques, les plus classiques et les plus représentés sont les subductions (par ex. autour de l'Océan Pacifique) et les collisions (par ex. Alpes et Himalaya). Un troisième processus est l'obduction, marqué par la présence dans les chaînes de montagnes d'ophiolites correspondant au charriage de lithosphère océanique sur une lithosphère continentale plus « légère ». Ce processus a été défini et analysé à partir de la révolution de la Tectonique des plaques vers le début des années 1970. Dans un premier temps une analogie entre ophiolites et lithosphère océanique née au niveau d'une dorsale médio-océaniques a été établie. On a pu établir ainsi que les ophiolites et la lithosphère océanique étaient constituées d'une partie crustale (pillow-lavas, filons basiques, gabbros et cumulats de péridotites) surmontant un manteau fondamentalement péridotitique. La surface de séparation entre manteau lithosphérique et croûte sus-jacente correspond au MOHO. Une décennie après, il est apparu que nombre de ces ophiolites présentaient des caractéristiques pétrographiques connues au sein des ensembles volcaniques situés dans la plaque supérieure des zones de subduction. Cette observation a conduit à admettre que ces ophiolites correspondaient à des éléments océaniques provenant de la plaque supérieure de zones de subduction intra-océanique. La plaque inférieure s'enfonce progressivement au niveau de la subduction entraînant ainsi parfois des éléments de lithosphère continentale sous la lithosphère océanique supra-subduction. Ce type de processus permet alors d'expliquer l'enfoncement d'une lithosphère moins dense (continentale) sous une lithosphère plus dense (océanique). Pour arriver à ce résultat, il apparaît nécessaire d'envisager la naissance de certaines zones de subduction, non pas sur les marges des continents, mais au cœur des océans. Il s'agit alors de subductions de type Océan/Océan. La genèse de subductions Océan/Océan nécessite l'existence de différentes zones de faiblesse intra-océaniques, au niveau de la dorsale médio-océanique ou de failles transformantes. Naturellement de nombreux débats subsistent quant à la nature et à la mise en place tectonique des ophiolites. Lorsque des collisions succèdent aux obductions, les mécanismes d'obduction sont en partie oblitérés. C'est le cas dans les Alpes occidentales. En revanche, il existe des exemples où la collision n'a pas encore eu lieu ou est encore assez peu marquée : c'est le cas des ophiolites d'Oman, de Chypre mais aussi des ophiolites téthysiennes des Dinarides-Hellénides qui sont l'objet de cette publication. La qualité des affleurements présents en Grèce, notamment dans le massif de l'Othrys où les nappes syn-obduction (séries et mise en place) sont particulièrement bien datées, permet de préciser certaines modalités du processus d'obduction de l'Océan Téthysien (Océan Maliaque) au Jurassique moyen-supérieur. Ainsi, chaque élément géologique intégré dans le processus d'obduction a pu être analysé : i) les unités supérieures riches en péridotites sont classiquement attribuées à des ophiolites de type supra-subduction ; ii) une unité de lithosphère océanique provenant de la plaque plongeante a été identifiée sous les principales nappes ophiolitiques et son mode de mise en place est discuté ; iii) les contacts tectoniques à la base des principales nappes liées à l'obduction sont hérités des grandes failles normales qui se sont développées sur l'ancienne marge passive de l'Océan Maliaque (failles issues du rifting) ; iv) l'analyse des mélanges à blocs formés en domaine marin à l'avant des nappes en mouvement, permet de préciser les caractéristiques et la chronologie de la mise en place des différentes nappes.

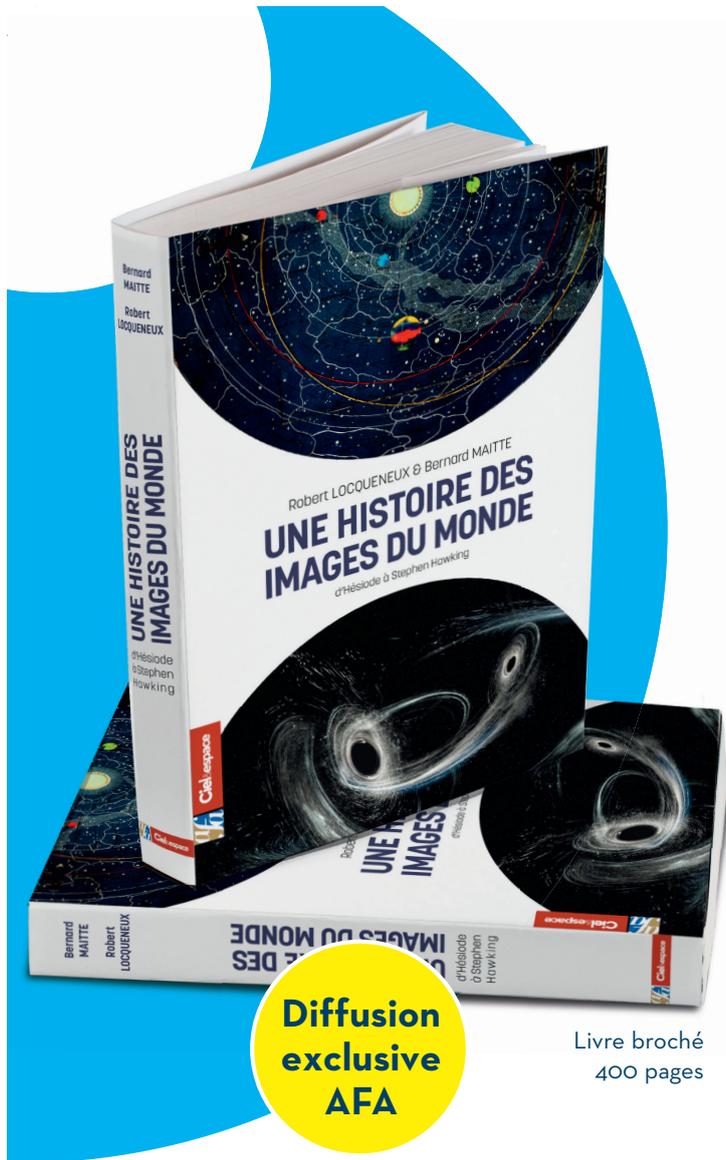
ALL AUDIENCE ABSTRACT

ANALYSIS OF AN OBDUCTION PROCESS: THE EXAMPLE OF THE TETHYAN MALIAC OCEAN (HELLENIDES)

Among the processes related to plate convergence, the most common are subduction zones (e.g. around the Pacific Ocean) and collisional orogens (e.g. Alps and Himalayas). A third one is the obduction process, attested by the presence in the mountain belts of ophiolites corresponding to the thrusting of the oceanic lithosphere over a "lighter" continental lithosphere. This process was defined and analysed from the Plate Tectonics revolution in the early 1970s. Initially an analogy between ophiolites and oceanic lithosphere created at mid-oceanic ridge has been proposed. It has thus been demonstrated that the ophiolites and the oceanic lithosphere consist both of a crustal part (pillow-lavas, basic dykes, gabbros and peridotitic cumulates) overlying the mantle peridotites. The surface between the oceanic mantle and the overlying crust corresponds to the MOHO. A decade later, it appeared that many of these ophiolites had petrographic characteristics known in the volcanic complexes located on the upper plate of some subduction zones. This observation shows that these types of ophiolites originated from the upper plate of intra-oceanic subduction zones. The lower oceanic domain gradually



sinks in the subduction and may drive some elements of continental nature below the overriding oceanic lithosphere. Such process can account for the plunge of lighter lithosphere (continental) beneath dense lithosphere (oceanic). Various processes have been considered to explain the onset of this type of Ocean/Ocean subductions. They involve various zones of intra-oceanic weakness that can be the mid-oceanic ridge or transform faults. Many debates remain on the nature and tectonic emplacement of ophiolites. If collision follows obduction, the obduction mechanisms are naturally partially obliterated, such as in the western Alps for example. In other areas, there is no major collision: this is the case of the ophiolites of Oman, of Cyprus and also of the Tethyan ophiolites of the Dinarides-Hellenides that are described in this paper. The quality of outcrops in Greece, in particular in the Othrys massif where the obduction nappes are particularly well dated, gives opportunities to describe precisely the Jurassic obduction process of the Tethyan Ocean (Maliac Ocean). Thus, each geological element integrated in the obduction process could be analysed: i) the upper peridotite-rich units are attributed to ophiolites of supra-subduction type; ii) an oceanic lithosphere unit issued from the downgoing plate has been identified and its mode of tectonic emplacement is proposed; iii) the basal contacts of the obduction nappes are inherited from the large normal faults of the former passive margin that originated during the rifting of the Maliac Ocean; iv) the analysis of the mélanges formed at the front of the moving thrust sheets permitted us to precise the characters and timing of the emplacements of the different nappes.



UNE HISTOIRE DES IMAGES DU MONDE

d'Hésiode à Stephen Hawking

De l'Antiquité à nos jours, cet ouvrage met en scène l'évolution des idées sur le monde, ses possibles origine, finitude et structure. Il fait sentir les atmosphères propres à chaque période en puisant dans des écrits poétiques, littéraires, religieux, philosophiques ou scientifiques.

Ces œuvres témoignent des différentes conceptions que l'homme a eues de sa place dans l'Univers, de son éventuelle singularité : elles revisitent les traditions, ouvrent de nouvelles perspectives, nourrissent les débats nés de changements de contextes ou de méthodes.

Au cours de son histoire, la construction de l'astronomie n'a jamais suivi un long fleuve tranquille. Laissez-vous entraîner dans les bouillonnements de cette passionnante aventure collective multiséculaire.

LES AUTEURS

Robert Locqueneux est professeur émérite à l'université de Lille. Ses recherches et son enseignement ont porté, d'abord sur la chimie quantique, la thermodynamique et la mécanique statistique, ensuite sur l'histoire de la physique. Il a publié de nombreux ouvrages dans ce domaine.

Bernard Maitte est professeur émérite d'histoire et d'épistémologie des sciences à l'université de Lille. Fondateur du Forum des sciences, directeur d'une formation de journalistes scientifiques, il a obtenu de prix Jean Rostand pour La Lumière (Seuil) et le prix Jean Perrin de popularisation de la physique.

Livre broché
400 pages

Diffusion
exclusive
AFA

Disponibilité : juillet 2020



Bon de souscription à retourner
avec son règlement par chèque, à :
AFA, 17 rue Émile-Deutsch-de-la-Meurthe
75014 Paris

Version papier : 21 €
France métropolitaine : frais de port inclus
Hors France métropolitaine : + 12,50 € de port
Version numérique : 13 €

Commande en ligne :
<https://boutique.afastronomie.fr/l-histoire-monde>

Nom

Prénom

Adresse

Code postal Ville

Pays

Mail

(Obligatoire pour la version numérique)

En application de l'article 27 de la loi du 06/01/1978, les informations ci-dessus sont indispensables au traitement de votre commande et sont communiquées aux destinataires la traitant. Elles peuvent donner lieu à l'exercice du droit d'accès et de rectification auprès de nos services. Vous pouvez vous opposer à ce que vos nom et adresse soient cédés ultérieurement. Siège social : AFA 17, rue Émile-Deutsch-de-la-Meurthe 75014 Paris.

THE FORMER LEAD AND ZINC DISTRICT OF EASTERN BELGIUM AND THE CALAMINARIAN GRASSLANDS AFTER THE END OF EXPLOITATIONS

L'ancien district plombo-zincifère de l'Est de la Belgique et les pelouses calaminaires après la fin des exploitations

by Léon DEJONGHE

Belgian Institute of Natural Sciences, Geological Survey of Belgium, 13 Jenner street, B 1000 Brussels, Belgium ;
email: leon.dejonghe@naturalsciences.be

Abstract

In Eastern Belgium, lead and zinc deposits have been intensively exploited in the past, mainly in the XIXth century. It was one of the most important European mining areas during the Middle Ages up to the onset of the Industrial Revolution, as illustrated by paintings of Bastiné and Maugendre. This region was also the object of political tensions at the origin of the creation of the neutral territory of Moresnet. However, in spite of this importance, no attention has been provided to its geological and mining heritage after closure of the metal mines. Today, traces of the former mining exploitations nearly completely disappeared from the landscape. Calaminarian grasslands are the most visible remnants of past mining operations, sheltering an anomalous metallophyte flora. They constitute remarkable ecosystems which are now the subject of particular protection.

Résumé

Dans l'Est de la Belgique, les gisements plombo-zincifères ont été intensivement exploités, principalement au cours du XIX^e siècle. Ils constituaient un des plus importants districts miniers européens pendant le Moyen-Âge jusqu'à l'aube de la révolution industrielle comme en témoignent les peintures de Bastiné et Maugendre. Cette région fut également l'objet de tensions politiques à l'origine de la création du territoire neutre de Moresnet. Cependant, en dépit de cette importance, aucune attention particulière n'a été dévolue à son héritage géologique et minier après la fermeture des mines métalliques. Aujourd'hui, les traces des anciennes exploitations ont presque complètement disparu du paysage. Les pelouses calaminaires abritant une flore métallophyte singulière sont les vestiges les plus visibles de ces anciennes activités minières. Elles constituent des écosystèmes remarquables qui sont l'objet d'une protection particulière.

INTRODUCTION - THE MINING DISTRICT

In Belgium, there are three areas where lead-zinc deposits were exploited, the most important district being that of the Verviers Synclinorium located in Eastern Belgium. (Dejonghe, 1998). In this area, lead and zinc deposits have indeed been intensively exploited in the past, since prehistoric times and the Middle Age, but mainly during the XIXth century. Its apogee was between 1850 and 1870. The last mine (Roer) was closed in 1936. Their main geological and mining features are described by Dejonghe & Jans (1983). Shortly, most of the ore deposits are vein-type deposits located in fractures transverse to the folding and the faulting. These fractures are related to the Rhine graben tectonics. Most of them are crossing the sedimentary carbonate Devonian and Dinantian formations. Some also cross the Famennian and Namurian detrital rocks. In many cases, irregular bodies (the so-called "amas" in French) were connected to the lodes and were located at lithostratigraphic and tectonic contacts between various lithological formations. Some deposits are linked to the Palaeozoic-Mesozoic unconformity and would originate from the reworking on short distance of pre-existing

ore-deposits, likely in karstic traps. An extensive and detailed description of each of the ore deposits existing between Liège and Aachen is given by Dejonghe *et al.* (1993). Petrographical, mineralogical, geochemical data, stable isotopes (C and O) and fluid inclusions characterizing the "calamine" non-sulfide Zn-Pb deposits of Belgium are specified by Boni *et al.* (2007) and Coppola *et al.* (2008).

LA CALAMINE (MORESNET) ORE DEPOSIT

The region situated between Liège and Aachen produced about 1 260 000 tons of zinc (metal) and 133 000 tons of lead (metal). The largest deposit, that of La Calamine (Kelmis in German), yielded about a total of 760 000 tons of zinc (metal) during all its mining activity (Dejonghe *et al.*, 1993, p. 443). Its zinc production topped that of all other Belgian deposits altogether. The ore body was exhausted in 1879 (small activities lasted up to 1884). It was one of the most important European mining areas during the Middle Ages up to the onset of the industrial revolution. Its importance is illustrated by paintings of Bastiné and Maugendre, respectively dating back to 1843 and 1850 (Figs. 1 & 2).



Fig. 1. — Painting of the La Calamine (Moresnet) open-pit by Jean-Baptiste Bastiné (1843) kept in the Vieille Montagne Museum (formerly Göhlal Museum), La Calamine. Reproduced from Ladeuze *et al.* (1991).
 Fig. 1. — *Tableau de l'exploitation à ciel ouvert du gisement de La Calamine (Moresnet) dû à Jean-Baptiste Bastiné (1843), conservé au Musée de la Vieille Montagne (anciennement, Musée de la Gueule) à La Calamine. Reproduit de Ladeuze *et al.* (1991).*

La Calamine deposit was a huge lenticular body of 450 to 500 m in length and 65 to 100 m in width which was exploited down to 110 m at depth. The ore body is genetically related to the Palaeozoic-Mesozoic unconformity through karstic process of concentration. Main features are:

- ✧ The ore deposit has produced only zinc while most of other Belgian deposits delivered a mixed production of zinc and lead;
- ✧ The ore was completely oxidized down to the depth of 110 m (base of the ore deposit), while most of other deposits presented a dominant sulphide nature below the current water-table. The ore was named “calamine” by the miners. It is a mixture of several minerals: Zn carbonate (smithsonite, $ZnCO_3$) and Zn silicate {hemimorphite, $Zn_4Si_2O_7(OH)_2 \cdot H_2O$ } or the assemblage of smithsonite, hemimorphite, hydrozincite $\{Zn_5(CO_3)_2(OH)_6\}$ and (willemite, Zn_2SiO_4), locally associated with Fe-oxyhydroxydes and clays;
- ✧ The mineralized body rested on the detrital Famennian formations by means of an irregular intermediary layer of silicified dolomite of Tournaisian age.

La Calamine ore deposit, also known by other names (Altenberg-, Vieille-Montagne-, Grande-Montagne- or Moresnet-ore deposit), was also the object of political tensions. After the defeat of Napoleon I, the Vienna Congress created in 1815 the kingdom of The Netherlands including current Holland and Belgium. But a part of the border between this new country and Prussia was disputed, more particularly where the ore deposit of La Calamine was situated. The

problem was solved in 1816 by the Treaty of Limits creating the neutral territory of Moresnet (Fig. 3). The history of this small territory of 350 hectares, which lasted from 1816 to 1919 with a lot of privileges, is described by Defourny (2016). There, the Vieille-Montagne society, which exploited the La Calamine deposit, had a very important social role (see also Ladeuze *et al.*, 1991 for an historical account of the role of the Vieille-Montagne in Eastern Belgium).



Fig. 2. — Engravings from Adolphe Maugendre, around 1850. La Calamine (Moresnet) deposit. General view of the processing plant (above) and of the north side of the open-pit exploitation (below). Source : Museum Vieille-Montagne (formerly Göhlal Museum), La Calamine, photo Léon Dejonghe. Reproduced from Ladeuze *et al.* (1991).
 Fig. 2. — *Gravures dues à Adolphe Maugendre, vers 1850. Gisement de La Calamine (Moresnet). Partie supérieure : vue générale de l'usine de traitement. Partie inférieure : Gîte nord de la mine à ciel-ouvert. Source : Musée de la Vieille Montagne (anciennement, Musée de la Gueule) à La Calamine, photo Léon Dejonghe. Reproduit de Ladeuze *et al.* (1991).*

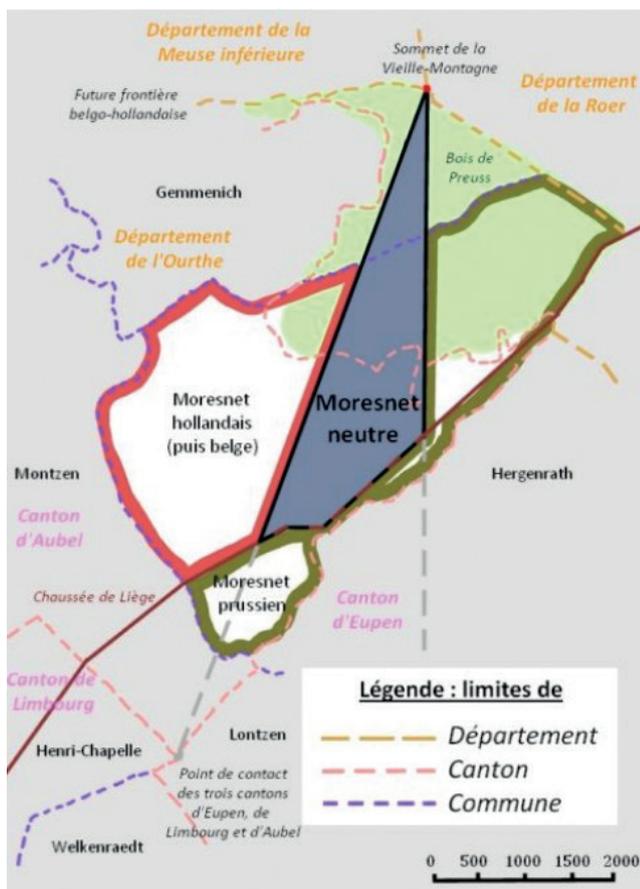


Fig. 3. — The neutral territory of Moresnet. Reproduced after Defourny (2016).
 Fig. 3. — Le territoire neutre de Moresnet. Reproduit de Defourny (2016).

AFTER CLOSURE OF THE Pb-Zn MINES

Dates of closure and productions of the three main ore deposits are shown in Table 1. More details on the periods of exploitation of the various Pb-Zn deposit of Eastern Belgium are given by Dejonghe & Jans (1983, fig. 1) and by Dejonghe et al. (1993).

Name	Date of closure	Zn	Pb	Maximum depth (m)
La Calamine	1884	760,000	0	110
Schmalgraf	1931-1932	157,835	13,763	290
Bleiberg	1882	60,675	80,500	194 (shaft)

Table 1. — Features of the main ore deposits (figures of Zn and Pb productions are in tons of metals).
 Tableau 1. — Caractéristiques des principaux gisements (les chiffres des productions de Zn et de Pb sont exprimés en tonnes de métaux).

Roer, the last Pb-Zn mine of the district, was closed in 1936, after having produced 6084 tons Zn and 864 tons Pb. See also Polrot (2014) for a detailed description of the mining activity in the Bleiberg (Plombières) area. After closure of the metal mines, no particular attention has been provided to their geological and mining heritage. Today, traces of the

former mining exploitations have nearly completely disappeared from the landscape in this area. Some vestiges (ruins) of the former mining surface buildings still exist at Schmalgraf, the deepest metal mine in Belgium (290 m) employing up to 120 miners. The ore extracted from Schmalgraf was sent by railway to the processing plant of La Calamine. This railway situated in the Hohn valley following the river Hohn (Hohnbach also named Lontzenerbach, a tributary of the Gueule river) is at present a touristic path. The Oskar gallery, of 500 m long, connected the Schmalgraf underground mine to the Hohn valley to evacuate waters pumped in the mine. This gallery, also known under various names (e.g., Max Stollen gallery), was dug between 1862 and 1867 starting from the mine level of - 42 m. Today, the exit of this gallery is still visible (Fig. 4) and preserved to facilitate access to the bats. The exit of another gallery, the Auenberg gallery (Fig. 5), is also kept for the same purposes.



Fig. 4. — The Oskar gallery. Photo Léon Dejonghe.
 Fig. 4. — La galerie Oskar. Photo Léon Dejonghe.



Fig. 5. — The Auenberg gallery. Photo Léon Dejonghe.
 Fig. 5. — La galerie Auenberg. Photo Léon Dejonghe.

THE CALAMINARIAN GRASSLANDS

Calaminarian grasslands are environments where the process of seral succession has been halted due to the toxicity

of soils containing high levels of toxic metal ions. They can have three origins: (1) Natural primary sites directly above iron caps deposits; (2) Secondary sites where mining, ore processing, storage, manufacture of finished products and landfill of waste lead to the formation of calaminar waste dumps; (3) Tertiary sites related to the emission and atmospheric dispersion of metallic particles and acid fumes.

In Belgium, calaminarian grasslands are the most visible remnants of past Pb-Zn mining operations, sheltering an anomalous metallophyte flora (Fig. 6). These are plants which need zinc to grow and are only found where soils contain a high zinc content (e.g. above zinciferous gossans or in polluted soils by storage of extracted ore and by residues around processing plants). Pseudometallophytes are plants which grow as well on metalliferous soils than elsewhere. For more details on these plants appearing in Eastern Belgium, see Rosengarten (2010) and Hermanns (2014).



Fig. 6. — Calaminarian grassland with *Viola calaminaria*. Photo Léon Dejonghe.

Fig. 6. — Pelouses calaminaires à *Viola calaminaria*. Photo Léon Dejonghe.

Six metallophytes and several pseudometallophytes are identified in Eastern Belgium (Table 2).

The literature provides information on the presence of calaminarian grasslands in Belgian areas characterized by former lead-zinc exploitations in the Meuse, Vesdre, Ourthe and Gueule valleys. An inventory of calaminarian sites in the Walloon region was carried out by Graitson (2006). Thirty-seven sites were studied in the field. For each site, Graitson (2006), lists the detected metallophytes. But he remarks that, within their ranges, the distribution of metallophytes is increasingly fragmented by the destruction of their habitats. One can observe the typical and complete assembly of metallophytes in Wallonia no more than on 3 sites. That is why he advocates that measures allow the maintenance of these environments in a state of conservation favourable to long term.

The calaminarian grasslands already existed before any human activity because Zn-Pb veins capped by zinciferous gossans already outcropped in the Pleistocene. But the level of pollution by Pb and Zn dramatically increased during the industrial period around the surface mine sites and the ore processing plants, creating new calaminarian grasslands. Since, most of these have disappeared because they were removed to recover the ground for other purposes. Those which still exist constitute remarkable ecosystems which are now the subject of particular protection through the actions listed below (after Rosengarten, 2010, p. 8).

- ✧ CORINE: Inventory of major important sites for the conservation of nature in the European community;
- ✧ ISIWAL: Inventory of Walloon sites of great biological concern;
- ✧ SGIB: Sites of great biological concern;

Latin name	English name	French name
Metallophytes		
<i>Viola calaminaria</i> (Fig. 6)	Zinc violet	Pensée calaminaire
<i>Armeria maritima</i> subsp. <i>Halleri</i>	Thrift	Gazon d'Olympe calaminaire
<i>Thlaspi caerulescens</i> subsp. <i>Calaminare</i>	Alpine pennycress	Tabouret calaminaire
<i>Silene vulgaris</i> subsp. <i>humilis</i> var. <i>humilis</i>	Bladder campion	Silène calaminaire
<i>Minuartia verna</i> var. <i>hercynia</i>	Spring sandwort or "Leadwort" locally used in Derbyshire	Alsine calaminaire
<i>Festuca ovina</i> subsp. <i>Guestfalcia</i>	Sheep's fescue	Fétuque de Westphalie
Pseudometallophytes		
<i>Rumex acetosa</i>	Sorrel	Oseille sauvage
<i>Campanula rotundifolia</i>	Harebell	Campanule à feuilles rondes
etc.		

Table 2. — Metallophytes and pseudometallophytes identified in Eastern Belgium.
Tableau 2. — Métallophytes et pseudométallophytes identifiés dans l'Est de la Belgique.

- ✧ ZHIB: Humid zones of biological concern;
- ✧ Natura 2000;
- ✧ Natural reserves under the impetus of the ASBL (non-profit organisation) Ardenne & Gaume.

Since 1995, the Koul calaminarian grassland at La Calamine has enjoyed official protection status to preserve its exceptional historical significance. See also the issue published by Ardenne & Gaume in 2011 and devoted exclusively to the calaminarian grasslands. In the Netherlands, close to the Belgian border, in the Gueule valley, calaminarian grasslands also occur. They are due to an ancient pollution of the soils related to the Belgian mining activities of lead-zinc deposits. But according to Willems (2004), calaminarian grassland with *Viola calaminaria*, which undergoes a sharp decline, occupies less than half a hectare.

BIBLIOGRAPHIE

- ARDENNE & GAUME (2011). – Les pelouse calaminaires. *Parcs & Réserves*, **66** (3) : 31 p.
- BONI M., DEJONGHE L., BALASSONE G., COPPOLA V. & GIL A.H. (2007). – State of the art on the “calamine”-type zinc deposits of Belgium. *Geologica Belgica*, **10** (3-4) : 141-144.
- COPPOLA V., BONI M., GILG H.A., BALASSONE G. & DEJONGHE L. (2008). – The “calamine” nonsulfide Zn-Pb deposits of Belgium: Petrographical, mineralogical and geochemical characterization. *Ore Geology Reviews*, **33** : 187-210.
- DEFOURNY O. (2016). – Moresnet neutre, deux cents ans plus tard. *Contrepoints, Histoire*. World Wide Web : www.contrepoints.org/2016/06/26/258204-morenet-neutre-deux-cents-ans-plus-tard.
- DEJONGHE L. (1998). – Zinc-lead deposits of Belgium. *Ore Geology Reviews*, **12** : 329-354.
- DEJONGHE L. & JANS D. (1983). – Les gisements plombo-zincifères de l'Est de la Belgique. *Chronique de la Recherche minière, BRGM, Orléans*, **470** : 3-24.
- DEJONGHE L., LADEUZE F. & JANS D. (1993). – Atlas des gisements plombo-zincifères du Synclinorium de Verviers (Est de la Belgique). *Mémoire pour servir à l'Explication des Cartes géologiques et minières de la Belgique*, **33** : 483 p.

CONCLUSION

This paper illustrates one aspect of the post-mine context in the case of lead-zinc mines in Eastern Belgium. With the exception of calaminarian grasslands, the trace of these former mining exploitations has almost completely disappeared. These calaminarian grasslands are remarkable ecosystems regarded as of principal importance for biodiversity conservation. Therefore, they deserve special attention and protection measures due to their unique historical significance.

Acknowledgements

I am grateful to Prof. Nathalie Verbruggen (Free University Brussels) for assisting with the English translation of the metallophytes and pseudometallophytes and to Michiel Duser (Geological Survey of Belgium) and Didier Torz (Editor-in-chief, Société géologique du Nord) for constructive comments about the manuscript.

- GRAITSON, E. (2006). Inventaire et caractérisation des sites calaminaires en région wallonne. *Natura Mosa*, **58** [2005] : 83-124.
- HERMANN J.-F. (2014). – Chapitre 3 : Le site calaminier de Plombières, un écosystème dans un environnement. In : SIMONS M. édit., Plom'hier a bonnes mines. *ASBL Espace Culture-Plombières* : 67-82.
- LADEUZE F., DEJONGHE L. & PAUQUET F. (1991). – La Vieille-Montagne, l'exploitation minière et la métallurgie du zinc dans l'ancien duché de Limbourg. *Bulletin trimestriel du Crédit communal*, **178** : 15-34.
- POLROT F. (2014). – Chapitre 2 : Le Bleyberg : extraction et transformation des minerais de plomb et de zinc à Plombières. In : SIMONS M. édit., Plom'hier a bonnes mines. *ASBL Espace Culture-Plombières* : 21-65.
- ROSENGARTEN D. (2010). – Les milieux calaminaires, la biodiversité au service du patrimoine. *L'érable, revue trimestrielle de la Société royale Cercles des Naturalistes de Belgique*, **2^e trimestre 2010** : 2-13.
- WILLEMS, J.H. (2004). – Hoe is het eigenlijk met onze zinkflora gesteld ? *Natuurhist. Maandblad*, **93** : 21-25.

RÉSUMÉ TOUT PUBLIC

Dans l'Est de la Belgique, les gisements plombo-zincifères ont été intensivement exploités, principalement au cours du XIX^e siècle, avec une apogée entre 1850 et 1870. La dernière mine métallique (Roer) a été fermée en 1936. La plus grande partie des gisements consistait en filons localisés dans des fractures transversales aux plissements et aux failles. Ces fractures, en relation avec la tectonique du graben du Rhin, recoupaient généralement les formations sédimentaires carbonatées du Dévonien et du Dinantien et, par endroits, également les formations détritiques du Famennien et du Namurien. En outre, dans beaucoup de cas, des amas étaient localisés à des contacts lithostratigraphiques et tectoniques entre des roches (formations) de natures différentes. Certains amas étaient localisés à la discordance entre le Paléozoïque et le Mésozoïque et résultaient du remaniement à courte distance de gisements préexistants, probablement dans des pièges karstiques. La région située entre Liège et Aix-la-Chapelle a produit environ 1 260 000 tonnes de zinc-métal et 133 000 tonnes de plomb-métal. Le plus grand gisement, celui de La Calamine, a livré un total d'environ 760 000 tonnes de zinc-métal sur toute la durée de son exploitation, sa production dépassant celle de tous les autres gisements réunis. Il présentait la forme d'un énorme corps lenticulaire de 450 à 500 m de long, 65 à 100 m de large et fut exploité jusqu'à 110 m de profondeur. Sa genèse est conditionnée par des processus de concentrations karstiques. Épuisé en 1879, il a contribué à faire de cette région un des districts miniers les plus importants au Moyen-Âge jusqu'à l'aube de la révolution industrielle. Cette conjoncture est illustrée par des peintures de Bastiné de 1841 (Fig. 1) et de Maugendre vers 1850 (Fig. 2). Le gisement de La Calamine, aussi connu sous d'autres noms (gisement de la Vieille-Montagne, de l'Altenberg, de la Grande-Montagne ou de Moresnet) a suscité des tensions politiques. En effet, en 1815, le Congrès de Vienne a instauré le royaume des Pays-Bas qui regroupait les territoires actuels de la Hollande et de la Belgique. Mais une partie de la frontière de ce nouvel état avec la Prusse a engendré un conflit car cette région où était situé le gisement de La Calamine était revendiquée par les deux états. Le problème a été résolu en 1816 par le Traité des Limites qui instaura le territoire neutre de Moresnet (Fig. 3). Ce petit territoire de 350 hectares subsista de 1816 à 1919, soit pendant plus de cent ans, en bénéficiant de toute une série de privilèges. La société Vieille-Montagne qui exploitait le gisement de La Calamine y a joué un rôle social d'avant-garde. Après la fermeture des mines métalliques, aucune attention particulière n'a été accordée à leur héritage géologique et minier. Aujourd'hui, toute trace de cette ancienne activité industrielle a presque complètement disparu si on excepte quelques ruines sur l'ancien site de Schmalgraf, la mine métallique la plus profonde (290 m) de Belgique qui employa jusqu'à 120 mineurs et les orifices d'anciennes galeries d'exhaure (galerie Oskar, Fig. 4 et galerie Auenberg, Fig. 5). Les pelouses calaminaires sont les témoins les plus visibles des anciennes exploitations. Elles hébergent une flore métallophyte particulière (Fig. 6). Il s'agit de plantes qui ont besoin du zinc pour se développer et qui ne sont connues que là où les sols possèdent de hautes teneurs en zinc. Ces pelouses calaminaires existaient déjà avant toute activité humaine puisque des chapeaux d'oxydation affleuraient au Pléistocène au-dessus des filons plombo-zincifères. Mais le niveau de pollution par le plomb et le zinc a considérablement augmenté pendant la période d'exploitation autour des sites miniers et de traitement des minerais et a engendré de nouvelles pelouses calaminaires. Étant donné les remarquables écosystèmes qu'elles représentent et leur signification historique, elles sont l'objet d'une protection particulière.

DEUXIÈME COMPLÉMENT À L'INVENTAIRE DE LA MACROFLORE DU MIOCÈNE SUPÉRIEUR DE LA DIATOMITE DE MURAT (CANTAL, MASSIF CENTRAL, FRANCE)

*Second addition to the inventory of the Upper Miocene macroflora from the Murat diatomite
(Cantal, French Central Massif)*

par Philippe LEGRAND

15 rue Federico Garcia Lorca, F-63370 Lempdes, France
phlegrand.lempdes@laposte.net

Résumé

Le gisement de diatomite de Murat (Cantal), daté à la limite Mio-Pliocène (Messinien), est particulièrement riche en végétaux fossiles. De nouvelles prospections effectuées de 2010 à 2019 ont permis de compléter les inventaires précédents. Seules cinq nouvelles formes fossiles ont été découvertes et sont décrites : trois nouvelles espèces (1 Filicophyte et 2 Magnoliophytes) et deux formes fossiles d'aiguilles de pin (*Pinus* sp., Coniferophytes). Deux autres espèces précédemment citées sont détaillées et figurées. Le nombre total d'espèces décrites dans la diatomite de Murat est maintenant de 86 : 4 Filicophytes, 11 Coniferophytes et 71 Magnoliophytes. La diatomite de Murat reste donc l'un des plus riches gisements de végétaux fossiles miocènes du Massif central. La flore est dominée par des espèces tempérées, mais des espèces plus froides et des espèces thermophiles sont aussi présentes.

Abstract

*A rich macroflora occurs in the diatomite beds located near the small town of Murat (Cantal, French Central Massif), dated near the Mio-Pliocene boundary (Messinian). New fossil samples collected from 2010 to 2019 allow to complement previous inventories. Only five new fossil forms have been found and are described: three new species (1 Filicophyta and 2 Magnoliophytae) and two fossil forms of needles of *Pinus* sp. (Coniferophytae). Two other species previously cited are figured and detailed. The number of species described from the diatomite of Murat is now 86 in total: 4 Filicophytae, 11 Coniferophytae and 71 Magnoliophytae. The diatomite of Murat is confirmed as one of the richest sites for Miocene flora in the French Central Massif. The flora is dominated by temperate species, but both cooler species and thermophilic species are also present.*

INTRODUCTION

Le gisement de diatomite dit « de Murat » (Cantal) est daté à la limite Mio-Pliocène et noté m3D (Miocène terminal : Messinien) sur la carte géologique au 1/50 000 (Durand & Rey, 1964 ; Goër de Hervé & Tempier, 1988). Les espèces fossiles de la macroflore livrée par ce gisement ont été précédemment mentionnées et/ou décrites par Marty (*in* Piton & Théobald, 1935), Privé-Gill (1987), Roiron (1991) et Legrand (2003, 2010). Cette courte note présente quelques formes fossiles nouvelles, découvertes depuis 2010 sur les tas de déblais de la carrière en exploitation, et apporte quelques précisions sur des formes

précédemment signalées. Elle complète l'inventaire précédent (Legrand, 2010). Nous rappelons ici 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).

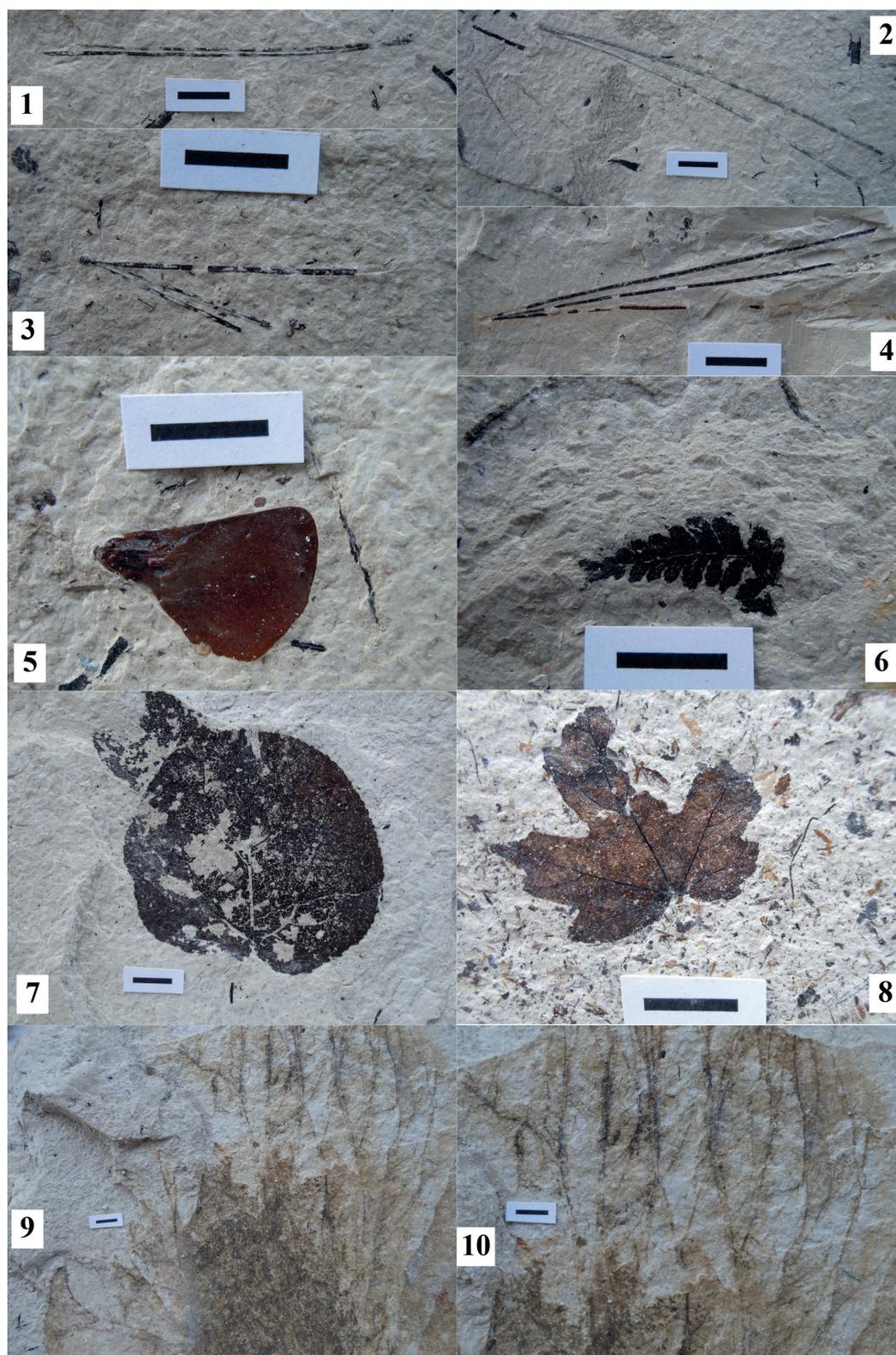


Planche I. — Nouvelles formes fossiles de la macroflore miocène de la diatomite de Murat (Cantal, France). Fig. 1-2 : *Pinus* sp. à deux aiguilles (aiguilles fasciculées par 2). Fig. 3-4 : *Pinus* sp. à trois aiguilles (aiguilles fasciculées par 3). Fig. 5 : *Abies ramesi* Saporta (graine ailée). Fig. 6 : Polypodiaceae s.l., genre et espèce indéterminés (pennes avec pinnules). Fig. 7 : *Cercidiphyllum crenatum* (Unger) Brown (feuille). Fig. 8 : *Acer pseudocampestre* Unger (syn. *Acer campestre* L. fossilis) (feuille). Fig. 9 : *Nymphaea* sp. (feuille). Fig. 10 : *Nymphaea* sp. (feuille : détail de la nervation). Pour toutes les figures, la barre d'échelle = 1 cm. Collection Philippe LEGRAND.

Plate I. — New fossil forms of the Miocene macroflora from the Murat diatomite (Cantal, France). Fig. 1-2: two-needle *Pinus* sp. (bundles of two needles). Fig. 3-4: three-needle *Pinus* sp. (bundles of three needles). Fig. 5: *Abies ramesi* Saporta (winged seed). Fig. 6: Polypodiaceae s.l., gen. et sp. indet. (pinna with pinnules). Fig. 7: *Cercidiphyllum crenatum* (Unger) Brown (leaf). Fig. 8: *Acer pseudocampestre* Unger (syn. *Acer campestre* L. fossilis) (leaf). Fig. 9: *Nymphaea* sp. (leaf). Fig. 10: *Nymphaea* sp. (leaf with detail of nervation). For all figures, scale bar = 1 cm. Collection Philippe LEGRAND.

NOUVELLES FORMES FOSSILES RÉCOLTÉES

TRACHÉOPHYTES À SPORES (FILICOPHYTES)

Fougères leptosporangiées (Polypodiophytes)

Famille POLYPODIACEAE s. l.

Polypodiaceae s. l., gen. et sp. indet.

(Planche I, fig. 6)

Un spécimen fossile très fragmentaire, très petit et de mauvaise conservation, ne permettant pas une identification plus précise, est figuré ici pour mémoire. Il s'agit de la partie terminale d'une fronde portant des pinnules d'environ 3 mm de long pour 1,5 mm de large, apparemment dentées.

SPERMATOPHYTES NON ANGIOSPERMES

CONIFEROPHYTES

Famille PINACEAE

Abies ramesi Saporta

(Planche I, fig. 5)

Roiron (1991) avait rapporté à cette espèce des graines dont les graines elles-mêmes sont mal conservées ou absentes, seule l'aile étant conservée. Nous figurons ici une graine complète, munie de son aile.

Pinus sp. à deux aiguilles

(Planche I, fig. 1-2)

Nous avons précédemment signalé des aiguilles isolées et un rameau feuillé, de mauvaise conservation, dont il était impossible de préciser le nombre d'aiguilles par faisceau (Legrand, 2010). Nous avons depuis découvert plusieurs aiguilles fasciculées par deux, robustes, et atteignant 8-10 cm de longueur.

Pinus sp. à trois aiguilles

(Planche I, fig. 3-4)

Nous avons de plus découvert plusieurs aiguilles fasciculées par trois, plus fines que celles fasciculées par deux, et atteignant 3-7 cm de long. Laurent (1904-1905) signale aussi des aiguilles de pin fasciculées par trois dans le Miocène supérieur du Cantal, à La Mougudo.

ANGIOSPERMES (MAGNOLIOPHYTES)

Ordre NYMPHAEALES

Famille NYMPHAEACEAE

Nymphaea sp.

(Planche I, fig. 9-10)

Les feuilles fossiles de nénuphar, dont de nombreux spécimens et espèces ont été décrits dans le Tertiaire, sont généralement placées arbitrairement dans le genre *Nymphaea*, le plus important actuellement. En effet, les caractères foliaires sont généralement insuffisants pour séparer convenablement les genres (notamment *Nymphaea* et *Nelumbium*), et les espèces de cette famille. Judd *et al.* (2002) estiment d'ailleurs que les Nymphaeaceae sont clairement monophylétiques. Dans

la diatomite de Murat, nous n'avons trouvé qu'une grande feuille dont seule une partie d'environ 20x22 cm est conservée.

Ordre SAXIFRAGALES

Famille CERCIDOPHYLLACEAE

Cercidiphyllum crenatum (Unger) Brown

(Planche I, fig. 7)

Nous n'avons trouvé qu'une seule feuille d'environ 7 cm de diamètre, à la nervation et à la marge dentée caractéristiques, avec des dents régulières et globalement obtuses. Elle comporte 3-5 nervures à la base ; la nervation tertiaire est non régulièrement percurrente, concentrique, obtuse par rapport à la primaire, comme chez *Grewia*. Anciennement rapportée aux Malvaceae ou aux Tiliaceae sous le nom de *Grewia crenata* (Unger) Heer (Knobloch, 1969 ; Ferguson, 1971), cette forme fossile avait déjà été signalée dans le Miocène supérieur (Tortonien-Messinien) du Cantal : dans le gisement de La Mougudo (Laurent, 1904-1905), à Niac (Laurent, 1908), à Fontgrande et au Saut de Jujieu (Lauby, 1909-1910 ; Marty, 1931).

Ordre SAPINDALES

Famille SAPINDACEAE (y compris ACERACEAE)

Acer pseudocampestre Unger (syn. *Acer campestre* L. *fossilis*)

(Planche I, fig. 8)

Considérée comme une forme ancestrale de l'actuel érable champêtre (*Acer campestre* L.), cette forme fossile palmatolobée décrite sous différentes dénominations avait déjà été signalée dans la diatomite de Murat par Roiron (1991). Nous n'en avons trouvé qu'une seule feuille de petite taille (3x2,5 cm).

MISE À JOUR DE L'INVENTAIRE DE LA MACROFLORE

Le tableau 1 présente la liste complète des formes fossiles rencontrées jusqu'à présent dans le gisement de diatomite de Murat, avec la référence bibliographique des différentes mentions (citation seule des espèces ou citation avec illustration).

Ce gisement permet d'apprécier la diversité de la flore à la limite Miocène-Pliocène. De nombreuses espèces présentes à Murat traduisent un climat tempéré, certaines un climat plutôt frais possiblement dû à l'altitude, mais elles y côtoient aussi des taxons thermophiles, avec notamment plusieurs espèces d'affinités tropicales ou méditerranéennes. Certaines formes fossiles ne sont connues qu'à l'état fossile, d'autres formes ont des proches parents actuels à la morphologie similaire toujours présents aujourd'hui en Europe, tandis que d'autres encore ont disparu d'Europe mais ont des proches parents actuels qui existent toujours par exemple en Asie. Bien que plus riche en espèces, la flore fossile de Murat reste similaire à celle des autres gisements du Miocène supérieur du Cantal (Legrand, 2003, 2010).

FORMES FOSSILES RÉCOLTÉES	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES
Filicophytes	
<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
Polypodiaceae s.l., genre et espèce indéterminés (penne avec pinnules)	7
Coniférophytes	
<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
<i>Abies ramesi</i> Saporta (graine ailée, aile de graine)	3,7
<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
<i>Cedrus miocenica</i> Lauby (écaille de cône femelle)	4
<i>Cedrus miocenica</i> Lauby (chaton mâle)	4
<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
<i>Picea</i> sp. (graine ailée)	3, 4
<i>Picea</i> sp. (cône femelle)	3, 4
<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
<i>Pinus</i> sp. 2 aff. <i>P. nigra</i> Arn. <i>fossilis</i> (graine ailée)	5
<i>Pinus</i> sp. (cône femelle)	5
<i>Pinus</i> sp. (rameau feuillé)	5
<i>Pinus</i> sp. (aiguille isolée)	5
<i>Pinus</i> sp. à deux aiguilles (aiguilles fasciculées par 2)	7
<i>Pinus</i> sp. à trois aiguilles (aiguilles fasciculées par 3)	7
<i>Pseudolarix schmidtgenii</i> Kräusel (= <i>P. amabilis</i> [J. Nelson] Redher <i>fossilis</i>) (graine ailée)	5
<i>Sequoia langsdorfii</i> (Brongniart) Heer (rameau feuillé)	3
<i>Tsuga europaea</i> Menzel (rameau feuillé avec cône femelle)	5
Magnoliophytes (Angiospermes)	
Graines indéterminées, isolées ou en amas	5
anciennement Angiospermes Monocotylédones	
Monocotylédones (feuilles)	3, 4
<i>Bambusa</i> sp. (feuille)	3
<i>Bambusa lugdunensis</i> Saporta & Marion (feuille)	4
<i>Potamogeton</i> sp. (feuille ovale-oblongue)	4
<i>Potamogeton crispus</i> L. <i>fossilis</i> (tige feuillée submergée)	5

anciennement Angiospermes Dicotylédones	
<i>Acer</i> sp. (samare)	3, 4
<i>Acer decipiens</i> Al. Braun (feuille)	4
<i>Acer laetum pliocenicum</i> Saporta & Marion = <i>Acer integerrimum</i> (Viv.) Mass. (feuille)	1, 3, 4
<i>Acer opalus</i> Mill. <i>fossilis</i> (= <i>Acer opulifolium</i> Vill.) (feuille)	3
<i>Acer palmatum</i> Thunberg <i>fossilis</i> = <i>Acer sanctae-crucis</i> Stur (feuille)	3, 4
<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, 7
<i>Acer pseudoplatanus</i> L. <i>fossilis</i>	5
<i>Acer tricuspidatum</i> Bronn (= <i>Acer trilobatum</i> Al. Br.) (feuille)	3, 5
<i>Alnus</i> sp. (strobile femelle)	3, 4
<i>Alnus</i> sp. (chaton mâle)	5
<i>Alnus glutinosa</i> (L.) Gaertner <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4
<i>Alnus kefersteinii</i> Unger (feuille)	3, 4
<i>Alnus stenophylla</i> Saporta & Marion = <i>Alnus hoernesii</i> Stur (feuille)	1, 3, 4
<i>Alnus viridis</i> D.C. <i>fossilis</i> (feuille)	3
<i>Berberis</i> sp. cf. <i>B. regeliana</i> Koehne <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4
<i>Betula</i> sp. (écaille de chaton femelle)	3
<i>Betula</i> sp. (graine ailée)	5
<i>Betula macrophylla</i> (Goepfert) Heer (feuille)	3, 4
<i>Betula subpubescens</i> Goepfert (feuille)	4
<i>Buettneria tiliaefolia</i> (Al. Braun) Depape (feuille)	4
<i>Carpinus betulus</i> L. <i>fossilis</i> (fruit avec involucre)	3, 4
<i>Carpinus orientalis</i> Mill. <i>fossilis</i> (fruit avec involucre)	3, 4
<i>Carpinus suborientalis</i> Saporta (feuille)	3, 4
<i>Carya minor</i> Saporta & Marion (feuille ; foliole)	3, 4
<i>Cedrela</i> sp. (graine)	4
<i>Cedrela</i> sp. (feuille)	3
<i>Celtis australis</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4
<i>Ceratophyllum demersum</i> L. <i>fossilis</i> (tige feuillée)	3, 4
<i>Cercidiphyllum crenatum</i> (Unger) Brown (feuille)	7
<i>Cercis</i> aff. <i>Cercis siliquastrum</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	4
<i>Cornus sanguinea</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	5
<i>Corylus avellana</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	4
<i>Crataegus</i> sp. série Crus-Galli et Punctata (feuille)	4
<i>Crataegus</i> sp. cf. <i>C. douglasii</i> Lindl. <i>fossilis</i> (feuille)	3
<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
<i>Ilex geissertii</i> Kvacek, Teodoridis & Wang (feuille ; rameau avec feuilles et fruits) (= <i>Ilex boulei</i> Saporta <i>sensu</i> Legrand, 2003)	3, 4, 5, 6

<i>Juglans regia</i> L. <i>fossilis</i> (foliole)	1, 3, 4
<i>Laurus azorica</i> (Seub.) J. Franco <i>fossilis</i> (feuille)	4
<i>Myrica</i> sp. (feuille)	4
<i>Myriophyllum</i> sp. (tiges feuillées)	1, 5
<i>Nymphaea</i> sp. (feuille)	7
<i>Persea indica</i> Spr. <i>fossilis</i> (feuille)	4
<i>Phellodendron</i> sp. cf. <i>P. amurense</i> Rupr. <i>fossilis</i> (feuille)	3
cf. <i>Photinia</i> sp. (feuille)	3, 5
<i>Platanus aceroides</i> Goeppert (feuille)	5
<i>Populus alba</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	4
<i>Populus x canescens</i> (Ait.) Sm. <i>fossilis</i> (feuille)	4
<i>Populus nigra</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	4, 5
<i>Populus nigra</i> L. <i>fossilis</i> (chaton)	5
<i>Populus tremula</i> L. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4
<i>Prunus acuminata</i> Al. Br. (feuille)	3
<i>Prunus microdonta</i> N. Boulay (feuille)	4
<i>Prunus pereger</i> Unger (feuille)	5
<i>Pterocarya denticulata</i> Heer (foliole)	4
<i>Quercoxylon böckhianum</i> (Felix) Müller-Stoll & Mädler (bois)	2
<i>Quercus hispanica</i> Rérolle (feuille)	1, 3, 4
<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
<i>Sapindus falcifolius</i> Al. Braun (foliole)	4
<i>Sassafras ferrettianum</i> Massalongo (feuille entière, feuille trilobée)	4, 5
<i>Sorbus aria</i> (L.) Crantz <i>fossilis</i> (feuille)	4
<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
<i>Ulmus braunii</i> Heer (feuille)	1, 3, 4
<i>Ulmus</i> sp. cf. <i>Ulmus fulva</i> Michx. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4
<i>Viscophyllum pliocaenicum</i> (Engelh.) Mädler	5
<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
<i>Zelkova ungeri</i> Kovats aff. <i>Z. carpinifolia</i> (Pall.) K. Koch <i>fossilis</i> (feuille)	1, 3, 4
<i>Zelkova ungeri</i> Kovats aff. <i>Z. serrata</i> (Thunb.) Mak. <i>fossilis</i> (feuille)	3, 4

Tableau 1. — Inventaire de la macroflore de la diatomite de Murat (Cantal, Massif central). Colonne gauche : inventaire des formes fossiles rencontrées dans le gisement. Colonne droite : références bibliographiques des espèces citées. 1 = Marty in Piton & Théobald, 1935 ; 2 = Privé-Gill, 1987 ; 3 = Roiron, 1991 ; 4 = Legrand, 2003 ; 5 = Legrand, 2010 ; 6 = Kvacek *et al.*, 2009 ; 7 = Legrand, cet article.
 Table 1. — Inventory of the macroflora from the diatomite beds at Murat (Cantal, French Central Massif). Left column: inventory of the fossil forms in this locality. Right column: bibliographical references of cited species. 1 = Marty in Piton & Théobald, 1935 ; 2 = Privé-Gill, 1987 ; 3 = Roiron, 1991 ; 4 = Legrand, 2003 ; 5 = Legrand, 2010 ; 6 = Kvacek *et al.*, 2009 ; 7 = Legrand, this paper.

ÉLÉMENTS COMPLÉMENTAIRES SUR LA FLORE DE MURAT

Dans une publication précédente (Legrand, 2003), nous avons effectué une comparaison entre la macroflore fossile récoltée et les analyses polliniques alors disponibles. Plus récemment (Legrand, 2010), nous avons souligné que les données palynologiques (bibliographie et discussion in Legrand, 2003) restaient très fragmentaires, et qu'aucune étude niveau par niveau n'avait été menée. Dans une publication récente, Fauquette *et al.* (2020) font état d'analyses polliniques menées sur 37 échantillons récoltés en 1974 (sic !) sur une épaisseur de diatomite de 34,5 mètres, avec des résultats obtenus sur 32 échantillons répartis sur une épaisseur de diatomite de 21 mètres. Ils ne précisent pas si ces échantillons ont été récoltés en un seul point de l'étendue du gisement, mais c'est probable puisqu'ils sont répartis sur toute sa hauteur, et c'est donc très restrictif. Ils ne corrélaient pas leurs prélèvements et leurs résultats avec les niveaux à i) *Synedra* (base de la formation), ii) *Synedra* (intermédiaire inférieur), iii) *Melosira* (intermédiaire supérieur), iv) *Cyclotella* (sommet de la formation). Or, selon le lieu de prélèvement, chaque niveau peut être plus ou moins développé : le niveau de base à *Synedra* n'a été que rarement atteint, car peu intéressant pour l'exploitant, et le niveau supérieur à *Cyclotella* peut même être absent, ayant été raboté par les glaciers (Legrand, 2010).

Fauquette *et al.* (2020) concluent à une très bonne corrélation entre les pollens analysés et la macroflore inventoriée, tout en ne prenant pas en compte la publication de Legrand (2010). Ils citent 88 taxa de pollens, dont de nombreux pollens de plantes herbacées non retrouvées ou non identifiables sous forme de macrorestes dans la diatomite. Ces auteurs reconstituent la végétation et insistent sur le développement d'un marécage à *Glyptostrobus*. Ils indiquent en effet que les pollens du « type *Taxodium* » appartiennent probablement à *Glyptostrobus* en raison d'abondants macrorestes signalés par Roiron (1991). Roiron (1991) rapporte en effet à ce genre une vingtaine de rameaux à écailles opposées dont certains sont ramifiés, ce qui est peu abondant face aux centaines (milliers ?) de feuilles d'*Alnus stenophylla* Saporta & Marion, espèce la plus représentée à Murat. Il en dessine deux exemplaires, et en figure la photographie d'un exemplaire. Or, aucune de ces figurations ne présente les caractères diagnostiques du genre, qui se caractérise par divers types de feuilles, avec surtout les feuilles décurrentes sur les rameaux. Au contraire, les fossiles figurés par Roiron (1991) se rapprochent de ceux que nous avons rapportés à *Juniperus* sp. section *sabina* (Legrand, 2003). Par ailleurs, Fauquette *et al.* (2020) rapportent aussi la présence de pollens du « type *Cupressus-Juniperus* ».

Fauquette *et al.* (2020) reconstituent la paléoaltitude des Monts du Cantal et du gisement de Murat en se basant notamment sur une limite altitudinale inférieure de l'actuel

sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) située à 1 200 mètres d'altitude. Or cette limite est globalement fautive et ne peut être retenue pour estimer une paléoaltitude ; elle ne tient par exemple pas compte des variations géographiques actuelles dans le Massif central ni de l'autécologie du sapin pectiné (voir les détails sur l'autécologie du sapin pectiné dans le Massif central dans Legrand, 2016). Par ailleurs, ces auteurs ne tiennent pas compte que l'*Abies ramesi* Saporta présent à Murat est considéré comme l'ancêtre de l'ensemble des sapins du pourtour méditerranéen, dont certains peuvent avoir une écologie assez différente d'*A. alba* et descendent beaucoup plus bas en altitude, car ils sont plus thermophiles qu'*A. alba* (Legrand, 2003 ; Legrand, 2016). La même remarque peut être formulée pour l'épicéa : *Picea* sp. à Murat (Legrand 2003) et *Picea abies* (L.) Karst. actuel qui n'est d'ailleurs pas spontané dans le Massif central mais y a été introduit par l'homme. Contrairement à ce qu'affirment Fauquette *et al.* (2020), rien ne prouve le développement d'une forêt de conifères à altitude plus élevée que le lac de maar où se sont déposées les diatomites. Les conifères ont très bien pu se développer à la même altitude que le lac, dans ses alentours, et dans une forêt mélangée de feuillus et de conifères.

Comme nous l'avons indiqué précédemment (Legrand, 2003), l'âge du gisement de diatomite de Murat a été longuement discuté avant l'obtention d'un âge absolu. Il a finalement été rapporté au Miocène terminal, Messinien m3D, en raison d'une intrusion basaltique qui a perturbé le fond du gisement et thermométamorphisé les diatomites, datée à $5,34 \pm 0,3$ Ma, ce qui donne un âge potentiel entre 5,6 et 5,04 Ma. La limite entre Miocène et Pliocène est aujourd'hui fixée à 5,333 Ma (International Chronostratigraphic Chart v2020/01, disponible à <https://www.iugs.org/ics>). En étudiant les courbes de variation selon les cycles climatiques des pollens de *Tsuga* + *Picea* uniquement, Fauquette *et al.* (2020) concluent à une meilleure adéquation d'un âge des pollens analysés compris entre 5,36 et 5,13 Ma, plutôt qu'à un âge de 5,52 à 5,33 Ma. Comme écrit précédemment (Goër de Hervé & Tempier, 1988 ; Legrand, 2003), les diatomites de Murat sont donc contemporaines des premières éruptions planésiennes de la région, aux confins mio-pliocènes. Il serait donc plus particulièrement intéressant i) d'effectuer des analyses polliniques sur le niveau de base à *Synedra* pour préciser les données de Fauquette *et al.* (2020) qui restent très fragmentaires et ne concernent de plus que *Tsuga* + *Picea*, et donc leur estimation de l'âge des diatomites, et mieux encore ii) d'obtenir de nouveaux âges absolus plus précis. Ceci tout au moins pour les auteurs qui ne se contentent pas d'un âge du gisement à la limite mio-pliocène et continuent de discourir soit d'un âge miocène, soit d'un âge pliocène, tout en ignorant que la limite mio-pliocène est elle-même sujette à précisions au fil du temps. La flore du gisement reste quant à elle marquée par de nombreuses espèces miocènes, pour une bonne part déjà présentes dans les autres gisements miocènes du Cantal.

CONCLUSIONS

L'inventaire de la macroflore fossile de la diatomite de Murat comportait précédemment 83 espèces : 3 Filicophytes, 11 Coniferophytes (dont 1 bois fossile), 69 Magnoliophytes (dont 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* présentes sous forme de fruits avec involucre) (Legrand, 2010).

Les prospections complémentaires effectuées sur la période 2010-2019 n'ont permis de découvrir que quelques rares espèces nouvelles :

- ✧ une fougère leptosporangée de la famille des Polypodiaceae s. l., genre et espèce indéterminés ;
- ✧ deux Magnoliophytes : *Nymphea* sp. et *Cercidiphyllum crenatum*.

Le genre *Pinus* était déjà représenté à Murat par deux espèces distinctes sous forme de graines (Legrand, 2003, 2010). Les formes fossiles présentées dans cet article attestent de la présence de deux espèces distinctes sous forme d'aiguilles : un pin à 2 aiguilles et un pin à 3 aiguilles, sans qu'il soit possible de mettre en rapport les aiguilles avec les graines. Il faut donc considérer la présence d'au moins deux espèces distinctes du

genre *Pinus* à Murat. Les autres formes fossiles décrites dans cet article étaient déjà au moins partiellement connues. Malgré un échantillonnage assidu sur plusieurs années, et avec une intensité de prospection annuelle similaire à celle qui avait abouti aux inventaires précédents, peu de nouveautés ont été découvertes. Il est donc probable qu'on ait maintenant une vision assez complète de la flore de la diatomite de Murat. Avec l'abondance des spécimens récoltés notamment pour certaines espèces précédemment décrites, et avec sa grande diversité floristique, le gisement de diatomite de Murat reste l'un des plus riches gisements en végétaux fossiles des confins mio-pliocènes du Massif central, avec maintenant 86 espèces : 4 Filicophytes, 11 Coniferophytes et 71 Magnoliophytes.

Remerciements.

Nous remercions tout particulièrement M. Pierre Bila et M. Matthieu Priou, directeurs successifs de CELITE – Imerys Filtration France, et les personnels de cette société, M. Pascal Froment et Mme Sophie Lebas, qui nous ont toujours accueillis très cordialement sur le gisement de diatomite. Nous remercions aussi Mme Nathalie Peynon-Legrand pour son aide lors des récoltes, M. Alain Blicq (Société géologique du Nord) pour sa relecture attentive du manuscrit original, et les relecteurs des *Annales*, Mme Anaïs Boura (Sorbonne Université, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris) et M. Dario de Franceschi (Sorbonne Universités, Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris), pour leurs suggestions complémentaires.

BIBLIOGRAPHIE

- DURAND S. & REY R. (1964). — Le dépôt de la diatomite de Sainte-Reine (Cantal) débute au Pliocène supérieur et permet de déceler les traces du refroidissement préligien. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, **259** : 1978-1980.
- FAUQUETTE S., SUC J.-P., POPESCU S.-M., GUILLOCHEAU F., VIOLETTE S., JOST A., ROBIN C., BRIAIS J. & BABY G. (2020). — Pliocene uplift of the Massif Central (France) constrained by the palaeoelevation quantified from the pollen record of sediments preserved along the Cantal Stratovolcano (Murat area). *Journal of the Geological Society* ; World Wide Web address: <https://doi.org/10.1144/jgs2020-010> (accès le 03/07/2020).
- FERGUSON D. K. (1971). — The Miocene flora of Kreuzau, Western Germany. 1. The leaf-remains. *Verhandelingen der Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, Afd. Natuurkunde*, Tweede Reeks, **60** (1) : 297 p., 53 pl.
- GOËR DE HERVÉ A. DE & TEMPIER P. (1988). — *Notice explicative, feuille Saint-Flour. Carte géologique de la France (1 : 50 000)*. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, 92 p.
- JUDD W. S., CAMPBELL C. S., KELLOGG E. A. & STEVENS P. (2002). — *Botanique systématique : une perspective phylogénétique*. Ed. De Boeck Université, Paris, Bruxelles, 467 p.

- KNOBLOCH E. (1969). — *Tertiäre Floren von Mähren*. Moravské Museum – Musejni Spolek, Brno, 201 p., LXXVII pl.
- KVACEK Z., TEODORIDIS V. & 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.
- LAUBY A. (1909-1910). — Recherches paléophytologiques dans le Massif central. *Bulletin des Services de la Carte géologique de la France et des Topographies souterraines*, Vingtième volume, Ministère des Travaux publics, Paris, 398 p., XIV pl.
- 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.
- 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^e série) : 25-55, pl. V-X.



- LEGRAND Ph. (2010). — Complément à l'inventaire de la macroflore du Miocène supérieur de la diatomite de Murat (Cantal, Massif Central, France). *Annales de la Société géologique du Nord*, 17 (2^e série) : 23-35, pl. I-II.
- LEGRAND Ph. (2016). — Face au réchauffement climatique, quel avenir pour le sapin pectiné (*Abies alba* Mill.) dans le Massif central ? *Revue des Sciences naturelles d'Auvergne*, 80 : 3-15.
- MARTY P. (1931). — Sur l'âge des plus anciens basaltes de l'Aubrac (Note de paléontologie végétale). *Bulletin de la Société géologique de France*, 5^e série, 1 : 177-188, pl. VII-IX.
- PITON L. & THÉOBALD N. (1935). — La faune entomologique des gisements mio-pliocènes du Massif Central. *Revue des Sciences naturelles d'Auvergne*, 1 (2) : 65-104, 5 pl.
- PRIVÉ-GILL C. (1987). — *Les flores ligneuses tertiaires du Massif Central français : étude anatomique, implications paléoclimatiques et phytogéographiques*. Thèse de Doctorat d'État, Université Pierre-et-Marie-Curie, Paris, 24 juin 1987, 313 p., VIII pl.
- 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.

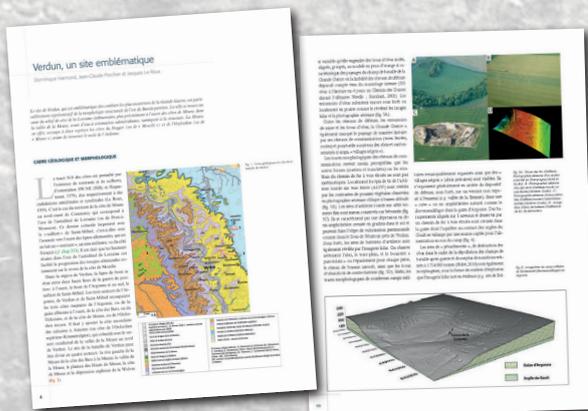
14-18 : La Terre et le Feu

Géologie et géologues sur le front occidental

Une publication de l'AGBP, du COFRHIGEO et de la SGN

Le rôle des formes du relief

La stratégie des belligérants a été marquée dès le début de la guerre par le rôle de la géomorphologie. Les auréoles concentriques du Bassin parisien, avec leurs escarpements de côtes face à l'est et défendus par les fortifications du système Séré de Rivières constituaient l'imprenable « forteresse France » que les Allemands ont dû contourner par la Belgique.



La nature des roches

La nature des roches a défini les conditions dans lesquelles les soldats ont creusé tranchées et galeries de mines, et l'aptitude à la circulation des troupes et des équipements lourds, notamment les chars.

Les carrières souterraines des régions calcaires ont offert des abris aux combattants. La guerre de mines a été influencée, comme les autres travaux du génie, par la distribution, l'épaisseur et la structure des roches, leurs caractéristiques physiques et la présence d'eaux souterraines.

Les géologues dans le conflit

À la différence des Allemands et des Britanniques, les Français n'ont pas constitué de corps de géologues militaires, l'information géologique reposant davantage sur des spécialistes non mobilisés et des réseaux informels. Les géologues des diverses parties ont été impliqués dans l'approvisionnement en eau et en ressources minérales, dans le creusement des mines et dans le choix des sites stratégiques. Parallèlement, une guerre idéologique a opposé les scientifiques des deux camps.



Les conséquences environnementales

Les nouvelles technologies (systèmes d'information géographique, images Lidar...) permettent d'identifier les traces du conflit dans la morphologie. La dégradation des sols et les zones polluées constituent un nouveau domaine d'étude en phase avec les préoccupations contemporaines.

L'ouvrage, de plus de 450 pages et richement illustré en quadrichromie (cartes, dessins, photographies) est disponible au prix de 38 €. Il peut être retiré à la Société géologique du Nord sur rendez-vous (didiertorz@gmail.com) ou être envoyé par voie postale. (frais d'emballage et d'expédition en sus) : renseignements et commandes par courriel (didiertorz@gmail.com) ou par courrier : (Société Géologique du Nord, Université de Lille, Cité Scientifique (Bât. SN5), 59655 Villeneuve d'Ascq).

LA FORMATION PLÉISTOCÈNE DE LA SLACK À LA POINTE AUX OIES (PAS-DE-CALAIS) APRÈS LES TEMPÊTES DE FÉVRIER 2020

The Pleistocene Slack Formation at the Pointe aux Oies (Pas-de-Calais), after February 2020 storms

par Arnaud HAMELIN

14 rue Émile Lemaitre, 62200 Boulogne-sur-mer
arnaud.hamelin@laposte.net

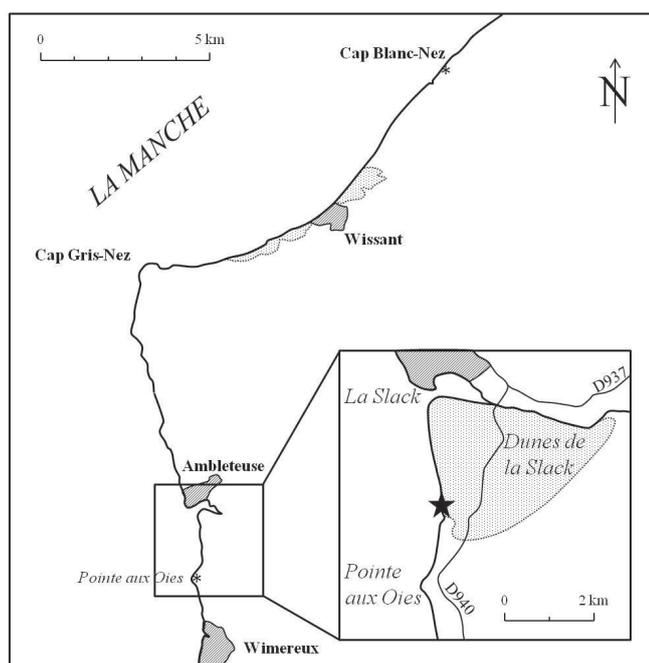


Fig. 1. – Localisation géographique du secteur étudié. L'étoile situe l'affleurement de Pléistocène dégagé lors des tempêtes de l'hiver 2019-2020, mettant à nu la Formation de la Slack.

Fig. 1. — Geographical location of the studied area. The star indicates the Pleistocene outcrop that was cleared by storms of winter 2019-2020 in such a way that the Slack Formation became visible.

Situées sur le littoral du Boulonnais au sud du Cap Gris-Nez, les dunes de la Slack se développent sur une distance d'environ deux kilomètres entre le village d'Ambleteuse au nord et la Pointe aux Oies au sud (Fig. 1). Ces dunes holocènes sont limitées à la base par deux niveaux tourbeux qui affleurent largement sur l'estran où de nombreuses souches d'arbres (aulnes, bouleaux, chênes, noisetiers) sont visibles à marée basse. À quelques centaines de mètres au sud de l'estuaire de la Slack et sur une courte distance, des dépôts plus anciens affleurent périodiquement sous les dunes holocènes à la faveur des tempêtes qui attaquent le rivage. Il s'agit de la Formation pléistocène de la Slack, définie par Bonte & de Heinzelin (1966) et qui présente la succession lithologique suivante d'après la description publiée par Bonte & Broquet (1963), soit du haut vers le bas :

- ◇ (4) sables jaunâtres à litage oblique, incluant des lentilles de grès ferrugineux (épais d'environ 3 m) ;
- ◇ (3) cailloutis de silex et grès à matrice sableuse rougeâtre (3 à 4 m) ;
- ◇ (2) argiles brunes ou rougeâtres, finement litées (10 à 12 m), dans lesquelles s'insèrent des lits sableux à litage oblique, centimétriques à pluri-décimétriques. Les argiles contiennent des concrétions carbonatées et présentent un faciès « d'argiles à biscuits » ;
- ◇ (1) conglomérat constitué de galets de silex et de grès emballés dans une matrice de sables grossiers (0 à 0,50 m). Ce cailloutis basal repose sur les Grès et Calcaires tithoniens de la Pointe aux Oies à la surface desquels a été trouvée sur l'estran, dans les années 1960, une industrie à rognons de silex taillés du Paléolithique inférieur.

La formation de la Slack est aujourd'hui attribuée au Pléistocène moyen (Cromérien) sur la base de l'industrie à rognons de silex taillés et interprétée comme représentant le remplissage d'un ancien estuaire de la Slack par des sédiments crétacés remaniés (Bonte & Broquet, 1963 ; Lefèvre & Sommé, 2007).

Au cours de l'hiver 2019-2020, le pied des dunes de la Slack a été fortement érodé à la suite de violentes tempêtes de SW survenues lors de marées de vives eaux, mettant à nu de façon éphémère la base de la série pléistocène et son substratum tithonien. Le fluage du sable a depuis fortement dégradé l'affleurement. La Formation de la Slack restant le plus souvent masquée et n'ayant jamais fait l'objet d'illustrations photographiques, il semble intéressant de combler ce manque. La figure 2 présente un panorama de l'affleurement et la figure 3 une vue rapprochée. Au-dessus des Calcaires de la Pointe aux Oies (Tithonien terminal à faciès purbeckien) à structures en « chou-fleur », les deux unités inférieures de la Formation de la Slack sont bien visibles sur une hauteur d'environ 2 m : le conglomérat basal surmonté des « argiles à biscuits ». Au sein du conglomérat, les galets sont de nature (grès et silex essentiellement), de formes et de tailles variées (centimétriques à décimétriques). Cette unité lithologique



Fig. 2. – Vue d'ensemble de la falaise au pied des dunes de la Slack, prise depuis le nord-ouest. Hauteur de la falaise : 5 m.
 Fig. 2. — An overview of the cliff at the bottom of the Slack dunes, photographed from North-West. Height of the cliff: 5 m



Fig. 3. – Détail de la falaise. T : sommet des calcaires tithoniens, 1 : conglomérat à matrice sableuse, 2 : « argiles sableuses à biscuits ».
 Fig. 3. — Detailed view of the cliff. T: top of the Tithonian limestones, 1: conglomerate with a sandy matrix, 2: « argiles sableuses à biscuits »

est absente dans la partie sud de l’affleurement, ou préservée uniquement dans les dépressions du Jurassique sous forme de galets piégés, puis se développe vers le nord où elle atteint 50 cm. Les « argiles à biscuits » sont quant à elles en contact direct avec le Jurassique au sud de la coupe, mais surmontent le conglomérat plus au nord. Il s’agit d’une alternance de fins lits d’argiles brunes et de sables ocres contenant des plaquettes d’oxydes de fer. De nombreuses concrétions carbonatées sont présentes dans certains lits, dont quelques-unes sont illustrées dans la figure 4. Celles-ci ont des formes aplaties avec des contours variés, une épaisseur de 2 à 10 mm et un diamètre de 1 à 5 cm. Les plus claires présentent des fentes radiales sur les bords et parfois sur l’ensemble de leur surface. Les nodules, ocres, présents dans d’autres lits, sont plus sableux et de forme plus régulière.



Fig. 4. – Concrétions carbonatées provenant des « argiles sableuses à biscuits ».
 Fig. 4. — Carbonate concretions from the « argiles sableuses à biscuits ».

Remerciements

M. Francis Amédro (Calais) m'a aidé à mettre en forme les observations de terrain. Qu'il en soit chaleureusement remercié.

BIBLIOGRAPHIE

BONTE A. & BROQUET P. (1963). – L'Aptien du Boulonnais. *Bull. Carte géol. France, C. R. Coll. Campagne 1961*, **269**, tome LIX : 1-5.

BONTE A. & DE HEINZELIN J. (1966). – Compte rendu de la session extraordinaire de la Société belge de Géologie et de la Société géologique de Belgique dans le Boulonnais. *Bull. Soc. Belge Géol.*, **75** : 245-305.

LEFÈVRE D. & SOMMÉ J. (2007). – Quaternaire. *In* : MANSY J.-L., GUENNOG P., ROBASZYNSKI F., AMÉDRO F., AUFFRET J.-P., VIDIER J.-P., LAMARCHE J., LEFÈVRE D., SOMMÉ J., BRICE D., MISTIAN B., PRUD'HOMME A., ROHART & VACHARD D. Notice explicative de la feuille Marquise à 1/50 000. 2^e édition. Bur. Rech. Géol. Min., Orléans, p. 212.



CONSEIL
D'ARCHITECTURE
D'URBANISME ET DE
L'ENVIRONNEMENT
DU NORD

LE CADRE DE VIE EST UN BIEN COMMUN

Avec le CAUE du Nord, participez ensemble
à construire vos lieux de vie.

Je suis
membre d'une
association,
je développe des initiatives
grâce aux ressources
locales.

Je suis
technicienne,
je découvre des
expériences ancrées
dans leur contexte.

Je suis
enseignante,
je développe une
pédagogie active en
relation avec le
territoire.

Je suis
habitant,
je conçois un projet
d'habitat qui s'intègre
dans mon cadre de
vie.

Je suis
élu,
je réussis un projet
adapté à mon
territoire.

Je suis
enfant,
je comprends
l'évolution de mon
environnement.

Je suis
professionnel,
j'exerce mon activité en
connaissance des
enjeux locaux.



ACCOMPAGNER LES PROJETS
CONTRIBUER AU DÉBAT PUBLIC
DIFFUSER LES EXPÉRIENCES
FACILITER LES COOPÉRATIONS

POUR UNE ÉCOLE PERMANENTE DU CADRE DE VIE

www.caue-nord.com

PREMIÈRE OBSERVATION, À DISTANCE, D'UNE FOUILLE ÉPHÉMÈRE AUX CONFINS DE LEZENNES ET VILLENEUVE D'ASCQ (NORD)

Distant first observation of a short-lived excavation on the boundary between Lezennes and Villeneuve d'Ascq (Nord, France)

par Francis MEILLIEZ

Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR CNRS 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences,
F 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France
francis.meilliez@univ-lille.fr

Fabien GRAVELEAU

Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR CNRS 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences,
F 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France
fabien.graveleau@univ-lille.fr

INTRODUCTION

Aux confins des communes de Villeneuve d'Ascq et Lezennes (Fig. 1), jouxtant l'emprise du Stade Pierre Mauroy, un important chantier mixte, associant surface commerciale et habitat, vient d'entamer ses travaux de terrassement, courant avril 2020. Les moyens mobilisés sont conséquents (une douzaine d'engins) et le terrassement a progressé très vite. En dates des 12 et 24 mai, quelques photos ont été prises depuis le talus du golf, situé de l'autre côté du CD146. Ces photos sont présentées ici et analysées avec les éclairages de la carte géologique et d'observations antérieures, en attente d'approcher les fronts de taille dégagés temporairement.

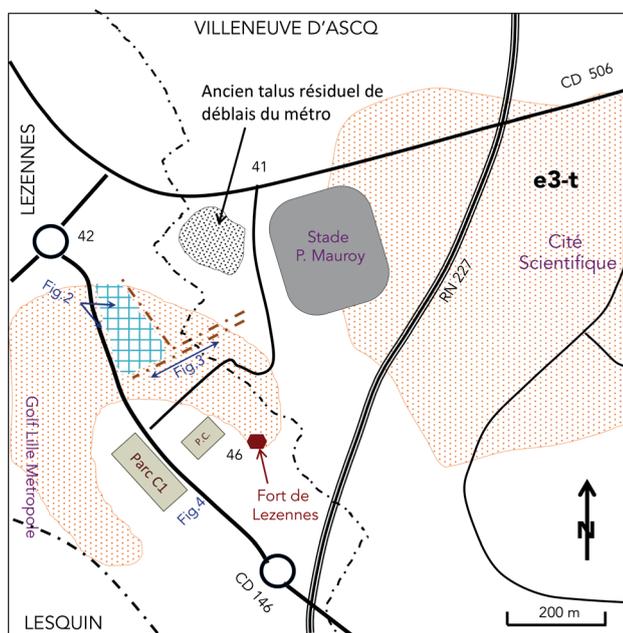


Fig. 1. – Carte de localisation des observations avec report des plaques de Tuffeau de Valenciennes (e3-t) qui se trouvent sur la carte géologique (feuille de Lille à 1 : 50 000). Le secteur quadrillé est celui du terrassement dans la craie en date du 12 mai 2020.

Fig. 1. – Location map of observations. Extent of Valenciennes Tuffeau (e3-t) are reported according to the Lille geological map on 1/50 000 scale. Gridded place indicates chalk excavation in May 12th, 2020.

LOCALISATION ET OBSERVATIONS

Dans ce secteur, les affleurements sont toujours éphémères car l'urbanisme s'y développe très fortement et rapidement depuis les années 1960. La carte géologique de Lille (Sangnier & Dassonville, 1968), dispose encore du fonds topographique IGN (Institut Géographique National) de 1963 duquel nombre de repères ont aujourd'hui disparu. Entre autres le site couramment appelé *Fort de Lezennes* y est encore désigné comme *batterie du camp français de 1792*. Aménagée, puis complétée d'un bâtiment neuf, la casemate a hébergé la cartothèque du Service Géologique Régional, antenne régionale du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) des années 1960 aux années 1990. À la même époque, a été ouvert le chantier de la Cité Scientifique. Même s'il a déploré l'absence d'une réelle étude géologique, Antoine Bonte, professeur de géologie appliquée à la Faculté des Sciences de Lille, a pu inspecter les fonds de fouilles des fondations des bâtiments de première phase et en publier une analyse (Bonte, 1965). Enfin, il faut rappeler que le village de Lezennes a été un des centres importants, en périphérie de Lille, pour l'exploitation de la pierre à bâtir, au moins depuis le xv^e siècle (Cercle de Recherche Historique Lezennois, 2009). En conséquence, l'exploitation agricole en surface s'est trouvée de plus en plus gênée par l'émergence de fontis (Fig. 2). Les travaux de terrassement du stade (2010-2011) n'ont pas permis l'observation des fonds de fouilles.

La géologie locale est quand même assez bien cernée par la carte géologique qui représente une partie du flanc nord, faiblement penté, de l'anticlinal du Mélantois, la craie passant sous couverture « tertiaire » (dépôts thanétiens). De telle sorte que le front de taille, même observé à distance, peut être examiné à la fois par les données de cette carte (Fig. 1) et l'étude de Bonte (1965).

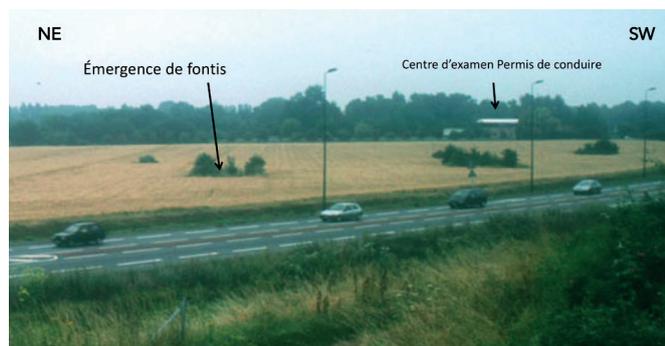


Fig. 2. – Prise de vue (localisation sur Fig. 1) : le bosquet en arrière-plan couvre la ligne de crête sur laquelle se trouve le Fort de Lezennes et, devant lui, le Centre d'Examen du permis de conduire. Le champ, encore cultivé au premier plan, montre plusieurs fontis, émergeant des carrières souterraines (catiches) qui exploitaient la Pierre de Lezennes ; d'autres sont hors champ de vision. Photo F. Meilliez, automne 2009, prise dans des conditions météo difficiles à l'aide d'un téléphone portable.
 Fig. 2. – Photograph from point located on Fig. 1: the car license examination center is located close to a copse along the topographic crest in the background. At front, the cultivated field is dotted by emerging quarries in which had been exploited the Lezennes Stone for building; other holes are out of this sight. Photograph by F. Meilliez, autumn 2009, made under difficult climatic conditions with a mobile phone.



Fig. 3. – Prise de vue du 24 mai 2020 : depuis le point localisé sur la Fig. 1, vue du front de taille sud-est du plan incliné menant vers le stade. Au-dessus d'une craie en couches horizontales, mais très fissurée par des plans verticaux, la surface d'érosion, très nette et franche est couverte de la série dite landénienne sur la carte géologique (Feuille de Lille à 1 : 50 000). Sa composition est discutée dans le texte. Un remblai de craie couvre le tout. Photo F. Meilliez.
 Fig. 3. – Photograph taken on May 24th, 2020, from point located on Fig. 1: overview of the workfront (SE wall) of the climbing pathway going towards the stadium. Above horizontal chalk beds, with abundant vertical fractures, the erosion chalk erosion is a stiff surface; the Landenian series is clearly visible as described on 1/50 000 scale Lille geological map. Its composition is discussed within the text. A chalk ballast covers all. Photograph by F. Meilliez.

Une seule photographie est présentée ici qui illustre bien la série couvrant la craie (Fig. 3). La prise de vue du 24 mai (localisation sur Fig. 1) montre un front incliné taillé dans une série finement et régulièrement litée, surmontant la partie verticale du front creusé dans la craie. Sur une épaisseur de l'ordre de 3 à 4 m (estimation par rapport aux personnes présentes sur le site) on peut distinguer, de haut en bas, sous le remblai composé de blocs crayeux en vrac :

- ✧ plus de 1 m de limons (au moins deux couches) sous la terre arable ;

- ✧ environ 2 m d'une série finement litée qui est le *Tuffeau landénien* de Bonte (1965) ou *Tuffeau de Valenciennes* de la carte géologique.

- ✧ une craie blanche très fissurée verticalement.

Ce front longe un plan incliné remontant vers le stade aperçu au fond (Fig. 3). Le 12 mai, la taille de ce talus était en cours, et le remblai crayeux peu volumineux. Mais ce jour-là, le front de taille perpendiculaire (orienté nord-nord-ouest à sud-sud-est) était nettement plus lisible que le 24 mai. La surface de contact entre la série landénienne et la série limoneuse, litées, et la craie avait été dégagée sur plusieurs centaines de mètres carrés, permettant une observation, certes lointaine mais claire. Cette surface, mollement ondulée, ne semblait pas avoir été corrodée, et la base de la couverture n'était parsemée d'aucun bloc crayeux. Cette observation est cohérente avec la remarque de Bonte (1965) : sous couvert de tuffeau, la tête de la craie n'est pas corrodée, alors qu'elle l'est sous couverture de sables dépourvus de tuffeau, donnant des *marnettes* : petits blocs crayeux enrobés de marne blanche. Ce n'est pas le cas ici. Mais Bonte (1965) en a observées dans la partie nord-est de la Cité scientifique.

Hors du chantier, face au Fort de Lezennes, un parking à étages (désigné C1) a été construit en relation avec l'utilisation du Stade Pierre Mauroy. L'aménagement de son entrée avait demandé un léger décapage qui montrait, sous la terre arable, une couche d'ordre métrique de limon brun surmonté un sable roux, fin. Leur surface de contact n'était pas plane (Fig. 4, localisation sur Fig. 1). L'important est de constater que le tuffeau y est absent, conformément à ce qu'indiquait la carte géologique.



Fig. 4. – Prise de vue du point localisé sur la carte (Fig. 1) de fin 2011. Les talus terrassés (hauteur de 2 m environ) pour aménager l'accès au parking C1 destiné aux usagers du stade montrent un limon brun homogène et massif sur un ensemble vert brun qui devrait être un sable glauconieux et argileux. Le Tuffeau de Valenciennes semble absent. Photo F. Meilliez.

Fig. 4. – Photograph taken at the end of 2011 from point located on Fig. 1. Excavated walls (roughly 2 m high) for C1 carpark entrance exhibit a brown and massive homogeneous silt over a brownish green sand with glauconite and clay, which is a lateral equivalent of Valenciennes Tuffeau. Photograph by F. Meilliez.

INTÉRÊTS GÉOLOGIQUES

Alors que la géologie régionale est estimée simple, l'essentiel des travaux publics se fait dans une épaisseur de 10 à 20 mètres dont le détail surprend bien des opérateurs au moins pendant l'exécution des travaux, si ce n'est ensuite. Plus que des surprises de structure, il s'agit le plus souvent de comportement déroutant des matériaux en fonction des conditions climatiques (Bonte, 1965).

Sur ce site, pour l'instant, la composition géologique observée est conforme à l'interprétation représentée sur la carte géologique. Il n'y avait pas de marque de poche de dissolution sur la surface de la craie observée. Mais la présence de plusieurs d'entre elles sur le territoire de la Cité scientifique suggère d'être aux aguets, hors des placages de Tuffeau. Par ailleurs, ce dernier est normalement couvert par l'Argile de Louvil, noirâtre. Aucune trace n'a été perçue sur ces observations lointaines. Là encore, de l'Argile de Louvil a été piégée dans la partie centrale de certaines poches de dissolution de la Cité scientifique.

Il n'a guère été possible d'évaluer le pendage des couches de la craie avec précision. Comme le site se trouve sur la retombée nord du Dôme du Mélantois, le pendage devrait être très faible vers le nord. Sous une couverture d'ordre au plus métrique de limons quaternaires (Pléniglaciaire du Weichsélien : comm. orale de L. Deschodt, mai 2020), la craie a été observée directement dès la Cité scientifique (Bonte, 1965). L'enjeu de cette information est de savoir si la série landénienne repose en discordance sur la craie, ce qui serait une précieuse information régionale.

L'exploitation de la pierre à bâtir ne s'est pas étendue plus loin vers l'est, jusqu'à preuve du contraire. Outre une possible raison d'éloignement des chantiers, il pourrait y avoir une raison géologique : si la craie est pentée, même légèrement vers le sud ou l'est, le gisement s'approfondissant, il devient menacé par le niveau de la nappe dont on connaît la présence à l'air libre vers la cote 36-37, à environ 1 km du site dès l'entrée sur le territoire de Sainghin-en-Mélantois (Meilliez *et al.*, 2014). Si elle n'est pentée que vers le nord, faiblement comme le suggèrent les cartes géologiques de Lille (Sangnier

& Dassonville, 1968) et Carvin (Desoignies & Sangnier, 1968) qui se succèdent, alors les couches formant le gisement sous Lezennes auraient pu justifier un passage en carrières à ciel ouvert au niveau de la crête topographique et/ou au niveau de la Cité Scientifique. L'absence de telles carrières laisse à penser que l'arrêt de l'exploitation de la Pierre de Lezennes soit intervenu avant que le besoin d'extension vers le sud ne se fasse sentir. À moins que le pendage ne devienne quasiment horizontal. Il est vraiment regrettable de ne pas disposer de mesures d'orientation au niveau de la Cité Scientifique.

Remerciements

Les auteurs remercient Hervé Coulon pour sa relecture attentive et Laurent Deschodt pour les indications fournies. Merci aussi au comité de rédaction d'avoir accepté *in extremis* ce constat d'affleurement éphémère. Enfin merci aux représentants des sociétés Aventim et Leroy-Merlin dont on vient d'apprendre qu'elles vont nous permettre de visiter le chantier au fil de l'évolution des terrassements, prévus jusque fin 2020. Une description plus précise de ces observations sera donc rapportée ultérieurement.

BIBLIOGRAPHIE

- BONTE A. (1965). — Le sous-sol de la Cité Scientifique d'Annapes. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXXXV** : 357-367.
- CERCLE DE RECHERCHE HISTORIQUE LEZENNOIS (2009). — *Voyage au cœur de Lezennes, chronique des carrières souterraines*. Centre de Recherche Historique Lezennois, Lezennes, 223 p.
- DESOIGNIES J. & SANGNIER P. (1968). — *Carte géologique de Carvin (feuille XXV-5 à 1:50 000)*. B.R.G.M. édit., Orléans.
- MEILLIEZ F., COULON H. & MAVEL J. (2014). — Cours d'eau, inondabilité et urbanisme : quelques exemples à méditer sur le territoire de Lille-Métropole. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **21** (2^e série) : 35-42.
- SANGNIER P. & DASSONVILLE G. (1968). — *Carte géologique de Lille (feuille XXV-3-4 à 1:50 000)*. B.R.G.M. édit., Orléans.

La Société Géologique du Nord, une maison d'édition



Anticlinal de la Crèche dans les dépôts du Jurassique supérieur au nord de Boulogne-sur-Mer
© Alain Trentesaux, 2006

La Société géologique du Nord publie :

- des *Annales* : 153 tomes de 1870 à 2019, dont de nombreux fascicules thématiques : géologie du nord de la France (générale et thématique), tectonique (rupture des roches et massifs rocheux, tectonique cassante), Paléozoïque, géologie du Gondwana (générale et thématique : Dévonien de l'Ougarta au Sahara, Paléozoïque moyen du Gondwana du Nord, Paléozoïque de l'Iran, Paléozoïque inférieur de la Montagne Noire), géologie de l'Europe, énergie et matières premières, géologie de l'Ardenne ... ; certains de ces fascicules sont des fascicules jubilaires (Centenaire de la SGN, Centenaire du Musée Gosselet) ;
- des *Publications* spéciales : 33 tomes depuis 1977 : Dinarides, arc égéen, Hellénides, Atlantique Sud, Afghanistan, Rocheuses canadiennes, Chaîne caraïbe du Vénézuéla, Pyrénées, Massif ardennais, Océan Indien Nord, fosse vocontienne, Maroc et Espagne, Oural méridional (Russie), Massif du Cantal, bassins de Paris et du sud-est de la France ... Plusieurs *Publications* relèvent de la paléontologie : paléobotanique du Carbonifère, radiolaires du Trias-Lias, foraminifères, récifs dévoniens, vertébrés paléozoïques ; d'autres traitent d'objets ou événements géologiques : minéraux argileux, aquifère crayeux, événement anoxique cénomaniens, modélisation hydrodynamique des eaux souterraines ...
- des *Mémoires* : 25 mémoires de 1876 à 1983 ; cette série est reprise avec le tome XVII sur l'histoire de la SGN et des sciences de la Terre dans le nord de la France (paru en décembre 2014) ;
- des *Tables Générales* : cinq ont été publiées ; la 6^e a été mise en ligne en janvier 2013 et imprimée dans le tome 20 des *Annales* en décembre 2013.

Catalogue et bon de commande téléchargeables à l'adresse suivante : <http://sgn.univ-lille.fr>

REGARDS SUR LES PAYSAGES RÉGIONAUX : TRAVERSE DES MONTS DE FLANDRES AUX COLLINES D'ARTOIS

Look on regional landscapes: a traverse between Flanders mounts and Artois hills

par Francis MEILLIEZ

UMR 8187 Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences (LOG) - CNRS-Université de Lille-Université Littoral Côte d'Opale, Cité scientifique, bâtiment SN5 (Sciences de la Terre), 59655 Villeneuve d'Ascq cedex
francis.meilliez@univ-lille.fr

Laurent DESCHODT

INRAP, UMR 8591 CNRS/LGP, 49 rue du Maréchal Lyautey, 59370 Mons-en-Barœul
laurent.deschodt@gmail.com

Benoît PONCELET

CAUE du Nord, 98 rue des Stations, 59000 Lille
bponcelet@caue-nord.com

Résumé

Les pages qui suivent rendent compte d'une sortie de terrain, organisée par la Société Géologique du Nord (Villeneuve d'Ascq), et qui n'est pas réservée aux géologues, qu'ils soient amateurs ou professionnels. Elle est destinée à toute personne qui, par plaisir ou par nécessité professionnelle, a envie de comprendre comment les générations qui l'ont précédée ont occupé l'espace territorial et appris à y vivre et à en vivre. C'est une façon objective d'estimer l'impact réel de l'Homme sur son territoire, et de découvrir par quoi se manifeste la dynamique géologique ordinaire de ce territoire.

Abstract

The following text is a field trip report. This trip was organized by the Société Géologique du Nord (SGN) from Villeneuve d'Ascq. It is not restricted to geologists, either amateurs or professionals. Such a trip is opened to any people who, as a pleasure or work constraint, wants to understand how preceding generations lived on a territory, how they learnt to live with and to feed from. It is an objective way for estimating the real impact of Man onto his territory, and also to discover how the natural geological dynamics is working on this land.

INTRODUCTION

Environ 30 personnes ont participé en ce 28 septembre 2019 à une sortie en bus, ce qui permet à tous de partager les commentaires et de disposer d'une situation d'observation un peu surélevée. Cette sortie forme une boucle partant de Villeneuve d'Ascq (Cité Scientifique) par la A25 et y revenant par la A1 (Fig. 1 et 2). Elle va rechercher à la frontière

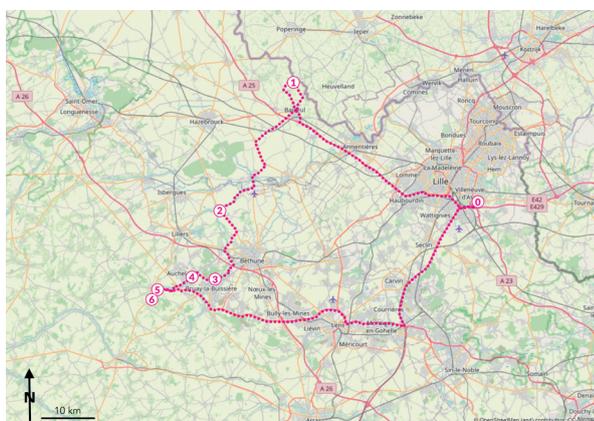


Fig. 1. – La carte routière avec itinéraire et arrêts numérotés. Fonds de carte extrait de Open Street Map.

Fig. 1. – Road map with pathway and numbered stops. From Open Street Map.

belge (Mont Noir = arrêt 1) un point d'appui pour traverser tous les types de paysages qui, entre les monts de Flandres et les collines d'Artois, ont fourni des ressources diverses à de multiples générations depuis environ 200 000 ans. Elle permet

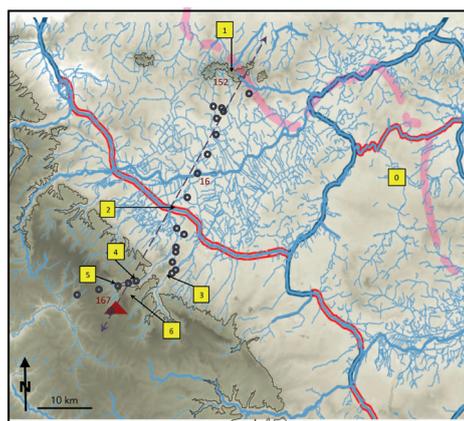


Fig. 2. – Carte orographique et hydrographique : la courbe de niveau 80 sépare Haut-Pays et Bas-Pays ; les canaux de liaison sont encadrés de rouge (source : CAUE-Nord) ; les cercles noirs localisent les sondages consultés dans la Banque du Sous-Sol (BSS/Infoterre). Le trait en tireté et double flèche localise le trait de coupe discuté dans le texte (Fig. 5, 17, 21 et 25).
Fig. 2. – Topographic and hydrographic maps: the 80m contour line separates Highland from Lowland; link-canals are bracketted in red; black circles localize boreholes from the Web (Infoterre). Double-headed and dashed line localizes the herewith disputed cross-section (Fig. 5, 17, 21 and 25).

aussi d'apprendre à « lire » dans ces paysages des marqueurs, plus ou moins discrets, de toutes les activités que toutes les sociétés humaines ont laissés. Sur un site donné, en faisant l'effort de s'abstraire de tout élément artificiel récent (revêtements routiers, voies ferrées, ...), elle permet enfin de réfléchir aux questions que devaient se poser nos ancêtres quant à leur capacité de vivre dans ce milieu plutôt que dans un autre.

La géologie de ce territoire est faussement simple (Fig. 3). Les monts de Flandres sont des buttes de sable et d'argile, résidus d'une phase d'intense érosion dont l'âge et les causes ont fait l'objet d'une abondante littérature. Ils s'alignent de l'Aa à l'ouest, jusqu'au méridien de Bruxelles à l'est, et sont partiellement effacés entre Armentières et Tournai pour laisser passer la Lys et l'Escaut. La signification de cet alignement reste affaire de spéculations, même si plusieurs hypothèses ont été formulées. Les collines d'Artois sont formées de craie. Çà et là elles supportent de très modestes pastilles sableuses qui attestent que les terrains aujourd'hui situés sous les monts de Flandres, ont bien été déposés ici également. Il est donc nécessaire de concevoir un épisode de déformation régionale sévère ayant provoqué ce changement de position relative entre l'un et l'autre sites. La

réalité d'une déformation est attestée par la présence de roches beaucoup plus anciennes qui pointent au fond des vallées, au pied des collines d'Artois, remontées par des failles. Unique et continue, ou multiple et saccadée, cette déformation a engendré des reliefs dont l'érosion doit avoir laissé des traces, notamment de nouveaux dépôts sédimentaires en aval des sites érodés. C'est le principe même du recyclage permanent des matériaux naturels qu'étudie la géologie et la géographie physique. Ce raisonnement accompagne nos observations tout au long du parcours. Entre les monts de Flandres au nord et les collines d'Artois au sud, la plaine de la Lys est justement un territoire où une sédimentation récente et abondante semble avoir uniformisé la topographie. Il faut le regard acéré de l'archéologue du Quaternaire pour décrypter dans ces dépôts superficiels apparemment homogènes, certaines étapes récentes de la déformation que l'on cherche à caractériser.

Les codes stratigraphiques utilisés (Tableaux 1 et 2) sont homogénéisés ici car les diverses cartes géologiques publiées (imprimées ou numériques) diffèrent en fonction du code en vigueur lors de leur édition.

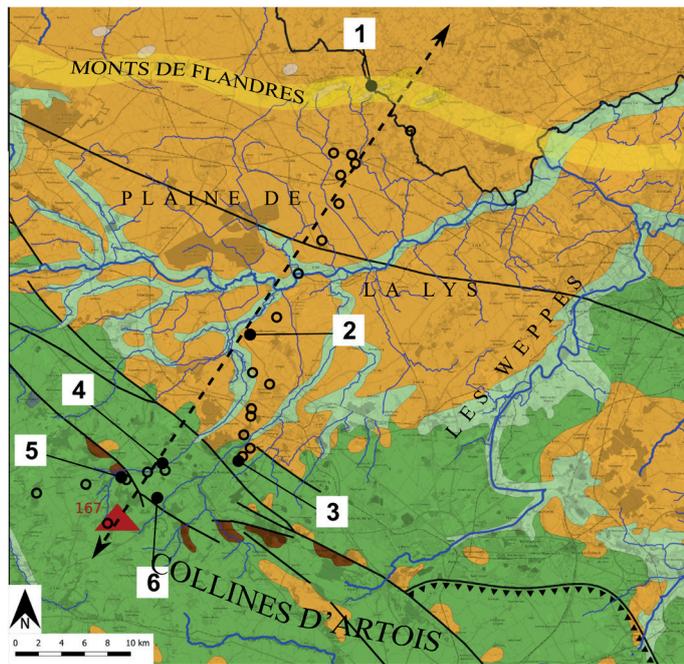


Fig. 3. – Carte géologique (© L. Deschodt) avec les arrêts (numéros encadrés) et les sondages repris en Fig. 25 ; vert clair = alluvions récentes, vert = Crétacé supérieur, jaune = Cénozoïque, brun = Paléozoïque.
 Fig. 3. – Geological map with stops (boxed numbers), and boreholes from BSS (small circles are those used in Fig. 25); light green = Recent alluvial deposits, yellow = Cenozoic, deep green = Upper Cretaceous, brown = Palaeozoic inliers.

Tableau 2. – Nomenclature stratigraphique des terrains quaternaires utilisée dans cette publication. Source des âges : ICS v2018/07 (www.stratigraphy.org).
 Table 2. – Stratigraphical codes of Quaternary beds used in this publication. Age source : ICS v2018/07 (www.stratigraphy.org).

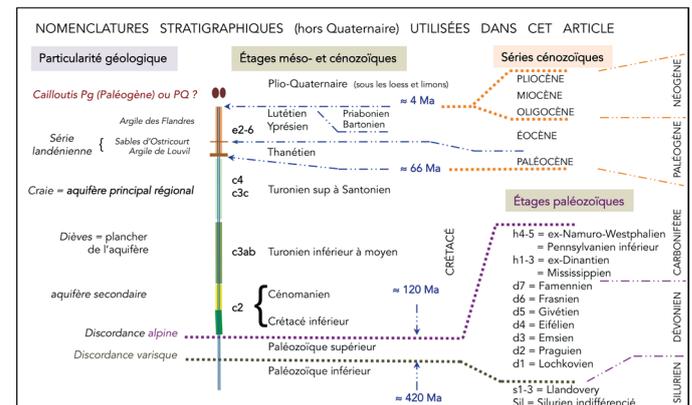
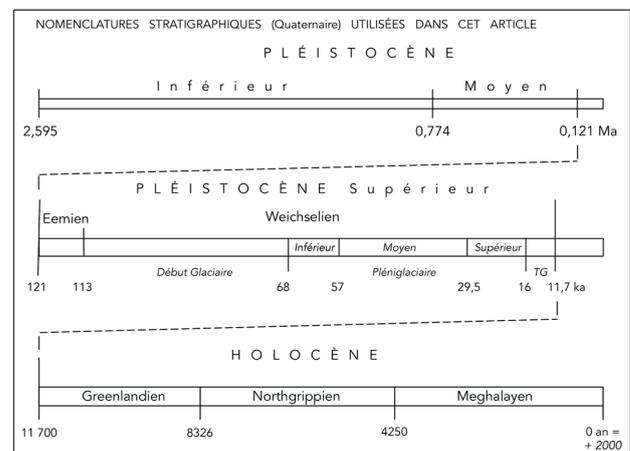


Tableau 1. – Nomenclature stratigraphique utilisée dans cette publication pour les terrains anté-quaternaires identifiés sur les coupes et cartes. Source des âges : ICS v2018/07 (www.stratigraphy.org).
 Table 1. – Stratigraphical codes of pre-Quaternary beds in use in this publication for units that are identified on cross-sections and maps. Age source : ICS v2018/07 (www.stratigraphy.org).



LES THÈMES

De nombreux thèmes étaient possibles pour aborder les relations entre l'Homme et le territoire au cours des millénaires. Le but est de montrer que l'un et l'autre vivent et changent au cours du temps, mais sur des gammes cinématiques propres, très distinctes. L'eau est l'un des principaux agents d'évolution du paysage. C'est également un élément dont l'Homme, comme tout être vivant, ne peut se passer. Nous suivrons donc les relations de l'un et de l'autre avec l'eau.

Le territoire dans son ensemble et son rapport à l'eau de surface

Le géomorphologue voit un territoire peu contrasté : altitudes variant de 17 m (plaine de la Lys) à près de 200 m (crête de l'Artois). Sommé (1977, p. 11) a fait remarquer que « l'isohypse [courbe de niveau] de 80 m permet [...] de limiter grossièrement l'auréole des hauteurs qui forment le haut-pays ; elle semble trouver aussi sa justification dans le domaine bio-climatique. » Cette proposition est passée dans l'usage. Hormis les arrêts 1, 5 et 6, le parcours sillonne donc surtout le bas-pays (Fig. 2). Limitée au nord par les monts de Flandres, sableux à intercalations argileuses, au sud par les collines d'Artois, crayeuses, la plaine de la Lys est peu perméable, comme le révèle la densité du réseau hydrographique (Fig. 2). Sous un placage de limons divers qui peut atteindre jusqu'à 6 m d'épaisseur, le sous-sol de la plaine est constitué par l'Argile des Flandres et diverses formations surtout sableuses (Yprésien à Lutétien, voire davantage : Fig. 3 et Tableau 1), matériau géologique dont les monts de Flandres constituent des buttes-témoins (Fig. 3). Sous cette dernière, l'ensemble (Thanétien) des Sables d'Ostricourt et de l'Argile de Louvil forme une bande plutôt étroite, discordante sur la craie des collines d'Artois. Même couverte de limons, la craie est perméable et les cours d'eau y sont peu nombreux. Des monts de Flandres comme des collines d'Artois ils convergent jusqu'à la Lys. Les générations humaines qui se sont succédé sur ce territoire ont ajouté un lacs complexe de becques, c'est-à-dire de fossés de drainage qu'il est, en bien des endroits, difficile, voire impossible de discerner des cours d'eau naturels. Enfin, il faut remarquer que, dans leur partie aval, l'Yser, la Lys et l'Escaut traversent sans aucune déviation l'alignement des monts de Flandres. Après plusieurs autres observateurs, Sommé (1977) en a déduit qu'il n'y a pas de cohérence parfaite entre les organisations hydrographique et orographique. En termes simples cela signifie que le relief actuel n'est pas simplement l'expression d'une érosion par les cours d'eau actuels, mais qu'il faut envisager des influences climatiques et tectoniques dont il reste à décrypter les marques locales.

Le fleuve Escaut a un bassin versant de forme sommairement rectangulaire, allongée du sud-ouest (collines d'Artois) au nord-est (environs de Tongres, en Belgique) (Fig. 4). Son

bassin d'alimentation, en forme d'entonnoir, est situé en territoire français. Or les 2 millions d'habitants de l'Euro-métropole Lille – Kortrijk – Tournai sont entassés (environ 600 hab./km²) « au fond de l'entonnoir ». L'imperméabilisation artificielle des sols (urbanisme et voirie) amplifie le ruissellement et réduit l'infiltration, facteurs d'inondabilité. Outre cette cause anthropique, deux autres sont naturelles : la topographie plate et la nature argileuse (très peu perméable) dominante du bas-pays, lesquelles contribuent aussi à la prépondérance du ruissellement sur l'infiltration et à la faiblesse de l'évacuation naturelle, gravitaire, de l'eau. Ces trois raisons font peser sur la concentration urbaine un risque d'inondabilité qui ne peut que s'accroître avec le temps, à moins qu'une prise de conscience de tous les citoyens, usagers de ce territoire, ne conduise à des réalisations qui n'entravent pas l'écoulement naturel de la Lys, de l'Escaut et en préservent le fonctionnement (régulation des flux, tamponnement de crues). C'est un thème majeur de cette visite de terrain.

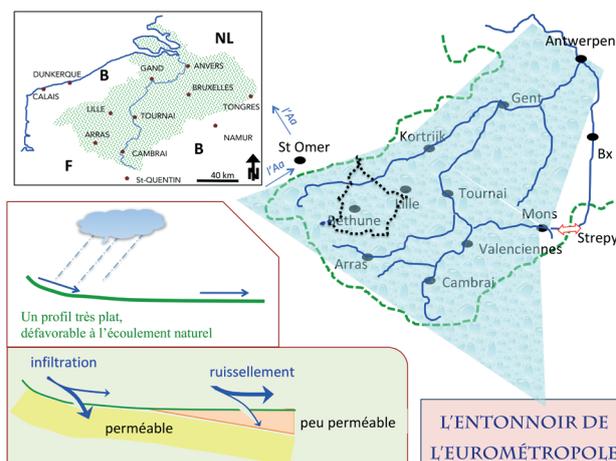


Fig. 4. – Schémas pour illustrer la circulation de l'eau à l'échelle régionale sur la surface du sol : l'entonnoir de l'Eurométropole Lille-Kortrijk-Tournai est modifié d'après le schéma proposé par F.M. au Conseil de Développement de la Métropole Européenne de Lille. Commentaires dans le texte. Fig. 4. – Sketches about regional flowing water on soil surface: the Lille-Kortrijk-Tournai Eurometropole sinkhole is modified from a previous sketch prepared for the Development European Lille Metropole council. Comments within the text.

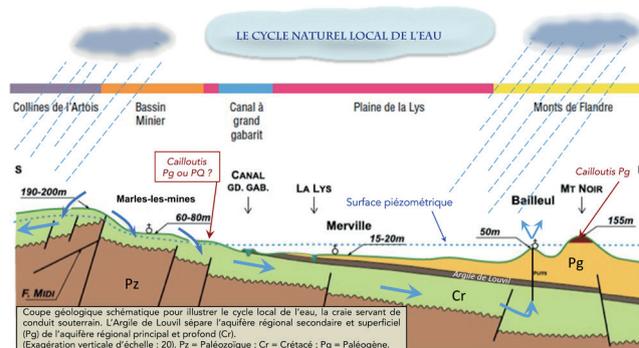


Fig. 5. — Coupe géologique schématique entre les monts de Flandres (arrêt 1) et les collines d'Artois (arrêt 6) (modifié d'après dessin de l'Agence Présence).

Fig. 5. — Sketched geological cross-section between Flanders mountains (stop 1) and Artois hills (stop 6) (modified from previous Presence Agency sketch)

Le territoire dans son ensemble et son rapport à l'eau souterraine

L'autre thème majeur est lié à l'eau souterraine en tant que ressource. Une coupe géologique simplifiée (Fig. 5) illustre la disposition des couches, dont le contenu détaillé sera décrit au fil des arrêts. Bien que schématique, elle est comparable à celles qu'avait dessinées Gosselet (1921). Le pendage général de la série vers le nord explique que du nord vers le sud les couches se suivent de la plus jeune à la plus ancienne :

- ✧ une couche irrégulière de limons quaternaires variés, qui a sans doute tout tapissé avant d'être localement érodée ; la Lys a gravé son lit dedans (entre arrêts 1 et 2) ;
- ✧ un ensemble de quelques dizaines de mètres de dépôts éocènes (argiles de l'Yprésien, passant progressivement aux sables du Lutétien) constitue l'essentiel du volume des monts de Flandres (Nolf & Steurbaut, 1990) (arrêt 1) ; sa base forme le plancher de la plaine de la Lys (arrêt 2) ;
- ✧ quelques mètres de Sables d'Ostricourt (Thanétien) forment le plateau laniéré au sud de la plaine de la Lys (arrêt 3) ; à leur base, la couche de l'Argile de Louvil dont le rôle hydraulique est important (Tableau 1) ;
- ✧ les craies du Crétacé supérieur (arrêts 2, 3, 4, 6) contiennent la principale ressource en eau souterraine du territoire ;
- ✧ les terrains paléozoïques (arrêts 3, 4, 5), dont le bassin houiller entièrement souterrain.

L'eau de pluie arrose tout le territoire et s'infiltré dans les craies des collines d'Artois. Après un parcours souterrain pas toujours connu précisément, l'eau ressort par diverses sources qui alimentent des ruisseaux plus ou moins permanents et rejoint des rivières bien réglées comme la Lawe et la Clarence dont nous allons remonter en partie le cours. Ces dernières s'écoulent vers le nord-est, jusqu'à la Lys. Au sud de Marles-les-Mines, la craie affleurante détermine un plateau au travers duquel la pluie s'infiltré et alimente la nappe, libre ici. Au nord de Marles, l'Argile de Louvil recouvre la craie et la nappe devient captive. Elle continue à s'écouler gravitairement vers le nord, suivant le pendage des couches de telle sorte que les localités situées en aval peuvent l'exploiter *via* des forages dits artésiens (exemple de Bailleul). Ce terme artésien qualifie une disposition où l'eau jaillit spontanément d'un puits dès lors que celui-ci atteint la ressource souterraine captive. La condition nécessaire est que la tête du puits se trouve SOUS la surface piézométrique, c'est-à-dire la surface d'équilibre en pression de l'eau. La plaine de la Lys est si basse que cette condition est vérifiée partout. L'artésianisme est une caractéristique régionale (dérivé de *Artois*) ; le terme est utilisé par les hydrogéologues du monde entier. (Explications complémentaires au fil des arrêts.)

De cette disposition, il faut retenir le principe de solidarité dans l'espace et le temps que partagent les habitants de ce territoire, sans en avoir conscience. Les caractéristiques moyennes de perméabilité de la craie permettent de dire que l'eau de pluie prend à peu près 40 ans pour parcourir les quelques 40 km qui séparent les collines d'Artois du site de Bailleul. C'est un ordre de grandeur et non une mesure précise. Cet exemple illustre la nécessité d'une vision globale de la gestion de l'eau à l'échelle d'un bassin versant, quelles que soient les frontières qui les traversent. Il reste à en convaincre toutes les collectivités territoriales, quel que soit leur rang.

L'ITINÉRAIRE ET LES POINTS D'OBSERVATION

Départ du parking de la station de métro M1/4 Cantons (Villeneuve d'Ascq) et trajet autoroutier jusqu'à la sortie 10/A25 en direction de Bailleul. Rappelons que la « colline » d'entrée à Lille, dans le délaissé des embranchements (A1/A25/A356), est artificielle : elle a été façonnée avec une partie des déblais de terrassement du métro. Nous empruntons le boulevard périphérique de Lille-Sud en direction de la A25. Le *Bool werk* (le chemin du canon) suit les anciennes murailles qui protégeaient la ville ; elles étaient bastionnées. La dépression qui suit le viaduc (pour passer sous la rue de Douai) entaille la craie, visible à droite en période de basse végétation, mais sous 2 à 3 m de remblais. Puis, la bosse située au niveau du lycée Baggio permet de franchir les casemates des bastions de la fortification du XIX^e siècle. Les saillants de celle-ci ont été placés à cet endroit pour tenir à distance les moyens ennemis pouvant prendre position sur les assises calcaires (la craie) du site (cf. la Webographie : système Séré de Rivières ; voir aussi Bergerat *et al.*, 2018).

Parvenu au Port de Lille, l'autoroute en remblais longe la Deûle en rive droite avant de la franchir au niveau d'Haubourdin. Le port fluvial de Lille a migré d'aval (Vieux Lille) en amont au fil des siècles selon la croissance de la ville. Ceci montre qu'un marqueur fonctionnel peut migrer avec le temps. Dans le prolongement du port, se trouve, surélevée par rapport aux terrains marécageux environnants comme on le verra aussi plus loin, l'ancienne Abbaye cistercienne de Loos-lès-Lille, construite en 1146 (voir Webographie). Au-delà, le profil de la route s'élève avec le terrain naturel jusqu'à la crête couronnée du fort d'Englos, un autre élément du système Séré de Rivières, à droite sur la crête des Weppes (50 m). À gauche de l'autoroute, le village d'Englos est lové en tête d'un vallon qui descend de la crête (40 m) vers la plaine de la Lys (22 m). De ce fait, en 1914, l'église d'Englos n'avait que le clocher dépassant du vallon ; il a été détruit par les Allemands pour ne pas servir de repère spatial, mais le corps du bâtiment a pu être préservé ; décoré de peintures murales, il est aujourd'hui classé MH. À proximité, le développement du centre commercial illustre l'intensité de la déprise agricole au profit de l'urbanisme.

La A25 longe la commune d'Ennetières-en-Weppes en descendant le « talus des Weppes » dont le sous-sol proche est constitué par la série landénienne (Tableau 1). Celle-ci repose sur la craie qui affleure dans le Mélantois (carrières d'Hau-bourdin, Emmerin et Loos-lès-Lille). Le tapis d'alluvions de la Deûle masque le contact entre les deux. Vers l'ouest, le faible pendage de la série landénienne permet à l'Argile des Flandres de lui succéder et de former le tréfonds de la plaine de la Lys.

Le bus passe sous la LGV Transmanche et entre dans la plaine de la Lys. C'est une surface plane, à habitat dispersé mais densément cultivée. Les becques y sont nombreuses ; en période pluvieuse, les flaques d'eau en attente d'infiltration aussi. En première approximation, une telle platitude s'explique par un processus de ragréage, c'est-à-dire par étalement gravitaire d'un matériau fluide très chargé en particules. En l'occurrence, il s'agit de l'étalement de sédiments alluvionnaires et éoliens des périodes glaciaires (voir § II-2). La Lys canalisée, large d'une trentaine de mètres, est franchie à hauteur de l'échangeur 9/A25 (Armentières). Le cours est faiblement incisé dans le lit majeur large de plusieurs centaines de mètres. Le profil transversal n'évoque pas le V d'une vallée « d'école ». Dès la sortie de l'autoroute en direction de Bailleul le bus traverse une zone d'activités diverses et d'hébergement pour nomades, caractéristique de la périphérie de nombreuses agglomérations urbaines, assujettie à inondations épisodiques par ruissellement et défaut d'infiltration.

Les monts de Flandres : Arrêt 1 (Fig. 1 et 6)

Le Mont Noir est à l'intersection de la frontière franco-belge et d'un alignement de buttes-témoins qui intrigue car elles sont formées de sables et d'argiles, matériaux *a priori* sensibles à l'érosion (Robaszynski & Guyétant, 2009, p. 96-97).

Nous montons sur la butte de Bailleul et tournons à droite vers Ypres. Le bus passe devant la bibliothèque municipale devant laquelle figurait jusqu'en 2015 la margelle d'un puits qui avait été artésien (Fig. 7). En 1997-98 la consultation de la Banque de Données du Sous-Sol (dossiers en papier, aujourd'hui tous numérisés - voir Webographie : Infoterre) avait alors mené à constater qu'au cours du dernier quart du XIX^e siècle, les géologues lillois avaient répondu à l'appel d'industriels de Bailleul en leur conseillant la réalisation de forages profonds pour atteindre l'aquifère de la craie, et aménager des puits artésiens (voir § II-2). Au sommet de Bailleul même, près de la cote 50, ces « fontaines jaillissantes » produisirent assez d'eau pour installer un réseau gravitaire, et abandonner l'alimentation antérieure qui se faisait par drainage souterrain dans la partie sableuse de l'Argile des Flandres (Fig. 8).

Nous suivons la route menant vers le Mont Noir, et observons au nord-ouest, dès la sortie de Bailleul, le profil du Mont Noir. Au sommet, nous passons devant l'entrée du camping de « La Sablière », puis nous arrêtons en bord de route devant la maison des gardes de la Base départementale

M. Yourcenar (Fig. 6). Nous nous engageons à pied dans le Chemin des Anglais, jusqu'à rejoindre une petite maison accolée à une reconstitution de « grotte de Lourdes » (chapelle N.-D. de la Salette). La partie supérieure du mont, est coiffée de grès ferrugineux très résistant à l'érosion, dont la présence suffit à justifier la persistance actuelle des monts de Flandres en tant que buttes-témoins.

Cette couverture protectrice a excité la curiosité de tous les géologues depuis le début du XIX^e siècle. En fait, il faut découpler deux phénomènes qui ne sont pas nécessairement synchrones :

- ✧ le dépôt sédimentaire d'un ensemble marin à dominante sableuse dont Houthuys (2014) a caractérisé l'environnement infralittoral en Belgique centrale (Formation des Monts de Flandres = *Flemish Hills Formation*) ; l'auteur y reconnaît un cortège régressif comblant par progradation son espace libre ;
- ✧ une ferruginisation ultérieure (Miocène terminal à Pliocène ?) par imprégnation des parties poreuses des sables dans des conditions climatiques favorables à la précipitation du fer dissout dans les ruissellements.

Ces grès ferrugineux coiffent une série sableuse dont l'épaisseur actuelle varie selon les lieux : une quinzaine de mètres au Mont Noir (Sommé, 1977). La présence de figures de dynamique hydraulique (stratification oblique, ravinement) dans certains blocs démontre la forte énergie des courants d'eau intermittents transportant les graves, eux-mêmes très arrondis. Certains bancs sont franchement conglomératiques : matrice de sable grossier et galets nuculaires à pugillaires, de silex noirs, roulés, à patine grise à blanchâtre (Fig. 9). Ces galets ne sont pas cassés : leur mise en place est antérieure aux diverses glaciations régionales. Leur présence dans ce dépôt implique qu'en amont des affleurements de craie à silex aient été soumis à érosion par un réseau hydrographique énergétique. La ferruginisation ultérieure atteste de conditions de mise en place sous climat tropical lessivé (Duchaufour, 1991, p. 215 : sols ferrugineux). De telles conditions ont laissé leurs marques sur le Massif ardennais et à sa périphérie (Yans *et al.*, 2020), comme autour de tous les massifs varisques connus à l'affleurement en Europe. Nombre de localités en témoignent par leur nom (Ferrières, et dérivés) et les pierres souvent employées dans la construction, pour leur solidité mais aussi pour l'aspect esthétique des façades (Ypres et environs). Le sable lutétien assure les conditions requises pour une telle évolution pédologique. Mais dans quel paysage ?

Le raisonnement d'un type nouveau, porté par Houthuys (2014), basé sur la caractérisation des faciès de dépôt et de leur organisation séquentielle, rend compte des variations latérales observées et corrélées de proche en proche. Ses conclusions accommodent les observations patiemment recueillies, que Sommé (1977) a résumées, sur la texture des sédiments sableux,

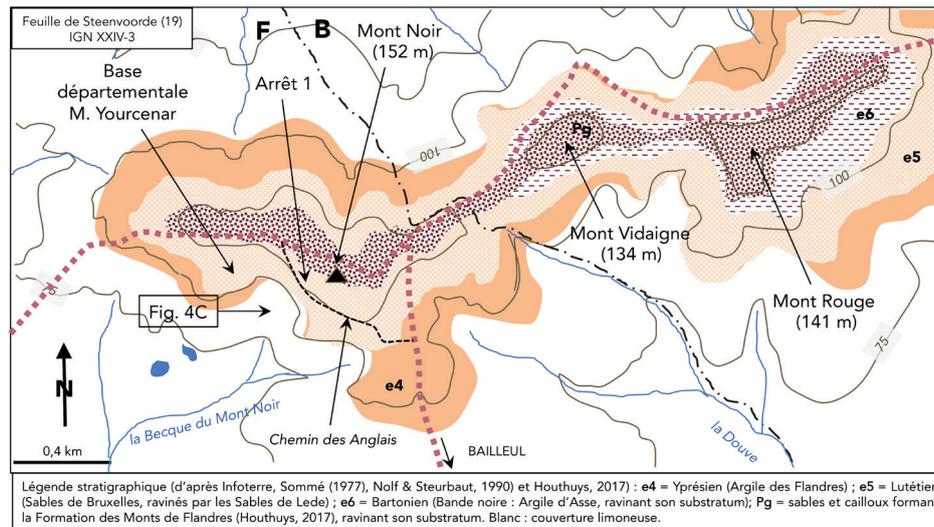


Fig. 6. – Le site du Mont Noir (arrêt 1) : carte géologique simplifiée (source : Infoterre). Légende : voir Tableau 1.
 Fig. 6. – Mont Noir site (stop 1): Simplified geological map (source: Infoterre). Captions: see Table 1.



Fig. 7. – Puits artésien de Bailleul : en 1997, une plaque de pierre bleue (calcaire), gravée, disait que ce puits avait été artésien, que le niveau d'eau était alors stabilisé à 40 m de profondeur et que l'artésianisme s'était arrêté vers 1921-1922. Vers 2015, la maçonnerie a été démontée et le puits obturé. © B. Poncelet.

Fig. 7. – Artesian well: on 1997, an engraved limestone (« pierre bleue ») brought an inscription that said it was Artesian, water table was stabilized at 40 m deep at that time, and that artesianism vanished during 1921-22 years. By 2015, the well was closed and its masonry destroyed. © B. Poncelet.



Fig. 8. – Tunnel briqueté dans le Mont Noir ayant servi de collecteur de sources dans les niveaux sableux du Lutétien. © F. Meilliez (2012).
 Fig. 8. – Tunnel with a brickwork cover below the Mont Noir; long time ago it had been used as a water collector flowing from Lutetian sands. © F. Meilliez (2012).



Fig. 9. – Site du Mont Noir (arrêt 1). N.-D. de la Salette. Mur extérieur de la petite maison construit avec des grès ferrugineux dont certains sont conglomératiques. © F. Meilliez (2012).
 Fig. 9. – Mont Noir site (stop 1). N.-D. de la Salette. External wall of the small house that have been built with ferruginous conglomeratic brown sandstones. © F. Meilliez (2012).

sur les cortèges de minéraux lourds. Schématiquement, le scénario qui s'accorde avec celui validé pour le Bassin de Paris (Wyns, 2014) reconstitue un bassin sédimentaire marin qui a débordé sur ce dernier depuis le nord, puis a été différencié par une activité tectonique régionale.

✧ Étage Thanétien (durée d'environ 3 millions d'années) : le dépôt de la série landénienne (Tableau 1), sablo-argileuse, ennoie un paysage calcaire corrodé dont les variations topographiques sont mises en évidence par les variations locales de l'âge de la transgression.

✧ Étage Yprésien (environ 8,2 millions d'années) : dépôts de cortèges argileux, de plus en plus sableux vers le haut, assez homogènes sur le futur territoire belge et le nord de la France (Laga *et al.*, 2001).

✧ Étage Lutétien (environ 6,6 millions d'années) : la compression pyrénéenne commence à faire sentir ses effets. Les anticlinaux du Pays de Bray et de l'Artois, dont la différenciation est antérieure, émergent peu à peu, par à-coups. Les courants marins se modifient, la sédimentation aussi. En Belgique centrale, à deux reprises, une large baie s'individualise vers le sud-sud-ouest, et se comble par des cortèges sableux régressifs, transportant aussi divers graves roulés, dont des silex issus d'affleurements crayeux. Ce sont d'abord les Sables de Bruxelles, puis les Sables de Lede (Houthuys, 2011, 2014), présents aussi dans les monts de Flandres (Nolf & Steurbaut, 1990).

✧ Transition du Lutétien au Bartonien : la série sablo-argileuse (Formation de Maldegem) qui recouvre le tout est composée de plusieurs unités sédimentaires (Laga *et al.*, 2001). L'une d'elles (Argile d'Asse), une argile organique, est particulièrement connue sous le nom commun de *bande noire*. On la retrouve vers le sud-ouest dans plusieurs monts de Flandres (Sommé, 1977), mais pas tous. Cette Argile d'Asse (e5 et e6 sur Fig. 6), a été l'objet de deux datations radiochronologiques vers 42 Ma (*in* Sommé, 1977, p. 128).

✧ Étages Bartonien (environ 3,4 millions d'années) et Priabonien (environ 3,9 millions d'années) : puisque le dépôt de la Formation des Monts de Flandres ravine la *bande noire*, Houthuys (2014) le date de la période finale de l'Éocène.

✧ Oligo-Miocène (environ 28,5 millions d'années) : la Belgique occidentale et le nord de la France n'ont enregistré aucun dépôt sédimentaire de cette longue période. Le centre de dépôt s'est déporté vers le nord-est. Les terrains exondés ont été soumis à érosion par un système de drainage naissant (Houthuys, 2014), puis à une altération météorique forte (Yans *et al.*, 2020). Les conditions de la ferruginisation étaient en place.

Ce secteur a connu une histoire géologique mouvementée. Entre autres, des sondages ont permis de localiser la ville de Bailleul entre deux failles (Gosselet, 1898) ayant accommodé plusieurs épisodes de déplacement, de sens variable, et dont le dernier mouvement daterait du Pléistocène supérieur (Sommé, 1977, p. 435).

Nous retournons à Bailleul en descendant par St-Jans-Cappel. Sur la route, nous observons la nécessité – pas toujours suivie – de labourer les pentes basses perpendiculairement à la pente du terrain pour limiter l'érosion de la terre arable et l'engorgement qu'elle provoque dans le réseau d'eaux pluviales et collecteurs du village. Nous remontons sur la place de Bailleul et partons en direction de Vieux-Berquin, en passant devant l'actuel château d'eau qui a pallié la disparition de l'artésianisme au début des années 1920 (voir supra et infra).

La plaine de la Lys : Arrêt 2 (Fig. 1 et 10 à 12)

Ce territoire agricole demeure une énigme géologique, enserrée entre les monts de Flandres et les collines d'Artois (Waterlot, 1969). À première vue (Fig. 10A), le bassin de la Lys est un bon exemple de bassin plat de 1 900 km² de superficie, avec un cours axial vers lequel convergent divers affluents. Mais un examen un peu attentif révèle nombre de faits que l'érosion seule n'explique pas. À sa source, la rivière sort d'un puits naturel, sur le versant sud des collines d'Artois et coule de façon conséquente vers le sud. Puis entre Fruges et Théroüanne elle dessine un arc de cercle qui tranche la crête de l'Artois avant de s'engager, à partir d'Aire/la Lys, dans une plaine, singulière par son ampleur : c'est une sorte de quadrilatère que la Lys traverse dans sa longueur sur environ 40 km (Fig. 10A). Au nord-est, au sortir de la plaine, la Lys occupe une vallée large et linéaire jusqu'aux abords de Kortrijk. À hauteur de Merville la largeur atteint 20 km. La plaine couvre environ 815 km², dont environ 75 km² en Belgique (Warneton – Wervik). À l'entrée dans la plaine, la Lys coule à fleur de sol. Une observation fine permet de voir cependant que le lit majeur s'incise progressivement dans la vallée et s'élargit, jusqu'à déterminer, en aval d'Armentières, un véritable profil transversal en U, profond de 6 à 10 m selon les endroits (Fig. 10B). En amont d'Armentières, les versants bordiers de la plaine se présentent comme des talus nets et vigoureux avec des sections rectilignes. Un commandement de l'ordre de 20 à 30 mètres est fréquent, comme on peut l'observer en passant à Outtersteene, en descendant dans la plaine au sud de la A25. Au nord, ces talus sont taillés dans l'Argile des Flandres ; à l'est, dans la série landénienne, voire la craie directement au sud-est ; au sud et sud-ouest, ils le sont dans la craie aussi, sauf à Mont-Bernanchon, juste après l'arrêt 2 (voir plus loin). Avec de telles dimensions, la plaine est totalement disproportionnée par rapport au débit de la Lys : 22,8 m³/s à Werwick sud (voir Webographie : Banque Hydro).

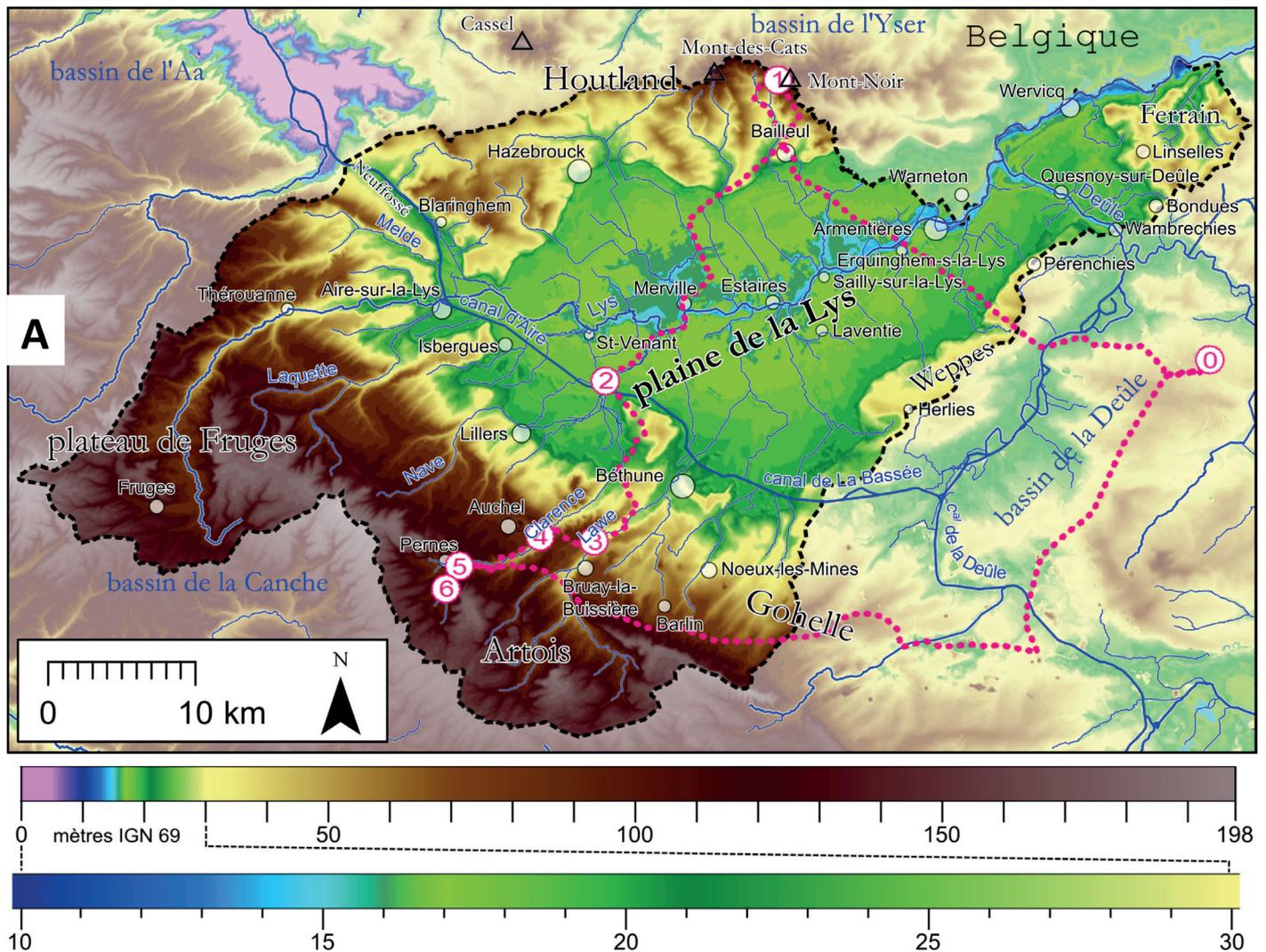
Considérée à petite échelle, la plaine peut être décrite comme quasi plane, avec des variations d'altitude minimales.

Cependant, ces légères variations forment une pente certes faible, mais nettement dirigée vers le centre de la plaine (environ 20-21 m d'altitude en bordure contre 17-18 m en partie centrale). Il est difficile de distinguer le réseau originel des becques d'un réseau de drainage dense, en dehors du tracé en méandres des principaux cours d'eau et un encaissement parfois vigoureux (plusieurs mètres) *via* de petits versants convexes de lits majeurs (Fig. 10A). Une microtopographie d'origine anthropique complique la perception du relief naturel. Il s'agit de champs bombés, au dénivelé parfois supérieur au mètre, formé à la bêche ou à la charrue dans le but de faciliter l'écoulement vers un réseau de drainage périphérique (Dion, 1983). Ces méthodes s'apparentent aux pratiques culturales intensives utilisées avant la mécanisation dans les plaines flamandes belges où elles ont modifié la topographie et la pédologie sur de très grandes surfaces (Langohr, 2001).

De nombreuses questions restent en suspens à propos de l'origine de la plaine de la Lys (Briquet, 1905 ; Dubois, 1925). Plusieurs auteurs ont soupçonné, sans réellement la

démontrer, une influence tectonique conjointe à l'érosion fluviale (Gosselet, 1921 ; Paeppe, 1964, 1965 ; Sommé, 1977). Colbeaux *et al.* (1978) l'ont rattachée à une « tectonique de blocs », confirmée dans le contexte extensif associé à la transgression du Crétacé supérieur (Robaszynski, 1987 ; Meilliez, 2018 ; Meilliez *et al.*, 2019). La sédimentation s'étant interrompue avant la fin de l'Eocène avec le soulèvement de l'Artois, concernant le Cénozoïque pré-Quaternaire (Tableau 1), les observations sont trop peu abondantes et précises pour élaborer aujourd'hui un schéma crédible de reconstitution.

Sous la plaine quasi-plane, les sédiments quaternaires montrent de fortes variations d'épaisseur (de 2 à plus de 25 m) et masquent deux paléo-vallées : une paléo-Lys et une paléo-Lawe profondément incisée sous la cote zéro. Elles sont essentiellement remblayées par des formations sableuses (Fig. 11). Elles confluent dans la région d'Armentières. À Erquinghem-sur-la-Lys, un carottage a mis en évidence des dépôts alluviaux tourbeux d'âge éémien (environ 110 000 ans) sous la cote zéro (Sommé *et al.*, 1996). Cependant il faut se souvenir que la cote zéro d'aujourd'hui doit être équivalente



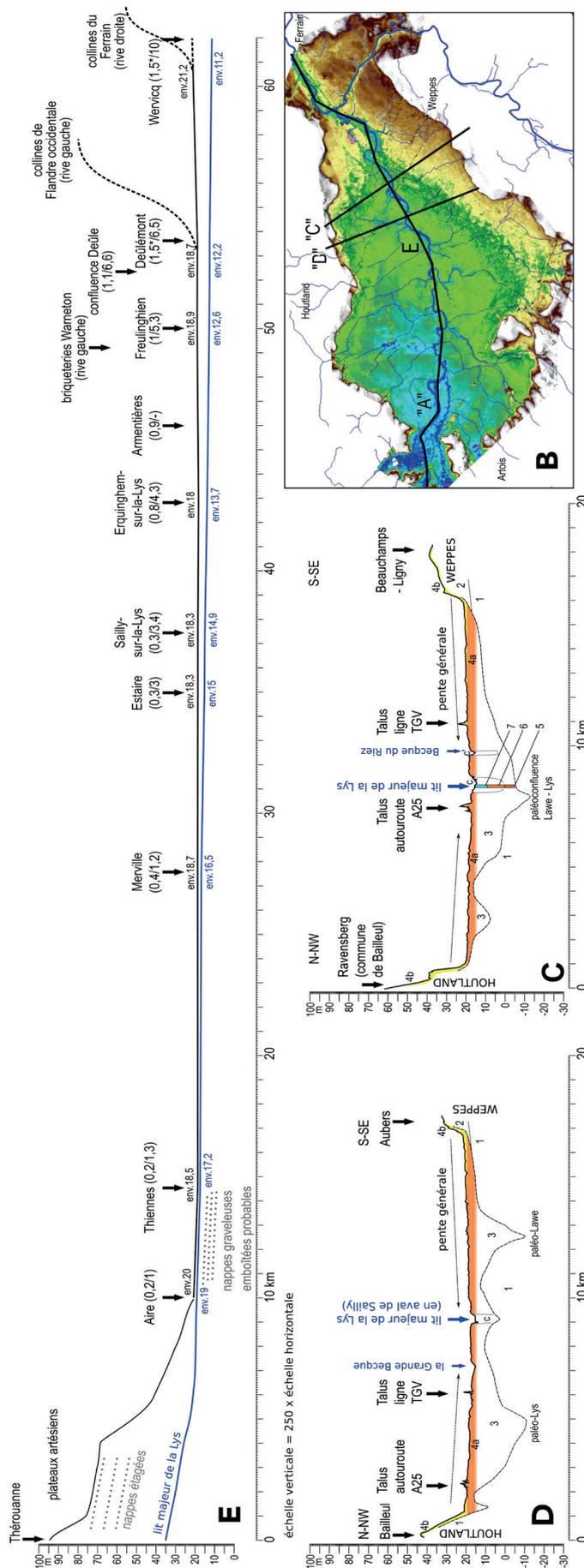


Fig. 10. – La plaine de la Lys (Source MNT : PPIGE (GRID 2012-2013) ; A – Bassin versant français de la Lys et itinéraire (source MNT : Bdti20 de l'IGN) ; B – Altitude de la plaine de la Lys par rapport à un plan théorique d'écoulement des eaux. ; référence zéro arbitraire prise le long du lit majeur de la Lys ; C et D – Profils transversaux (situés sur carte 5B) et composition de la base du Quaternaire, avec : 1, argile yprésienne ; 2, sable et argile thanétiens ; 3, comblement pléistocène sableux indifférencié, à dominante fluviéo-éolienne à dominante limoneuse ; 4b, loess sur versant, en continuité stratigraphique avec 4a ; 5, tourbe éémienne attestée (carottage d'Erquinghem) ; 6, dépôts alluviaux sableux de la fin du Pléni-glaciaire weichsélien (carottage d'Erquinghem) ; 7, alluvions holocènes ; E - Profil longitudinal du lit majeur et son encaissement progressif vers l'aval de la plaine ; indication des villes jouxtant la rivière avec entre parenthèses, la largeur du lit majeur (en km) et son encaissement approximatif (en m) ; pour Deulémont et Werwicq, la largeur du lit mesuré dépasse le lit majeur *sensu stricto* et inclut un probable système de basse terrasse encaissé par rapport à la surface de la plaine ; la situation des nappes graveleuses en amont est indicative, sans positionnement précis.
 Fig. 10. – The Lys plain (Source MNT : PPIGE (GRID 2012-2013) ; A – French Lys water basin and pathway (source MNT : Bdti20 de l'IGN) ; B – Elevation of the Lys plain relative to a theoretical flooding plane: reference zero is arbitrarily taken along the major water bed; C et D – Transverse profiles with Quaternary deposits: 1, Ypresian clay; 2, Thanetian sand and clay; 3, undifferentiated sandy Pleistocene filling with predominant sand; 4a, fluvi-aeolian formation with predominant silt; 4b, slope loess deposit in a continuum with 4a; 5, attested Eemian peat (Erquinghem boring); 6, alluvial sandy deposits dated as end of Weichselian Pleniglacial (Erquinghem boring); 7, Holocene alluvium; E – Longitudinal profile of the major river bed and its progressive incise downstreamwards; cities close to the river are located with bracketted major bed width (km) and its approximate incise (m); in Deulémont and Werwicq the measured width goes beyond the *sensu stricto* river bed because it includes a likely deep terraces system relative to the plain; pebbled nappes position is only indicative.

à la cote +50 (environ) à l'Eemien puisque le niveau de la Manche venait de commencer à monter. Les paléo-vallées sont totalement déconnectées du réseau hydrographique de surface : la Lys actuelle coule en grande partie à l'aplomb du paléo-interfluve, qui ne porte qu'une très faible couverture récente au centre de la plaine. La base de la série quaternaire est modelée dans l'Argile des Flandres (Tableau 1), à l'exception des franges sud-ouest et le long des Weppes où elle repose sur la série landénienne, voire directement sur la craie. L'incision maximale est probablement acquise à la fin du Saalien (vers 150 000 ans, Pléistocène moyen) en conformité avec une dynamique fluviale et une morphogénèse de la Vallée Flamande, au nord de Gand (voir Heyse & Demoulin, 2018 pour une bibliographie plus complète). Sans que la part respective et le détail de chaque processus soient clairement établis, il est possible d'affirmer que l'existence et les caractéristiques de la plaine de la Lys résultent de la conjonction d'une tectonique subsidente, d'une forte incision acquise à la fin du Pléistocène moyen et d'un remblaiement

sédimentaire massif. Les recherches de matériaux pour la construction, notamment les briqueteries (Paepe 1964 ; Paepe et Vanhoorne 1967 ; Sommé 1977) et maintenant l'archéologie préventive apportent des observations sur les premiers mètres du comblement quaternaire de la plaine. Sur la rive gauche, en Belgique, les mêmes auteurs ont aussi étudié les coupes de Warneton. Dans toute la plaine, les premiers mètres sont constitués d'un limon loessique éolien affecté par des écoulements fluviaux en contexte de gel profond (Deschodt, 2014 ; Salvador *et al.*, 2005). Le remaniement sous forme litée des apports éoliens prouve sans ambiguïté l'existence d'un ruissellement diffus dans la plaine à la fin du Pléniglaciaire supérieur (entre environ 30 000 et 16 000 ans : Tableau 2). Il résulte probablement de la fonte d'une couverture neigeuse. Même diffus, un ruissellement exprimé sur environ 700 km² produit des écoulements importants. On peut alors imaginer un processus qui permette d'expliquer les observations lithologiques et morphologiques de la surface de la plaine révélée par les MNT (modèles numériques de terrain) détaillés

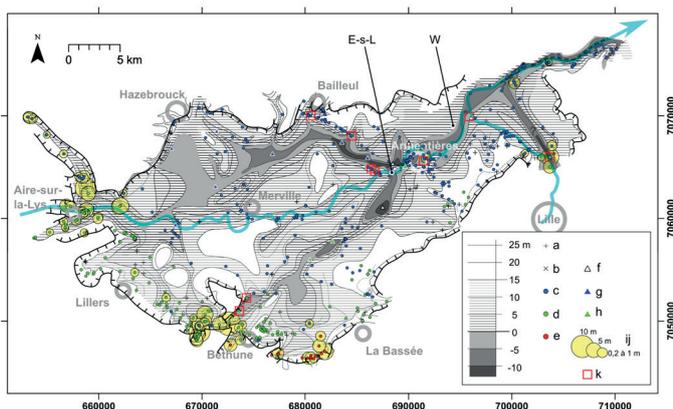


Fig. 11. – Topographie de la base du Quaternaire et âge de l'assise sous-jacente. Source : principalement consultation (janvier 1992) de 797 sondages de la BSS (BRGM) ; 75 sondages ont été ré-interprétés quant à la présence et profondeur des assises éocènes ; E-S-L : carottage d'Erquinghem-sur-la-Lys ; W : briqueterie de Warneton ; a : sondages écartés (71 sondages) ; b : sondage qui n'a pas atteint la base du Quaternaire ; c : argile yprésienne ; d : sable landénien ; e : craie mésozoïque ; f à ij : sondages de la campagne d'étalonnage (présents sur la carte géologique 1/50000 d'Hazebrouck mais absents de la BSS lors de notre consultation ; les descriptions ont été aimablement fournies par J. Sommé), avec f : sondage qui n'a pas atteint la base du Quaternaire ; g : argile yprésienne ; h : sable landénien ; ij : description d'une nappe graveleuse et épaisseur ; k : présence de débris végétaux ou de niveaux organiques attribuables au Pléistocène.

Fig. 11. – Topography of Quaternary deposits and age of their underlying strata; Source : checking of BSS database (January 1992): 797 boreholes, 75 of them have been re-interpreted concerning presence and depth of underlying Eocene strata: E-S-L = Erquinghem boring, W = Warneton brickyard, a = discarded boreholes, b = borehole which did not reach Quaternary bottom, c = Ypresian Clay, d = Landenian sands, e = Mesozoic chalk, f to ij = boreholes from calibration campaign present on the 1/50 000 Hazebrouck geological map, but absent of the BSS database when consulted; description had been kindly given by Jean Sommé) with: f = borehole that did not reach Quaternary bottom, g = Ypresian Clay, h = Landenian sands, ij = description of a pebbled nappe, k = presence of Pleistocene vegetal debris or organic deposits.

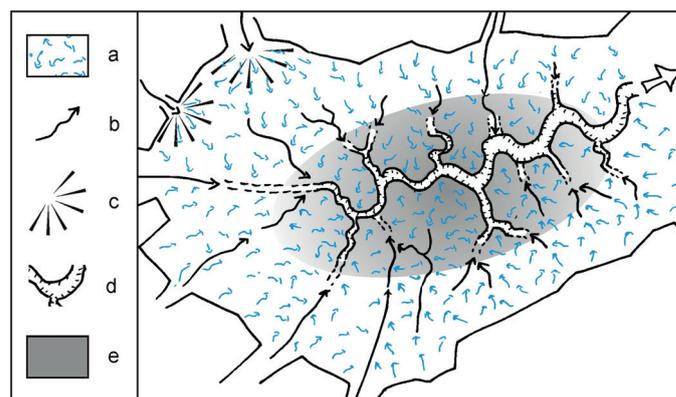


Fig. 12. – Hypothèse de la dynamique fluvio-éolienne et fluviale de la plaine de la Lys à la fin du Pléniglaciaire supérieur (environ 16 000 ans). a : ruissellement diffus ; b : concentration des écoulements ; c : cône de déjection ; d : encaissement du réseau fluvial ; e : zone centrale de la plaine, déprimée.

Fig. 12. – Fluvio-aeolian and fluvial hypothesis for Lys plain by the end of Late Pleniglacial (about 16 000 years). a: diffuse streaming; b: flood convergence; c: sedimentary cone; d: fluvial incising; e: depressed plain central zone.

(Deschodt, 2014). Le ruissellement est d'abord aréolaire et diffus. Ce ruissellement se concentre peu à peu en petits filets qui grossissent et deviennent de plus en plus érosifs aux dépens des sédiments granulaires (Fig. 12), ce qui rend compte de la morphologie en cuvette de la plaine, de l'encaissement marqué vers l'aval de l'actuel lit majeur de la Lys, et de l'existence de courtes sections affluentes qui prennent naissance dans le fond même de la plaine.

La plaine de la Lys peut être vue comme un enregistrement pléistocène exceptionnel, qui reste à valoriser.

À Vieux-Berquin, nous nous dirigeons à gauche vers Merville via Neuf-Berquin. Entre ces deux dernières localités observer, à gauche, la silhouette de l'usine Roquette,

à Lestrem. C'est en ces lieux que, venant de son Aveyron natal, le fondateur du groupe familial éponyme trouva les conditions favorables pour entreprendre une culture et son traitement industriel, destinés à produire de l'amidon et ses dérivés. Son groupe est aujourd'hui leader mondial de la production d'amidon. L'histoire raconte qu'au début du xx^e siècle, venant pour commercialiser des graines auprès des agriculteurs locaux, l'aïeul observa le développement industriel du textile dans les villes situées le long de la Lys, en aval d'un terrain par ailleurs propice à la culture de la pomme de terre (récit de Bruno Bonduelle lors de la visite organisée à l'occasion de l'Année Internationale de la Planète Terre, 2010). L'usine s'est adaptée au fil du temps, notamment en modifiant la matière première (maïs puis blé). Aujourd'hui le groupe développe aussi la transformation d'algues. La présence d'une telle industrie sur le territoire a deux conséquences. La première est inhérente au système de culture industrielle : les agriculteurs sont contractuels tant pour la qualité du *process* que pour les quantités. Quels en sont les effets pédogénétiques ? La seconde est que la gestion des flux (matières premières, productions) nécessiterait d'augmenter la capacité des voies de communication. La Lys est toujours au gabarit Freycinet alors que le canal à grand gabarit passe à quelques 5 km de là ; la route ne comporte qu'un réseau secondaire. Désenclaver l'usine est un enjeu de discussion pour l'aménagement du territoire.

À proximité de Lestrem, Merville est une localité installée sur le cours de la Lys, probablement sur un endroit où elle était historiquement franchissable à gué (Fig. 2). Quelle que soit la voie d'accès, on accède au cœur de ville par un pont. Quatre voies d'eau traversent la ville. Il faut donc croire que le niveau d'inondation depuis la fondation de la ville n'a jamais été durablement élevé. Sa situation en fait une rotule qui a pu être successivement un passage à gué à l'époque romaine, une frontière (au moins linguistique) à l'époque médiévale et une zone de convergence à l'éclosion de l'ère industrielle, où l'énergie rencontrait la métallurgie naissant le

long de la Lys. En effet, Merville n'est pas éloignée du bassin houiller. En application du plan Freycinet (loi du 17 juillet 1879), la Lys a été canalisée et mise à un gabarit autorisant l'accueil de péniches. Ce canal établissait un lien avec le port de Dunkerque, par où transitaient minerai et produits transformés. C'est là que se situe l'origine du Groupe Colas qui assemblait dans un bâtiment exceptionnel à ossature béton, malheureusement disparu, les tôles nécessaires à la construction des bateaux.

En continuant tout droit, nous arrivons devant l'aérodrome de Merville ; nous tournons à droite vers Calonne-sur-la-Lys. Au sud, l'horizon est barré par les collines d'Artois. La route longe la « vieille Lys » et suit les méandres d'un lit majeur beaucoup plus étroit (100 à 200 m) qu'en aval, à son franchissement par l'autoroute A25 (voir supra).

La Clarence (Fig. 13)

À Calonne, nous franchissons une première fois la Clarence, à une centaine de mètres de sa confluence avec la Lys. La Clarence est une rivière d'environ 30 km de long. Les 2,5 premiers kilomètres sont constitués de vallons secs qui descendent du plateau d'Artois (Valhuon, cote 160). Ils convergent sur Bours où se localise la première zone humide permanente qui alimente la Clarence. Dans son ensemble, le cours de la Clarence est à peu près rectiligne, conséquent par rapport à sa pente générale, elle-même cataclinale par rapport à la structure géologique. Sur une quinzaine de kilomètres, entre Bours et Chocques, la rivière coule sur les couches crayeuses selon un parcours qui traverse des failles (Arrêts 3 et 4). Elle entre dans la plaine de la Lys dès la sortie de Chocques, et son cours commence à divaguer naturellement au-delà de l'ancienne abbaye. La traversée du village de Gonnehem s'effectue entre des digues qui maintiennent son cours un peu moins de 2 m au-dessus du terrain naturel (cote 19) qu'elle retrouve en aval. Elle reçoit alors la Nave en rive gauche, tandis qu'un fossé artificiel, le Grand Nocq, la double en rive droite et l'accompagne dans ses divagations jusque l'entrée de Calonne-

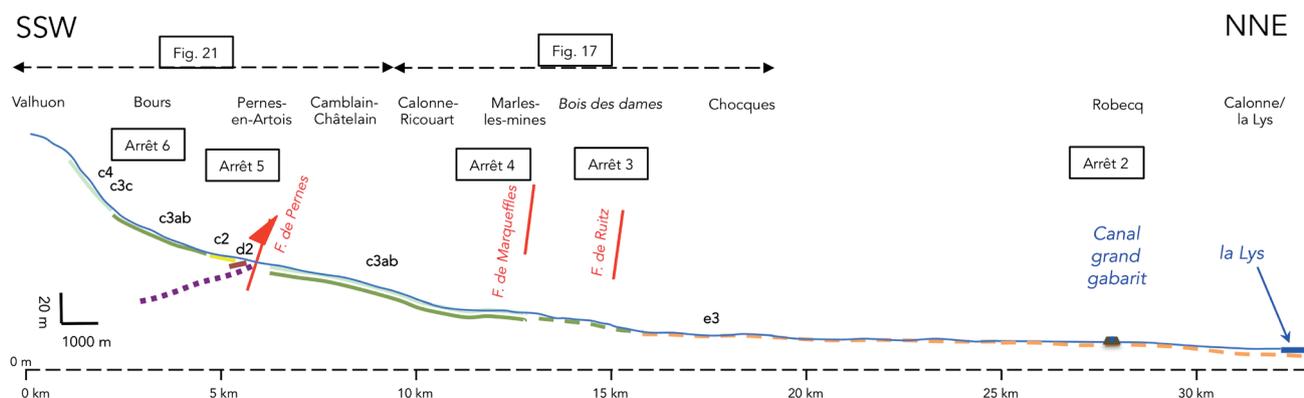


Fig. 13. – Profil longitudinal de la Clarence, construit d'après les données de Géoportail (Webographie). Très forte exagération verticale. Les terrains du lit alluvionnaire sont symbolisés par un trait en ignorant la couche des lœss et limons. Abréviations : voir Tableau 1.

Fig. 13. – The Clarence longitudinal profile, drawn from data Geoportail (see Webographie). Strong vertical enhancement. Alluvial deposits are figured as a single line; loess and silts deposits are ignored. Abbreviations: see Table 1.

sur-la-Lys. Les deux cours d'eau sont reliés par des drains dans lesquels les flux sont régulés par des vannes à guillotine. Un doublage latéral, d'origine anthropique, existe aussi de part et d'autre de la Scarpe (le Décours et la Traitoire) entre Douai et leur confluence avec l'Escaut.

Robecq et le canal à grand gabarit : Arrêt 2 (Fig. 1 et 14 à 16)

De Calonne-sur-la-Lys jusqu'à Robecq, la route serpente en rive gauche de la Clarence dont elle est distante de 10 à 100 m tout au plus selon les endroits. Par ailleurs, entre la route et la rivière les espaces libres se comblent de constructions neuves, surtout depuis le début des années 2000. La très forte inondation de la Clarence en janvier 2001 n'a découragé ni promoteurs, ni particuliers. Il faut dire que ce tronçon se trouve en aval de la digue que constitue le canal à grand gabarit, objet du prochain arrêt. En outre, de Calonne-s/Lys à Robecq, la Clarence coule dans son lit naturel, faiblement incisé sur la topographie. En revanche, de Robecq à Chocques, elle est endiguée pour protéger Gonnehem. La levée naturelle due aux dernières inondations libres a été renforcée de façon à contenir une montée des eaux intempestive. Ainsi, cette entrée sud dans la plaine de la Lys a perdu son rôle d'amortisseur de crue.

De fait, le canal dit « à grand gabarit » est un assemblage d'ouvrages dont le plus ancien a été conçu et entrepris par Vauban, qui en avait identifié l'intérêt stratégique pour passer les troupes d'est en ouest et réciproquement, c'est-à-dire d'un bassin versant à son voisin sans avoir à redescendre jusqu'à Gand où se situe la confluence avec l'Escaut (Gand était Terre d'Empire, aux Pays-Bas). Pour cela il s'est appuyé sur le tronçon le plus ancien, reliant les bassins versants de l'Aa et de la Lys, creusé par le comte de Flandre Bauduin V, en 1053, pour empêcher l'Empereur d'Allemagne d'envahir son territoire : c'est le tracé de l'actuel canal dit de Neufossé (voir Webographie : projet Babel/fluvial). Mis en service en tant que voie navigable en 1825, il est passé au gabarit Freycinet en 1880, puis au gabarit européen en 1965. L'arrêt 2 concerne le bief de 41 km compris entre Aire-sur-la-Lys (cote 18,90 m) et Bauvin (cote 20,90 m), desservant entre autres le port de Béthune. Il est donc partout nettement au-dessus du terrain naturel. De ce fait, la digue du canal constitue aujourd'hui un barrage qui a protégé Calonne-sur-la-Lys de l'inondation en janvier 2001 (voir ci-dessus), mais qui a maintenu plus longtemps que normal l'inondation en amont, jusque Chocques. Il n'empêche qu'au printemps 2002, deux maisons étaient en construction juste en amont de la digue, et en contrebas du Pont de l'Éclème (Fig. 14), au pied duquel se fait notre observation. La faute ne peut être mise sur le compte de l'ignorance ; est-elle technique ou administrative ?

Dans la perspective de l'évolution du transport fluvial, le gabarit des canaux n'est plus seulement limité par le tirant d'eau, mais aussi par le tirant d'air : les barges porte-contai-

ners transportent 1, 2 ou 3 lits de containers (le canal Albert entre Anvers et la Ruhr est à 3 lits). Pour la mise en service du canal Seine-Nord-Europe (CSNE), tous les ponts devront permettre le passage à 2 lits, au minimum. Ce qui entraîne de très importants travaux, notamment là où les rampes d'accès au pont sont situées en milieu urbain. C'est la condition pour que Dunkerque puisse être reliée au CSNE. La contrainte du tirant d'eau demeure car la cote du canal ne peut monter, et le fond est limité par le franchissement des cours d'eau naturels (la Clarence, la Lawe) et artificiels (le Grand Nocq) qui passent en siphon sous le canal (Fig. 15).

Entre le canal et Robecq une vaste pâture développée sur un sédiment argileux, montre un aménagement particulier dont les premiers exemples remontent au moins au XII^e siècle : il s'agit d'alternances, en lignes parallèles, de légères levées de terre et fossés de drainage évasés peu profonds. En cas de forte pluviosité les bêtes se réfugient sur les parties hautes et les drains conservent de quoi désalterer les bêtes en cas de sécheresse passagère (Fig. 16). Ce dispositif est également encore fonctionnel entre Somain (Fig. 1) et Marchiennes où se trouvait aussi une puissante abbaye en bordure de la Scarpe, dans un contexte similaire de zone humide.

En revenant sur Robecq la présence de petites chapelles avec des façades en craie, témoigne de sa présence en affleurement à proximité. En prenant la direction de Béthune, la sortie sud de la plaine de la Lys se fait à Mont Bernanchon, *via* un talus vigoureux constitué de l'Argile des Flandres, qui donne ici une terre très lourde à travailler, appelée les Pacaults (Gosselet, 1894, 1921). De là on peut voir, vers le sud et le sud-ouest, les frondaisons du Bois des Dames (Fig. 17). À hauteur du château d'eau de Hinges, nous descendons vers Gonnehem. En bas, au carrefour, un panneau indicateur signale un lieu-dit appelé *le Blanc Sabot*, ce qui exprime aussi la proximité de la craie en profondeur. Nous prenons à gauche vers Chocques. En approchant on constate que le terrain n'est plus plat mais forme un large dôme boisé, ceinturé d'un mur de clôture associant briques et blocs de craie. Cette légère éminence (environ 2 m au-dessus de la plaine) supporte l'ancienne Abbaye de Chocques (Fig. 18). Elle fut fondée au XII^e siècle pour des chanoines réguliers de l'Ordre de St Augustin (voir Webographie) qui ont contribué au défrichage du territoire. Situés en bordure des marais, ils ont ainsi participé à l'assèchement progressif du territoire. L'abbaye d'Anchin (près de Douai) et l'abbaye de Mt-St Martin (à la source de l'Escaut) en sont deux exemples identiques parmi de nombreux autres.

Le bassin houiller : Arrêts 3 et 4 (Fig. 1 et 17 à 20)

Dès l'entrée sur le territoire à l'aplomb du bassin houiller du Nord – Pas-de-Calais, le relief change : tout se passe comme si la surface du sol montait par paliers jusqu'à la crête des collines d'Artois (Fig. 2, 10A). Aussi, pour mieux observer et tenter de comprendre les relations entre géologie



Fig. 14. – Le canal à grand gabarit à Robecq : vers l'ouest, le pont de l'Éclème devra être relevé pour accepter des barges à 2 lits de containers. Photo © F. Meilliez.

Fig. 14. – The European canal in Robecq looking at westwards: the Eclème bridge must be lifted up to allow boats with 2 container beds. Photograph © F. Meilliez.



Fig. 15. – Panneau indiquant la présence d'un haut-fonds pour le passage du Grand Nocq en siphon sous le canal ; premier plan : déversement dans le canal d'un trop plein à hauteur du siphon de la Clarence à l'aide d'une vis d'Archimède. Photo © F. Meilliez.

Fig. 15. – Signpost announcing a bottom rise, due to the Grand Nocq siphon; in front plan: excess water coming from the river is lifted up to the canal through an Archimède screw. Photograph © F. Meilliez.

et orographie est proposée ici une carte géologique simplifiée (Fig. 17 et 21) et une coupe géologique (voir infra : § IV) construite à partir des sondages renseignés dans la Banque de Données du Sous-sol (Webographie : Infoterre).

Dès Chocques nous entrons dans le bassin houiller, entièrement souterrain (Meilliez, 2017). La terre fraîchement labourée est noircie. Face au cimetière de Chocques, la rive droite de la Clarence est longée d'un talus bordé de haies qui encadrent un chemin abandonné : c'est un ancien cavalier, c'est-à-dire un remblai sur lequel les exploitants de charbon avaient, dès le lendemain de la Grande Guerre, installé une voie ferrée pour desservir la fosse de Vendin-lès-Béthune (à moins de 2 km de là vers l'est). Conservé à Chocques (avec l'espoir d'une ré-utilisation touristique), il a déjà été supprimé à gauche de la route (vers Vendin), absorbé dans les labours d'une grande pièce cultivée.

Nous traversons Chocques en nous dirigeant vers Labeuvrière, mais nous tournons à gauche immédiatement après le passage à niveau pour quitter la vallée de la Clarence et passer dans celle de la Lawe. Ces deux rivières sont parallèles et ont des profils transversaux comparables, larges, à fond plat, encadrés par les épaulements d'un plateau laniéré, 15 à 20 m plus haut. Les dépôts alluviaux récents (Fz des cartes géologiques, non représentés ici) sont aujourd'hui cultivés.



Fig. 16. – Sur l'Argile de Louvil les pâtures sont humides ; un dispositif ingénieux et peu coûteux de drains et de levées a été mis en place depuis près de 1 000 ans pour le confort des bêtes. Photo © F. Meilliez.

Fig. 16. – Upon the Louvil Clay ly wetlands ; an old (origin about 1000 years ago) and clever landscaping had been made for cattle comfort. Photograph © F. Meilliez.

Depuis le milieu du XIX^e siècle, ils ont accueilli des sites industriels et évoluent maintenant vers des zones d'habitat et/ou d'activités diverses, principalement commerciales. Nous constatons que les plus vieilles fermes ne sont pas installées à côté de la rivière mais un peu plus haut sur les versants, comme l'était l'abbaye de Chocques. Historiquement, il devait donc y avoir quelques inondations intempestives. Franchir l'interfluve de la Clarence vers la Lawe donne l'impression de franchir un col entaillant la ligne de crête qui porte le Bois des Dames (Fig. 17). En fait, l'extrémité de ce bout de plateau est un terril (T28 = terril de la Cuisse maraude) qui a été requalifié par l'EPF (Établissement Public Foncier) et CdF (Charbonnages de France) dans le cadre des mesures compensatoires aux impacts miniers (Lemal & Meilliez, 2017). Ce chantier est une réussite paysagère.

Arrêt 3 (Fig. 1, 2 et 17)

De l'autre côté, le paysage de la vallée de la Lawe est en tous points comparable à celui de la vallée de la Clarence. Entre Chocques et Camblain-Châtelain, les rivières sont fortement incisées (une vingtaine de mètres) par rapport au plateau laniéré (Pinchemel, 1954 ; Sommé, 1977). La vigueur des pentes des versants peut résulter de deux processus susceptibles de s'être combinés : un matériau facile à éroder et une déformation récente dont l'érosion n'aurait pas encore eu le temps d'effacer tous les effets. Les rivières (Lawe et Clarence) coulent sur des alluvions récentes, peu épaisses, déposées directement sur la craie du Turonien moyen.

À l'entrée de Fouquereuil nous partons de suite à droite vers Gosnay. Après avoir longé un long coron, nous tournons à la première à droite sur une petite route qui passe

sous un cavalier. Nous suivons cette route en mauvais état jusqu'à l'arrêt 3, avec, à droite, l'entrée d'une carrière interdite d'accès (Fig. 19), et à gauche l'ancienne Abbaye aux Dames. En mai 2000, la carrière était en cours de reconversion en centre technique d'enfouissement ; seule sa tranchée d'accès était observable. Elle montrait, sur une hauteur de 4 à 5 m, un ensemble de lentilles sableuses empilées, contenant des lentilles argileuses, récessives. Ce dépôt devait soit

appartenir à un glacis orienté vers le nord, soit constituer un cône alluvial, sur lequel une chenalisation très mobile devait évoluer latéralement lors d'arrivées d'eaux chargées et intermittentes. Cet ensemble a été assimilé par le cartographe aux Sables d'Ostricourt (Thanétien) reconnus en sondages plus au nord. Il s'agirait sans doute d'un faciès de bordure puisqu'un peu plus loin vers le centre du bassin, dans la région éponyme, les Sables d'Ostricourt sont réputés marins

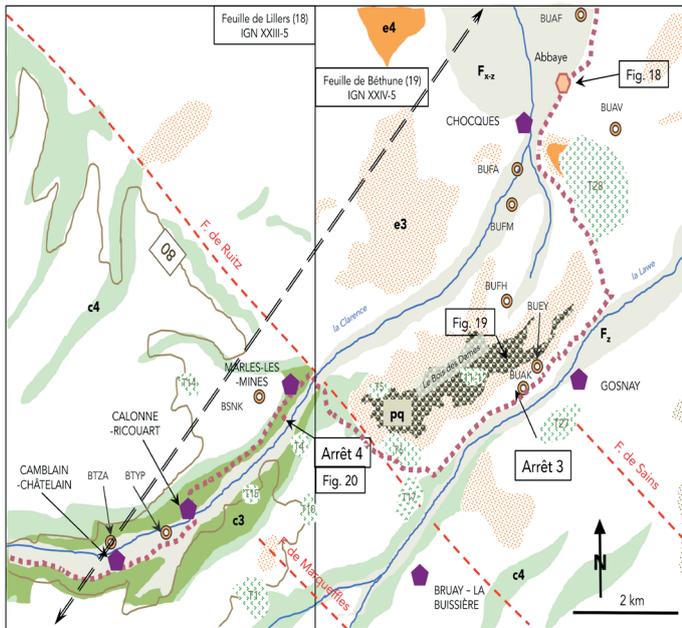


Fig. 17. – Transect du bassin houiller : - carte géologique simplifiée pour les arrêts 3 et 4. Les noms codés des sondages sont ceux de la Base de Données du Sous-sol (BSS/Infoterre). Trace de la coupe indiquée en Fig. 2. Les codes stratigraphiques de représentation renvoient au Tableau 1. Quelques terrils avec leur numéro officiel (T).

Fig. 17. – Across the coal basin: simplified geological map with stops 3 and 4. Borehole names are those from BSS database (website Infoterre). Trace of cross-section (see Fig. 2). Stratigraphical nomenclature refer to Table 1. A few coal heaps are located with their designation (T).



Fig. 19. – Carrière de sables transformée en centre technique d'enfouissement ; les Sables d'Ostricourt (e3) sont ravinés par un complexe deltaïque à conglomérats très riches en silex noirs. Photo © F. Meilliez, mai 2000.
Fig. 19. – Technical garbage transformed from an ancient sand quarry: Thanetian sands (e3) are gullied by an upper deltaic complex with conglomerates carrying black flints. Photograph © F. Meilliez, May 2000.



Fig. 18. – Portail d'entrée de l'ancienne abbaye de Chocques (localisée sur Fig. 17). Photo © F. Meilliez.

Fig. 18. – Entrance of the ancient Chocques Abbey (located on Fig. 17). Photograph © F. Meilliez.



Fig. 20. – Le cours rehaussé de la Clarence à Marles-les-mines, avec la pompe de refoulement dépendant de la station de relevage des eaux située en rive droite (période pluvieuse d'octobre 2013). Photo © F. Meilliez, octobre 2013.

Fig. 20. – The artificially uplifted Clarence river flow (for compensating progressive mining collapse during coal extraction); a pump makes excess water coming from outside right dyke to be poured within the river. Pictured during a rainy period (October 2013)

et organisés en couches régulières. Ce dépôt est lui-même recouvert et raviné par un cailloutis grossier, largement dominé par des silex arrondis, emballés dans une matrice peu abondante sablo-graveleuse. Là aussi le dépôt est celui d'un système chenalisé érosif sur un glacis ou un cône alluvial. Il est épandu sur une large part du Bois des Dames (Fig. 17), et est cartographié comme cailloutis plio-quadernaire. Mais cette attribution demeure incertaine. Il pourrait aussi s'agir d'un dépôt amont, très grossier, de la Formation des Monts de Flandres (voir § II-1 et Fig. 5).

Entre Gosnay et Bruay - La Buisnière, le fond de vallée a été une zone très industrielle, de production charbonnière et industries de transformation : une cokerie, un lavoir et un atelier, encadrés de plusieurs terrils (T11, T12 sur le Bois des Dames ; T27 et T259 en rive droite de la Lawe). La production charbonnière (5 fosses pour 12 puits) était concentrée à l'amont de l'Arrêt 3, sur le territoire qu'occupe aujourd'hui l'agglomération urbaine. Sur la concession de Bruay, la période de production a couru des années 1850 à 1970. La renonciation à concession de Bruay a fait l'objet d'un arrêté le 22 octobre 2007. Toute information peut être consultée auprès de UTAM-Nord (voir Webographie) (Lemal & Meilliez, 2017). Après arasement des installations de surface, la friche a été vendue pour le franc symbolique à l'association Emmaüs. Après avoir fait établir le dossier de déclaration ICPE (installation classée pour l'environnement), celle-ci a pu y créer et développer plusieurs entreprises, dont le recyclage de vêtements avec Le Relais.

Nous continuons vers Bruay sur la même petite route. Elle passe près de quelques anciennes maisons de cadres de la Compagnie des Mines de Bruay. À l'entrée de Bruay, nous tournons à droite pour retourner dans la vallée de la Clarence. La route est faiblement oblique sur le tracé cartographique de la Faille de Ruitz, laquelle semble surtout déterminer la position de l'isohypse 80 (Fig. 17). L'expression des failles dans la topographie sera discutée plus loin. Là encore les terrils T16 et T17 ont été refaçonnés pour se confondre dans le paysage. À mi-côte, au sud de la route se trouve un très important lycée technique spécialisé dans les travaux publics qui dispose d'espaces et de matériaux à travailler.

Arrêt 4 (Fig. 1, 2, 17 et 20) :

Nous quittons la concession de Bruay pour passer dans celle de Marles. La renonciation à concession a fait l'objet d'un arrêté pris le 25 septembre 2007. Elle aura été une concession très productive entre 1858 et 1974, notamment en 1916 et 1917 (Meilliez & Dumont, 2019). Pourtant cela avait mal commencé : avant d'obtenir la concession (29/12/1855), l'exploitant avait commencé un premier puits qui a rencontré des sables bouillants vers 56 m de profondeur, s'est ennoyé puis a été abandonné. Le puits n° 2, entrepris un peu plus loin en 1854, est entré en production en 1858 de si bonne façon qu'un chemin de fer a été construit en 1860 pour le desservir, ce qui était encore rare à l'époque. Mais le 28 avril 1866 une importante venue d'eau dans le cuvelage a conduit aussi à sa ruine. Cette venue d'eau était au même niveau que la précédente dans le puits 1. On sait aujourd'hui qu'elle est localisée sous la couche imperméable du Turonien inférieur et moyen (Dièves), mais au-dessus du Houiller (sondage BSNK, Fig. 17). Dans les descriptions de sondages de la Banque de Données du Sous-sol, elle est désignée « Cénomaniens ». Mais plutôt que la craie cénomaniens qui affleure au pied de la falaise du Blanc-Nez, il s'agit ici d'un faciès sableux, peut-être confondu

avec le faciès continental qualifié de wealdien, partout riche en eau sous pression, ayant aussi comblé des poches de dissolution sur la surface d'érosion post-paléozoïque. Dans la région de Valenciennes, c'est une poche pareillement située qui, en crevant et inondant la mine, a inspiré Zola pour *Germinale*.

Le site de Marles-les-Mines, dans sa partie basse, constitue l'arrêt 4. Nous descendons la route de Bruay, franchissons la voie ferrée, la Clarence, puis tournons à gauche sur la route principale de Marles. Une centaine de mètres plus loin, une surface commerciale d'un grand magasin de bricolage donne l'opportunité de s'approcher, au bout du parking, de la Clarence. En fait le cours d'eau maigrichon qui coule dans la dépression linéaire n'est pas la rivière, mais son fossé collecteur de ruissellements en rive gauche. La rivière se trouve 6 m au-dessus, sur un remblai. Le fossé de décharge aboutit à une construction qui abrite une station de relevage des eaux (SRE). Lorsque les eaux de ruissellement accumulées dans ce fossé sont suffisamment hautes, un contacteur électrique commande la pompe de la SRE qui remet le trop-plein dans le cours de la Clarence, de façon à restituer l'écoulement normal (Fig. 20). Cette observation et ce dispositif permettent d'apprécier ce qu'on appelle un affaissement minier (Lemal & Meilliez, 2017). Nous rejoignons l'église de Marles, située près du cours naturel de la Clarence, mais aujourd'hui en contrebas. De là, nous montons sur le pont qui franchit la Clarence pour voir le cours d'eau à son niveau normal d'écoulement, grâce à une digue érigée par les compagnies minières au fil de l'évolution de l'affaissement. Juste en amont du pont émerge un tuyau par lequel sort, en tant que de besoin, le surplus d'eau relevé par une autre SRE située en rive droite (Fig. 17). Un affaissement minier n'est pas une déformation brusque dès lors que l'exploitation est suffisamment profonde (environ une centaine de mètres ici). Comme par ailleurs, les veines exploitées sont proches de l'horizontale sur une grande étendue, il n'y a pas de déplacement différentiel important et la surface du sol est descendue lentement, par simple translation verticale. En examinant bien l'église on peut constater qu'elle est quand même légèrement inclinée longitudinalement vers l'amont de la vallée. Le dossier de sortie de concession fait état d'un affaissement compris entre 20 et 25 m. Ce serait le lieu d'affaissement maximal sur l'ensemble du bassin minier. Une publication de l'an dernier (Budzik *et al.*, 2019 : fig. 1) montre une belle vue aérienne de la commune de Marles-les-Mines, de la cité minière située sur le plateau entre Marles et Auchel, et du terril T15 sur le territoire de Calonne-Ricouart. Vu d'avion, rien ne marque la zone d'influence d'un affaissement minier. Ce point d'arrêt 4 permet aussi d'apprécier le fait que, en l'absence d'endiguement de la Clarence, la vallée eût été occupée par un lac longiligne entre Camblain-Châtelain et Labeuvrière dont la profondeur maximale aurait été localisée à Marles-les-Mines.

Nous reprenons la route vers Calonne-Ricouart, et traversons la Clarence avant d'entrer dans la partie ancienne du

village. Nous continuons en direction de Pernes-en-Artois, en franchissant la « Chaussée Brunehaut » qui relie Arras à Théroüanne et traverse Camblain-Châtelain.

Les collines d'Artois : Arrêts 5 et 6 (Fig. 1, 2 et 21 à 23)

Pour qui découvre la région en passant sur cette ancienne voie romaine (et sans doute plus ancienne : Leman, 2010) pour aller d'Arras à Théroüanne, la route fait l'effet d'une frontière paysagère : à droite, vers le nord-est, le paysage bas des Flandres au loin et la bande intermédiaire du bassin minier, industrielle et peuplée ; à gauche, vers le sud-ouest, un paysage agricole, vallonné, avec des villages groupés auprès de cours d'eau. Ce sont les collines d'Artois, lesquelles constituent la bordure septentrionale du grand plateau picard qui s'étend jusqu'à la Normandie (Pays de Bray) et l'Île-de-France. Une frange étroite, d'altitude intermédiaire (entre 80 et 100 m) crayeuse, précède l'étroit plateau d'Artois. Cette bande s'élargit vers le sud-est, où elle porte le nom de Gohelle.

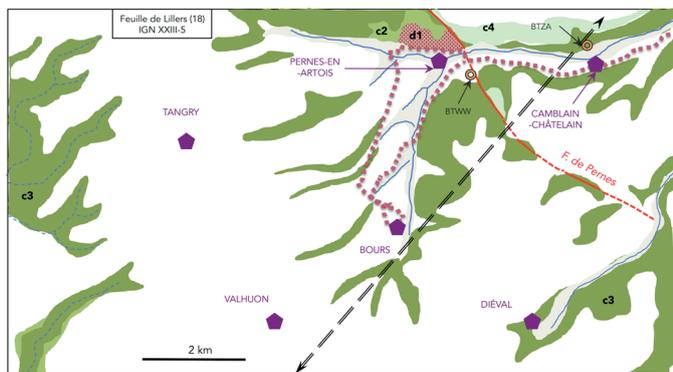


Fig. 21. – Les collines d'Artois : carte géologique simplifiée pour les arrêts 5 et 6. Les noms codés des sondages sont ceux de la Base de Données du Sous-sol (BSS), consultable sur le site Infoterre. Le double trait en tireté est la trace de la coupe indiquée en Fig. 2. Les codes stratigraphiques de représentation renvoient au Tableau 1.

Fig. 21. – *Through Artois Hills: simplified geological map for stops 5 and 6. Borehole names are those from BSS database (website Infoterre). Trace of cross-section (see Fig. 2). Stratigraphical nomenclature refers to Table 1.*



Fig. 22. – Carrière de Pernes-en-Artois : vue d'un front de taille en exploitation Photo © F. Meilliez.

Fig. 22. – *Pernes-en-Artois quarry at work; rocks are crumbly. Photograph © F. Meilliez.*



Fig. 23. – Entrée de la carrière de Pernes-en-Artois : détail du faciès d'un gros bloc de grès bigarré, à dominante rouge violacé. Vieux Grès Rouges du Dévonien inférieur. Photo © B Poncelet.

Fig. 23. – *Entrance of Pernes-en-Artois quarry: detailed picture of a block of Early Devonian, Old Red Sandstones. Photograph © B Poncelet.*



Fig. 24. – Donjon de Bours, construit en grès du Dévonien inférieur ; il est implanté sur la zone de ruissellement de la principale zone humide d'où est issue la Clarence. Photo © F. Meilliez.

Fig. 24. – *Bours donjon: it has been built with Lower Devonian sandstones ; it is situated just under the highest wetland from which the Clarence river goes out. Photograph © F. Meilliez.*

Arrêt 5 (Fig. 1 à 3 et 21 et 22) : la carrière de Pernes-en-Artois

Une fois cette route ancienne franchie, le paysage change radicalement. La Clarence coule au fond d'une vallée linéaire et dissymétrique. Son versant de rive gauche, raide, laisse voir la craie du Turonien inférieur, marneuse, surmontée d'un niveau peu épais (10 à 20 m) de Turonien moyen, plus crayeux et redressant le profil du versant. Au-dessus la pente diminue nettement, ce qui marque le passage à la craie plus friable du Turonien supérieur passant au Coniacien (Tableau 1). En rive droite le profil est nettement moins pentu, permettant la mise en culture ; il est recouvert de loess et de colluvions qui couvrent le plateau.

Après avoir franchi la Clarence à l'entrée de Pernes-en-Artois, la route passe devant l'entrée d'une carrière en activité dans laquelle il n'est pas recommandé d'entrer car le matériau est très friable et les fronts de taille peu sûrs (Fig. 22). Cependant de gros blocs déposés par l'exploitant à l'entrée suffisent

à montrer le faciès de grès à grains très fin, bigarré (Fig. 23) comme il s'en dépose dans le fond de golfes que prolonge une large plaine alluviale, sous climat tropical. Aujourd'hui, le fond du Golfe Persique en est un bon exemple. Ici, Goujet & Blicq (1979) ont identifié quelques fines couches marines grâce à leur contenu faunistique. L'une d'elles a livré des hétérostracés ("Agnathes"), poissons primitifs, cuirassés. Par comparaison avec d'autres affleurements connus en Europe, ces couches sont attribuables au Lochkovien (Dévonien inférieur : Tableau 1). Ce type de faciès, dans les Îles Britanniques, caractérise le *Continent des Vieux Grès Rouges*. Le matériau est utilisé sous son faciès fin en ornementation paysagère (allées, ...), tandis que les gros blocs sont utilisés à bloquer le passage de véhicules non autorisés sur des voies de circulation douce ou autour de chantiers publics, comme c'est le cas en divers lieux de la métropole lilloise.

La présence de ce pointement de terrains très anciens au travers de la couverture de craie implique de fortes déformations géologiques anciennes auxquelles participe la Faille de Pernes (Fig. 21). L'interprétation de l'ensemble sera discutée plus loin, mais on peut déjà noter que la Faille de Pernes semble n'avoir aucun effet sur le profil de la Clarence (Fig. 13).

Nous traversons le village et prenons la route en direction de St-Pol-s/Ternoise. La route monte vers le plateau qui sert de crête aux collines d'Artois. Environ 2 km après avoir quitté Pernes, nous nous engageons à gauche dans une petite route qui mène à Bours.

Arrêt 6 (Fig. 1 à 3, 21 et 24) : le site de Bours, zone humide qui alimente la Clarence

Le petit village de Bours, aujourd'hui à l'écart et en contrebas de la route principale, a conservé un plan quasi médiéval avec un espace central occupé par un donjon du XII-XIV^e siècle (Seydoux, 1976), autour duquel sont disposées des maisons basses, typiques du Ternois. Des fouilles archéologiques récentes (2019) montrent que ce « donjon » est une tour d'angle d'une « maison forte », carrée (voir Webographie). La carte géologique indique, au pied du versant de rive droite, une ancienne carrière qui exploitait la craie marneuse du Turonien inférieur. La pente naturelle se redresse ensuite et vient fermer une sorte de cirque sur les bords duquel les maisons se sont échelonnées. L'espace central est une zone humide qui se nourrit de nombreux ruissellements sur les marnes du Turonien moyen (Dièves), que le château, au centre, drainait dans son fossé circulaire. À l'aval le cours d'eau qui se forme est le principal contributeur du cours de la Clarence qui ne s'individualise réellement qu'entre Bours et Pernes. Le château est construit en grès du Dévonien inférieur, extraits des carrières proches : Pernes pour quelques bancs gréseux très résistants et surtout La Comté-Beugin, au même niveau, mais dans la vallée de la Lawe. En amont de Bours, le rebord de plateau est entaillé par deux vallons secs convergeant vers le village.

Que peut bien raconter ce donjon à côté et en contrebas de la route... aujourd'hui ? Si l'on se replace 800 ans en arrière, les moyens de communication étaient très dépendants du climat et de la nature des terrains sur lesquels les déplacements s'effectuaient. Les sables et argiles de Flandres en général, et ceux de la plaine de la Lys en particulier, n'étaient pas propices aux charrois de marchandises, sauf par voie d'eau. La Lys est en lien avec la mer, et la Clarence la relie aux collines d'Artois. Au-dessus de Bours commence le plateau picard qui permet, sur un support crayeux, résistant et perméable, de se déplacer par voie terrestre. Il est donc tentant d'émettre l'hypothèse que la localisation de Bours est déterminée par la rupture de charge nécessaire entre un transport à terre et un transport par barque. On objectera que les dimensions de l'actuelle Clarence ne se prêtent pas à un tel transport par voie d'eau. C'est oublier que les barques étroites à fond plat sont utilisées même sur de petits rus dans tous les pays et à toutes les époques qui l'ont nécessité. En outre il faut préciser que la consommation d'eau par nos sociétés, s'est accrue depuis le milieu du XX^e siècle et a fait sensiblement baisser le niveau des aquifères que drainent les cours d'eau.

Le plateau, sur cette traverse, culmine à 167 m (Fig. 2). Plus haut que le Mont Noir, il rend crédible le dispositif d'alimentation gravitaire de l'aquifère sous Bailleul tel qu'il est présenté ici (Fig. 5). Le plateau porte plusieurs éoliennes car il domine tout le pays picard qui s'étend vers le sud. Il est revêtu d'un manteau de loess dont l'épaisseur est très variable. Certains bosquets occupent des placages résiduels de sables thanétiens. De larges étendues sont en pâtures. Quelques champs labourent une terre lourde, chargée de silex arrondis, le plus souvent cassés à bords francs. Ces silex diffèrent de ceux qui forment les cailloutis pris dans les grès et conglomérats du Bois des Dames et des Monts de Flandres. Il s'agirait plutôt d'argiles à silex et de dépôts accumulés dans des dolines.

La traverse est terminée. Le retour se fait en revenant sur Camblain-Châtelain par la même route, puis en prenant à droite pour revenir par Divion, Houdain puis la A21 et la A1. On peut ainsi voir les paysages traversés mais davantage vers l'est, et *via* une voie totalement artificialisée pour les besoins du transport routier. Que retenir de ce parcours ? Quelles questions demeurent sans réponse satisfaisante ?

INFORMATIONS RETENUES ET QUESTIONS EN SUSPENS

Cette visite avait pour objectif d'observer des marqueurs paysagers, témoignages que l'Homme a laissés sur un territoire qu'il a fortement impacté depuis quelques millénaires (surtout le dernier). Ces marqueurs racontent les diverses formes d'adaptation qu'il a développées pour vivre de, et sur ce territoire. Il l'a fait en fonction des besoins qu'il éprouvait, en apprenant à vivre avec ce qu'il découvrait : un territoire qui

vit, selon une dynamique propre et naturelle, caractérisée par un pas de temps sans commune mesure avec la durée de la vie humaine. L'Homme a dû la prendre en compte par nécessité, consciemment ou non, tantôt en en tirant profit (ressources minérales, alimentaires, utilisation des espaces), tantôt à ses dépens (inondations surtout, et conséquences sur la mobilité, entre autres). Aujourd'hui, l'Homme a démultiplié sa capacité d'intervention sur le milieu en le taillant, le perforant (travaux publics, extraction matériaux), en modifiant très fortement l'écosystème dans sa géobiodiversité (hydraulique, agriculture, pollution). Cependant la réponse naturelle du milieu est lente et les effets en retour n'affectent que rarement les générations qui en sont les causes. Et sur ce territoire au relief peu contrasté, les manifestations de déséquilibre, comme les processus naturels de correction, s'effectuent surtout par l'action de l'eau. Or la pression humaine est de plus en plus prégnante, tant par raison quantitative que par l'absence de conscience des risques spécifiques à ce territoire, très dépendant de l'eau. La faiblesse du relief et la certitude que tout problème trouvera une solution technique rendent l'Homme contemporain trop sûr de lui. Quelles informations cette traverse des monts de Flandres aux collines d'Artois nous apporte-t-elle par rapport à cet enjeu ? Comment aborder les questions en suspens pour progresser dans leur compréhension ?

La méthode proposée ici consiste à passer d'une échelle à l'autre entre la vision d'ensemble et la situation locale. Cette méthode a l'inconvénient d'une complexité relative, mais l'avantage de mettre en évidence l'aspect systémique du fonctionnement. Évidemment, si l'on considère un territoire plus vaste comme le nord-ouest européen, seront considérées comme variables internes des paramètres qui, ici, sont pris comme conditions aux limites. Libre au lecteur de réfléchir selon la même méthode en variant le niveau de territoire sur lequel il s'interroge.

Le système visité ici est représenté par une coupe géologique (Fig. 25) construite selon le même tracé que la précédente (Fig. 5), mais plus précise car construite en projetant orthogonalement les sondages les plus proches, renseignés dans la BSS (Webographie : Infoterre). Le plus éloigné est à moins de 2 km du trait de coupe. L'échelle des hauteurs est exagérée 10 fois de façon à rendre visibles les écarts possibles, enjeux de la discussion. La précédente (Fig. 5) était un schéma (exagération verticale : 50) pour faire comprendre la boucle naturelle de l'eau. Cette fois (Fig. 25) l'intérêt est d'examiner les rapports entre les variations topographiques et la structure géologique. Dans les terrains crétacés (Tableau 1) le niveau repère est le Turonien inférieur à moyen, peu perméable, qui se comporte comme le plancher de l'aquifère régional le plus important. Et l'Argile de Louvil, marqueur basal de la série paléocène-éocène, est à la fois le toit du précédent et le plancher d'un autre aquifère régional de faible productivité (Crampon *et al.*, 2003) et dont l'état de pollution actuel

interdit l'utilisation en tant qu'eau potable. La structure interne du substratum paléozoïque ne sera pas discutée ici.

Le circuit de l'eau

Le schéma d'ensemble (Fig. 5) n'est pas mis en défaut mais l'examen détaillé révèle nombre de failles qui sont autant de points singuliers dans la transmission de l'eau, discontinuités à certains endroits, communication en d'autres. Ces failles relèvent de plusieurs événements au cours des 300 derniers millions d'années, et le décryptage de leurs effets est d'autant moins simple que certaines ont joué à plusieurs reprises. À quoi il faut ajouter que le déplacement sur une zone faillée ne se limite que très rarement à une composante verticale ; il y a presque toujours une composante coulissante, transversale au trait de coupe, souvent dominante dans cette région. Ces failles sont constituées de plusieurs surfaces de rupture dont les aspérités peuvent être arrachées et fragmentées par friction. Il s'ensuit que, dans la craie, les couloirs faillés sont souvent à forte porosité, accueillant de l'eau qui contribue à dissoudre les blocs de craie et à faciliter le glissement relatif. Mais si un tel glissement est intervenu après que des sédiments (sables et argiles) thanétiens se sont déposés au-dessus, il est fréquent que lors du déplacement relatif, ces sédiments détritiques soient entraînés vers le bas par l'eau et bouchent la porosité de sorte que si certaines failles favorisent le transfert de l'eau, d'autres l'obèrent. C'est l'une des raisons pour lesquelles le temps de transit souterrain entre les collines d'Artois et le site de Bailleul est aussi approximatif (cf. § II-2).

L'ensemble des collines d'Artois (plateau intermédiaire entre les failles de Pernes et de Sains inclus) est bien le lieu d'infiltration maximale. Sur la coupe (Fig. 25), le report du profil longitudinal de la Clarence permet de comprendre pourquoi elle coule de Bours au Bois des Dames sur le Turonien inférieur à moyen, sur un tapis d'alluvions récentes (Fz des cartes géologiques éditées). Outre les petits affluents reçus sur ce tronçon, son alimentation vient du plateau de Valhuon, qui contribue aussi à la Ternoise vers le sud. Sous le plateau de Valhuon, la discordance alpine (Tableau 1) est coupée par quelques failles, mais différemment des couches d'âge turonien, ce qui trahit une pluralité de mouvements à des moments différents. On peut notamment observer qu'entre les sondages BTVF et BTWA, une connexion hydraulique est possible entre l'aquifère de la craie au-dessus avec les sables et carbonates attribués au Cénomaniens dans les sondages. C'est un exemple des aléas de transfert en hydraulique souterraine. À partir de la Faille de Ruitz et du Bois des Dames, la nappe de la craie est captive sous l'Argile de Louvil.

La topographie et la tectonique

Depuis que Gosselet (1908) en a démontré l'existence, les failles de l'Artois ont stimulé les observateurs, et notamment les exploitants du gisement houiller (Bouroz, 1956). Certaines ne décalent que les terrains crétacés (suivre ici le Turonien

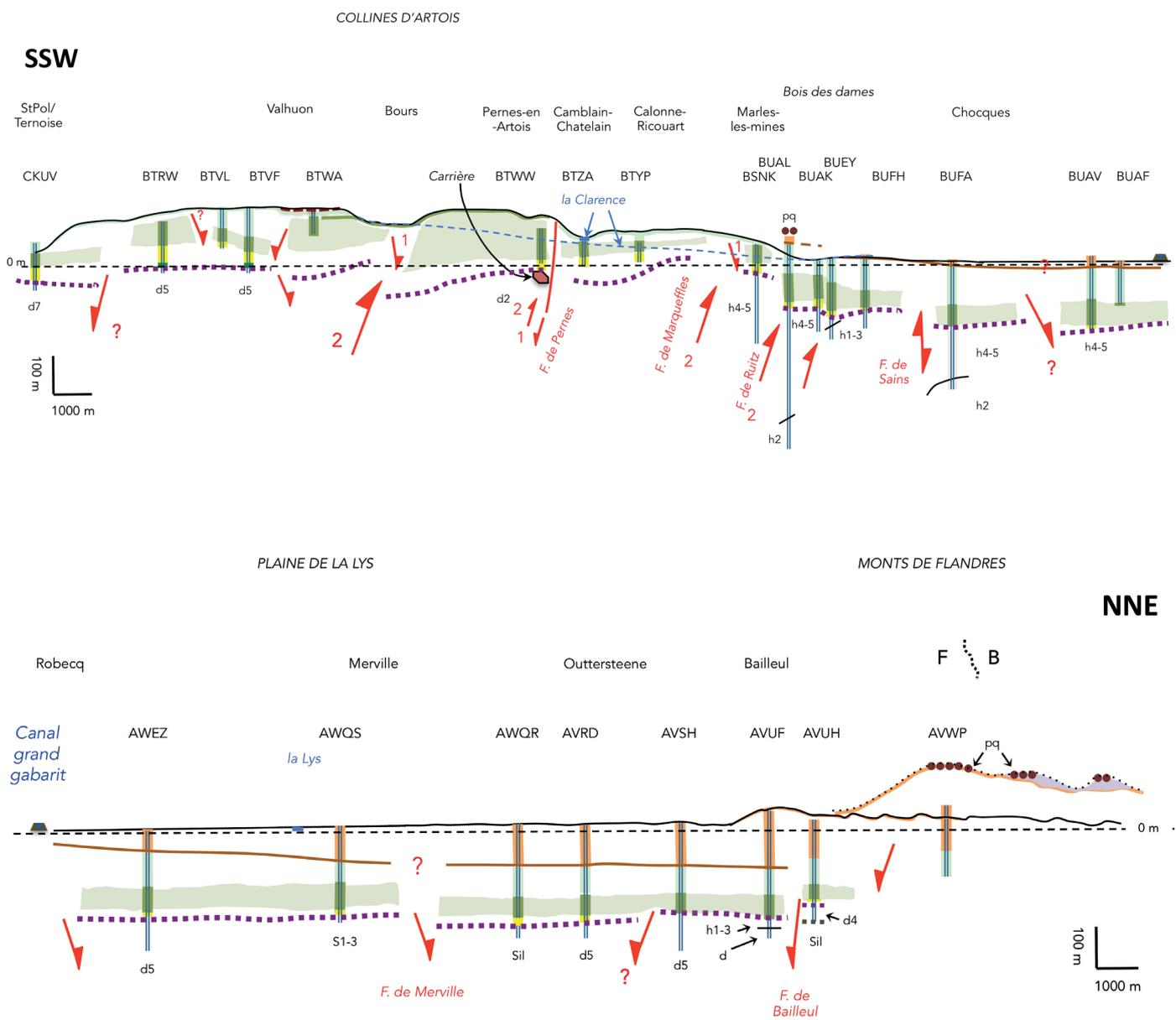


Fig. 25. – Coupe géologique partiellement interprétée, calée sur les sondages de la BSS. [Les 2 moitiés se raccordent au niveau du canal à grand gabarit]. Le trait de coupe est situé sur les Fig. 2, 3, 17, 21. Les symboles et codes de couleur sont ceux du Tableau 1. L'exagération verticale est moins forte qu'en Fig. 5. Les failles sont positionnées, mais sans connaître précisément ni leur pendage, ni la complexité de leurs déplacements. Les chiffres 1 et 2 suggèrent seulement l'âge relatif des sens de déplacement caractérisés. Un travail interprétatif détaillé est en cours.

Fig. 25. – Partially interpreted geological cross-section, marked along boreholes described within the BSS database (May 2020). Vertical enhancement is lower than on Fig. 5. The cross-section is located on Fig. 2, 3, 17, 21. Faults are located, however their dip, sense of dip and real displacement are estimated. Numbers 1 and 2 solely suggest a characterized relative sense of displacement. A more precise analyse is under progress.

inférieur et moyen) ; d'autres ne décalent que la discordance alpine ; d'autres enfin décalent les deux, mais pas nécessairement dans le même sens. D'où une représentation suggestive (indices 1, 2 sur les demi-flèches de la Fig. 25) pour évoquer l'ordre relatif de sens de mouvement sur quelques-unes de ces failles. La clarification des événements en jeu ne peut être analysée avec cette seule coupe et ne sera donc pas discutée ici. En revanche peuvent être cernés quelques-uns des événements tectoniques qui ont contribué à façonner ce territoire.

✧ La discordance alpine est la surface sculptée par l'érosion depuis la fin de la déformation varisque (environ 300 millions d'années) jusqu'à ce que les conditions nécessaires à une nouvelle transgression marine suffisamment longue pour laisser un dépôt sédimentaire significatif soient remplies (Amédéo & Robaszynski, 2014). Cette transgression a opéré dans un contexte distensif avec des failles synsédimentaires (Meilliez, 2016, 2018), dont l'un des effets est la différence de puissance, voire de faciès de part et d'autre d'une même faille (Fig. 25 : entre sondages CKUV et BTRW, entre BTVF et BTWA, entre BUFA et BUAV, entre AVUF et AVUH, ...). Ces failles ont cessé de fonctionner avant la fin du Crétacé et ne sont donc pas toutes visibles en surface.

✧ Sous la plaine de la Lys, si l'on remet à l'horizontale l'Argile de Louvil, c'est-à-dire dans l'attitude qu'elle devait avoir lors de sa sédimentation, les terrains crétacés apparaissent découpés en panneaux par quelques failles (Bailleul, Merville, Robecq, Chocques), ce qui va dans le sens de la remarque précédente.

✧ Puis, durant l'Eocène supérieur l'anticlinal de l'Artois, et celui du Pays de Bray ont commencé à émerger (cf. § III-1). Sur la Fig. 25, le Turonien inférieur et moyen au cœur des collines d'Artois forme une convexité ample qui marque la forme anticlinale. On peut aussi observer au-dessus de la faille de Marqueffles que le Turonien inférieur et moyen est relativement mince. La craie est une roche très fragile au sens rhéologique du terme, ce qui en a fait un site de fracture facile. À l'aplomb des failles de Sains, Ruitz, Marqueffles et Bours, la discordance alpine et le Turonien inférieur et moyen ont été déplacés (composante inverse) dans le même sens et d'une intensité égale pour chacun des niveaux repères sur une faille donnée. Il est donc probable que tous ces déplacements soient homogènes et synchrones (vus d'aujourd'hui). La faille de Pernes ne semble pas avoir suivi le mouvement, ou très modestement.

✧ Après (ou pendant) son dépôt, la série paléocène-éocène a lentement et faiblement basculé vers le nord. Mais une faille, encadrée par les sondages AVUF et AVUH (Fig. 25) semble avoir désolidarisé la plaine de la Lys des

monts de Flandres. Rien ici ne permet d'encadrer la datation de ce déplacement relatif. Dans la région du Bois des Dames, le système faillé encadré par les failles de Sains et de Ruitz, et sans doute quelques autres failles subsidiaires ont affecté l'Argile de Louvil et lui sont donc postérieures.

✧ Les conglomérats à galets de silex observés au Bois des Dames (entre 75 et 85 m : arrêt 3) peuvent ici recevoir une explication alternative. Si l'on admet que les séries détritiques, partiellement conglomératiques, qui coiffent les monts de Flandres expriment une phase du soulèvement de l'Artois (cf. § III-1), les cailloutis du Bois des Dames peuvent avoir deux significations exclusives :

- s'ils représentent un faciès amont de la Formation des Monts de Flandres (Houthuys, 2014), ils témoignent de la progression du basculement régional lié à la surrection de l'Artois puisqu'ils reposent sur les couches basales du Thanétien ; et le système faillé localisé ici au sud de Bailleul participerait à un épisode d'âge post-éocène ;
- sinon, ils représentent un étalement de cailloutis sur un piedmont continental plio-quadernaire et il ne faut pas les corréliser avec la Formation des Monts de Flandres ; alors ils ne nous apprennent rien sur le système faillé de Bailleul.

✧ Seule la faille de Ruitz montre un parallélisme étroit entre au moins une partie de sa trace et l'isohypse 80 (Fig. 17). Les ressauts morphologiques très marqués le long de la faille de Ruitz et de celle de Bours suggèrent qu'une tectonique assez récente les ait mobilisées.

✧ S'appuyant sur une analyse très fine des dépôts qui recouvrent la craie sur les plaines du nord de la France, Sommé (1977) a fortement évoqué la possibilité de mouvements tectoniques mettant en jeu des failles durant le Pléistocène moyen et supérieur (entre 700 000 et 12 000 ans). Ceci reste à confronter avec le modeste soulèvement tectonique régional (de l'ordre de 50 m) que l'analyse des terrasses de la Somme a permis de différencier de l'effet des variations climatiques durant le dernier million d'années (Antoine *et al.* 2007).

CONCLUSION

La visite de terrain entre les monts de Flandres et les collines d'Artois traverse un territoire dont l'Homme a de tout temps exploité les ressources : matériaux minéraux en surface et en souterrain, agriculture sous ses diverses formes, eau, espaces. Il y a bâti, de façon dispersée par endroits, concentrée ailleurs. Il a tressé un réseau de drainage conséquent sur des espaces plats et peu perméables. Il a tissé des réseaux de voies de communication faisant obstacle par endroits au ruisselle-

ment naturel. Il a imprégné les sols et toute la biosphère (lui compris) d'éléments et composés chimiques qui ont alimenté une activité industrielle, très prégnante durant 3 siècles. Tout cela est allé trop vite par rapport au territoire naturel dont les réponses adaptatives paraissent à l'Homme de plus en plus insupportables. Cela tient à deux raisons : d'abord l'espèce humaine est de plus en plus abondante sur un espace qui ne s'agrandit pas ; ensuite les pas de temps d'action diffèrent par trop entre l'Homme et la planète.

Au niveau local, les réponses se vivent surtout par la relation avec l'eau, superficielle comme souterraine : risques d'inondations, baisse de productivité de la ressource, érosion/sédimentation, dégradation qualitative des sols et appauvrissement pédologique. On a vu que le transfert souterrain de l'eau se mesure en dizaine d'années à l'échelle du territoire régional. Mais l'augmentation de consommation par l'Homme, sur un espace donné, n'a aucune raison d'entraîner une augmentation des pluies pour tenir la ressource à niveau ! La dégradation qualitative de la ressource par des intrants à des doses toxiques n'a aucune raison d'entraîner une accélération / démultiplication des processus naturels d'épuration pour compenser la réduction quantitative conséquente.

Au niveau global, les réponses sont encore plus complexes car elles mobilisent de nombreux processus qui s'enchaînent et s'emboîtent, chacun avec son propre pas de temps. Rien n'autorise à penser que l'anticlinal de l'Artois a terminé de croître. La déformation qu'il accommode s'exprime par des événements continus et discontinus. Au cours du dernier millénaire, quelques séismes ont été enregistrés (Lambert & Levret-Albaret, 1996). Mais par comparaison avec ceux des régions dites actives (Antilles, ceinture Pacifique, régions périméditerranéennes), il s'agit de séismes modérés, voire de déformation aismique. Entre temps, la déformation tectonique continue se poursuit sans que l'on sache l'apprécier. Ce n'est pas faute d'essayer (Fourniguet, 1977). Le développement du suivi géodésique par satellite fait ses preuves sur les orogènes actifs (Alpes, Himalaya, Andes, ...) et commence à apporter des résultats prometteurs sur les zones moins montagneuses et réputées peu mobiles (Grappin *et*

al., 2008). Mais on ne publie pas encore de cartes de mobilité verticale régionale d'autant plus qu'il faudrait s'accorder sur un niveau zéro relatif planétaire. Or le dynamisme des masses d'eau de l'océan mondial, dépendant du climat, n'est pas encore suffisamment compris au niveau régional pour que le citoyen puisse acquérir la perception d'un état qu'il qualifiera de normal... à son échelle de temps propre. On pourrait ajouter les effets des mécanismes compensatoires locaux qui, par érosion / sédimentation, tendent à corriger les phénomènes actifs sur un pas de temps plus grand.

Cette visite de terrain est l'occasion d'une prise de conscience, à partager avec le plus grand nombre. Nous n'avons examiné que les relations entre l'Homme et son environnement minéral. Mais l'Homme n'est qu'une espèce parmi d'autres qui, toutes, cherchent à s'adapter de façon dynamique aux variations de leur environnement. Les zoologistes et botanistes s'en occupent. Il faut surtout que les réflexions suscitées par les observations du jour inspirent les décisions à venir en matière d'aménagement du territoire pour les décideurs de tous niveaux, pour tous les citoyens, citadins et ruraux.

Remerciements

Les auteurs savent gré aux quelques 400 participants, de tous profils qui, depuis 2004, ont suivi cet itinéraire. Leurs commentaires, expériences, témoignages et questionnements sont toujours stimulants. Nos remerciements vont aussi à UTAM-Nord pour la mise à disposition des données géologiques et historiques du bassin houiller. Les relecteurs, Christian Dupuis et Pierre Dron, ont bien exercé leur sagacité pour amener à préciser une idée, améliorer une description, compléter les références scientifiques nécessaires ; qu'ils en soient remerciés. Les auteurs ont encore une fois exercé la patience du comité rédactionnel et sont reconnaissants de sa confiance vigilante. Et l'on ne peut clôturer ce compte rendu sans exprimer une reconnaissance à Jean Sommé† qui n'a rien laissé de côté. Ce qu'il ne savait pas expliquer, il le formulait en questions... pour nous ouvrir des pistes. Suivons son exemple.

BIBLIOGRAPHIE

- AMÉDRO F. & ROBASZYNSKI F. (2014). – Le Crétacé du Bassin parisien. In: GELY J.-P. & HANOT F. dir., *Le Bassin parisien, un nouveau regard sur la géologie. Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris., Mémoire hors-série n° 9* : 75-84.
- ANTOINE P., LIMONDIN LOZUET N., CHAUSSÉ 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 from interglacial deposits. *Quaternary Science Reviews*, **26** : 2701-2723.

- BERGERAT F. dir., avec la collaboration de P. GAVIGLIO, J.-P. GELY, N. GINSBURGER, J. LABOURGUIGNE, P. LE VIGOUROUX, J. LORENZ & M.-J. ROULET (2018). – 14-18, *la Terre et le Feu. Géologie et géologues sur le front occidental*. Co-édition AGBP – COFRHIGEO – SGN, Mémoire hors-série n° 10 de l'AGBP, 480 p.
- BOUROZ A. (1956). – Contribution à l'étude des failles épicrotacées de l'Artois. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LXXXI** : 51-62.
- BRIQUET A. (1905). – Quelques phénomènes de capture dans le bassin de l'Aa. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XXXIV** : 111-120.

- BUDZIK E., MIS J. & MEILLIEZ F. (2019). – Les terrils sur le bassin houiller du Nord – Pas-de-Calais. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **26** (2^e série) : 33-40.
- COLBEAUX J.-P., LEPLAT J., PAEPE R. & SOMMÉ J. (1978). – Tectonique récente dans le Nord de la France et le sud de la Belgique : exemple de la Plaine de la Lys (Feuille d'Hazebrouck à 1/50 000). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XCVII** : 179-188.
- CRAMPON N., MANIA J. & CAOUS J.-Y. (2003). – Aquifères et ressources en eau souterraine du Nord – Pas-de-Calais. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **10** (2^e série) : 219-232.
- DESCHODT L. (2014). – *Chronostratigraphie et paléoenvironnements des fonds de vallée du bassin français de l'Escaut*. Thèse de géographie physique, Université Paris-I – Panthéon-Sorbonne, Paris, 632 p.
- DION R. (1983). – Un exemplaire de modelé agraire : les champs bombés dans la plaine de la Lys. *Hommes et Terres du Nord*, **2** : 1-12.
- DUBOIS G. (1925). – Note sur la plaine de la Lys aux environs d'Armentières et observations sur la nature et sur l'âge de cette plaine. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **L** : 97-107.
- DUCHAUFOR P. (1991). – *Pédologie*. Coll. Abrégés, Masson édit., Paris, 289 p.
- FOURNIGUET J. (1977). – Géodynamique actuelle dans le Nord-Est de la France. *Mémoires du B.R.G.M.*, Orléans, **127** : 173 p.
- GOSSELET J. (1894). – La Plaine de la Lys. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XXII** : 38-53.
- GOSSELET J. (1898). – Sondages à Bailleul. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XXVII** : 226-230.
- GOSSELET J. (1908). – Note sur quelques failles communes aux terrains crétaciques et houiller de l'Artois. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XXXVII** : 80-109.
- GOSSELET J. (1921). – La Plaine de la Lys (Mémoire posthume). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XLV** : 146-166, 1 pl. h-t.
- GOUJET D. & BLIECK A. (1979). – Les Vertébrés de l'Assise des Schistes et Grès de Pernes (Dévonien du Nord de la France). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XCVIII** : 263-278, 1 pl. h-t.
- GRAPPIN C., CARDIN P., GOFFÉ B., JOLIVET L. & MONTAGNER J.-P. (2008). – *Terre, planète mystérieuse*. Le Cherche-Midi, Paris, 167 p.
- HEINZELIN de J. (1963). – Le réseau hydrographique de la région gallo-belge au Néogène. Essai de reconstitution. *Bulletin de la Société Belge de Géologie*, **LXXII** : 137-148.
- HEYSE I. & DEMOULIN A. (2018). – The Flemish valley: response of the Scheldt drainage system to climatic and glacio-eustatic oscillations. In: DEMOULIN A. ed., *Landscapes and landforms of Belgium and Luxembourg*. Springer International Publishing AG: 297-311. DOI 10.1007/978-3-319-58239-9_18
- HOUTHUYS D. (2011). – A sedimentary model of the Brussels Sands, Eocene, Belgium. *Geologica Belgica*, **14** : 55-74.
- HOUTHUYS D. (2014). – A reinterpretation of the Neogene emersion of central Belgium based on sedimentary environment of the Diest Formation and the origin of the drainage pattern. *Geologica Belgica*, **17** (3-4) : 211-235.
- LAGA P., LOUWYÉ S. & GEETS S. (2001). – Paleogene and Neogene lithostratigraphic units (Belgium). *Geologica Belgica*, **4** (1) : 135-152.
- LAMBERT J. & LEVRET-ALBARET A. (1996). – *Mille ans de séismes en France*. Ouest Éditions, Nantes, 80 p.
- LANGHOR R. (2001). – L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien. Apports de l'archéopédologie. *Étude et Gestion des Sols*, **8** (2) : 103-118.
- LEMAL S. & MEILLIEZ F. (2017). – L'Après-mine, un nouveau chapitre scientifique du bassin houiller du Nord – Pas-de-Calais. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **24** (2^e série) : 59-67.
- LEMAN P. (2010). – *À la recherche des voies romaines dans le Nord – Pas-de-Calais*. Les Éditions Nord Avril, 142 p.
- MEILLIEZ F. (2016). – Le Cambrésis masque-t-il un lien ou une discontinuité structurale entre l'Artois et l'Ardenne ? *Annales de la Société Géologique du Nord*, **23** (2^e série) : 17-29.
- MEILLIEZ F. (2017). – Héritages de l'exploitation industrielle et scientifique du gisement houiller du Nord et du Pas-de-Calais (Carbonifère supérieur), une longue histoire (xvii^e – xxiv^e siècles). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **24** (2^e série) : 17-31.
- MEILLIEZ F. (2018). – Un nœud structural mobile à la jonction du Cambrésis, de la Thiérache et du Vermandois. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **25** (2^e série) : 53-67.
- MEILLIEZ F., DUCHAUSSOIS F., DESCHODT L. & AMÉDRO F. (2019). – La vallée du Noirieu et son contexte géologique de Vadencourt à Bergues/Sambre (Aisne). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **26** (2^e série) : 59-68.
- MEILLIEZ F. & DUMONT G. (2019). – La bassin minier du Nord – Pas-de-Calais, une expérience de guerre totale. In: BERGERAT F. dir., 14-18, *La Terre et le Feu. Géologie et géologues sur le front occidental*. Co-édition AGBP – COFHRIGEO – SGN, Mémoire hors-série n° 10 de l'AGBP : 106-115.
- NOLF D. & STEURBAUT E. (1990). – Stratigraphie de l'Éocène en Flandre occidentale et dans les régions limitrophes. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris*, **27** (3) : 9-36.
- PAEPE R. (1964). – Les dépôts quaternaires dans la plaine de la Lys. *Bulletin de la Société Belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, **73** (3) : 327-365.
- PAEPE R. (1965). – Évolution morphologique de la Plaine de la Lys et des Monts de Flandres. *Bulletin de la Société Belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, **74** (2) : 1-18.
- PAEPE R. & VANHOORNE R. (1967). – The stratigraphy and palaeobotany of Late Pleistocene in Belgium. *Mémoire pour servir à l'explication des cartes géologiques et minières de la Belgique*. **8** : 96 p., 14 pl.

- PINCHEMEL P. (1954). – *Les plaines de craie du nord-ouest du Bassin parisien et du sud-est du Bassin de Londres et leurs bordures*. Librairie A. Colin, Paris, 502 p., 22 pl. h-t.
- ROBASZYNSKI F. (1987). – Du Boulonnais au Bassin de Mons : le Paléozoïque et les héritages varisques dans la couverture. In: CAVELIER C. & LORENZ J. coord., *Aspect et évolution géologiques du Bassin parisien, Association des Géologues du Bassin de Paris, Mémoire hors-série n° 6* : 69-86.
- ROBASZYNSKI F. & GUYÉTANT G. coord. (2009). — *Des roches aux paysages dans le Nord - Pas-de-Calais - Richesse de notre patrimoine géologique*. Société géologique du Nord & Conservatoire des sites naturels du Nord et du Pas-de-Calais édit., Villeneuve d'Ascq & Lillers, 152 p.
- SALVADOR P.-G., DESCHODT L. & COUTARD S. (2005). – Nouvelles observations sur la stratigraphie des formations holocènes (récent) de la plaine de la Lys à Houplines (Nord). *Quaternaire*, **16** (1) : 65-68.
- SEYDOUX P. (1976). – *Forteresses médiévales du Nord de la France*. Éditions de la Morande, Paris, 320 p.
- SOMMÉ J. (1977). – *Les plaines du Nord de la France et leur bordure : étude géomorphologique*. Univ. Lille III édit (1981), thèse soutenue à Paris-I (1975), 2 tomes : texte (810 p.), illustrations, 1 pl. h-t.
- SOMMÉ J., MUNAUT A.V., PUISSÉGUR J.-J., CUNAT-BOGÉ N., HEYVAERT F. & LEPLAT J. (1996). – L'Eemien sous les formations fluviatiles weichséliennes et holocènes du sondage d'Erquinghem (Nord de la France) dans la plaine de la Lys. *Quaternaire*, **7** (1) : 15-28.
- WATERLOT G. (1969). – Aperçu géologique de la région de Lille. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LXXXIX** : 67-77.
- WYNS R. (2014). – Le Bassin parisien du Tertiaire à l'Actuel. In: GELY J.-P. & HANOT F. dir., AMÉDRO F., BERGERAT F., DEBEGLIA N., DEROIN J.-P., DOLIGEZ B., DUGUÉ O., DURAND M., EDEL J.-B., GAUDANT J., HANZO M., HOUEL P., LORENZ J., ROBASZYNSKI F., ROBELIN C., THIERRY J., VICELLI J., VIOLETTE S., VRIELYNCK B., WYNS R. et coll. (2014). – Le Bassin parisien, un nouveau regard sur la géologie. *Bulletin d'information des Géologues du Bassin de Paris, Mémoire hors série n° 9* : 85-93.
- YANS J., DUPUIS C., DEMOULIN A., DEKONINCK A. & QUESNEL F. (2020). – Réduction du relief varisque et périodes d'intense altération météorique au Méso-Cénozoïque. In: MEILLIEZ F. & GOEMAERE E. coord., *Le Massif ardennais – un jeune massif ancien. Géochronique*, **154** : 37-39.

WEBOGRAPHIE

- ABBAYE DE CHOCQUES : https://fr.wikipedia.org/wiki/Abbaye_Saint-Jean-Baptiste_de_Chocques [consulté le 3 mai 2020]
- ABBAYE DE LOOS : https://cmapl.pagesperso-orange.fr/fset_histoire.html [consulté le 15 mai 2020]
- BANQUE DE DONNÉES DU SOUS-SOL (BSS) : <http://infoterre.brgm.fr/page/banque-sol-bss>
- BANQUE HYDRO : <http://hydro.eaufrance.fr/> [consulté en janvier 2014]
- BOURS : <http://www.donjondebours.fr/>
- COMMISSION INTERNATIONALE DE STRATIGRAPHIE : www.stratigraphy.org
- GÉOPORTAIL : <http://www.geoportail.gouv.fr/accueil>
- INFOTERRE : <http://infoterre.brgm.fr/>
- LYCÉE TECHNIQUE : <http://www.lyceetravauxpublicsbruay-labuissiere.fr>
- PROJET BABEL : http://projetbabel.org/fluvial/rica_aire-canal.htm [consulté le 23 avril 2020]
- SÉRÉ DE RIVIÈRES : http://www.fortiffserre.fr/index_fichiers/Page385.htm [consulté le 16 mai 2020]
- UTAM-NORD : <https://www.brgm.fr/activites/apres-mine/unite-territoriale-apres-mine-utam-nord> [consulté le 3 mai 2020]

Mémoire n° XVII – La Société géologique du Nord et l'histoire des sciences de la Terre dans le nord de la France

The Société géologique du Nord and history of Earth Sciences in northern France

La Société géologique du Nord, éditeur depuis 1870, a publié entre 1876 et 1983 vingt-cinq *Mémoires* réunis en seize tomes. Ceux-ci traitent de sujets de géologie sédimentaire, allant de la description de terrains du Paléozoïque-Mésozoïque-Cénozoïque à la géologie appliquée, en passant par la paléontologie, la pétrographie sédimentaire, le Quaternaire, et même la préhistoire. Avec ce tome XVII, la SGN reprend la publication des *Mémoires* sur un sujet nouveau : l'histoire de la Société et celle de sa discipline dans le contexte du Nord – Pas-de-Calais et des régions franco-belges environnantes. Ce *Mémoire* XVII (paru en décembre 2014) retrace 143 années de la SGN en relation avec les entreprises industrielles, les associations et les institutions régionales.



© Alain Trentesaux 2006

Sommaire / Contents

La Société géologique du Nord et les sciences de la Terre dans le nord de la France : science, industrie et société.
Les dix premières années de la SGN et sa place dans la société en cours d'industrialisation du XIXe siècle.
Les financements de la Faculté des sciences de Lille par les compagnies minières : un simple échange de bons procédés ?
Le rôle des ingénieurs des mines dans la vie industrielle, scientifique et sociale : l'exemple de Félix Broussier (1874 - 1938).
Plus d'un siècle de femmes à la Société géologique du Nord : un reflet de leur place dans l'enseignement supérieur et la recherche française.
Le laboratoire de Géologie, la Société géologique du Nord et le Musée d'histoire naturelle de Lille – Souvenirs d'un étudiant de géologie à Lille pendant l'Occupation (mai 1940 - juin 1944).
René Marlière (1905 – 1993), président de la Société géologique du Nord en 1955 et professeur de géologie à la Faculté polytechnique de Mons (Belgique), 1928-1970.
La Société géologique du Nord et le Tunnel sous la Manche : une petite histoire commune.
La Société géologique en 1960 – une évocation personnelle.
La période dinaro-hellénique de la Société géologique du Nord.
D'une présidence à l'autre (1971 – 1996-97) : l'un des objectifs de la Société géologique du Nord évolue vers la sauvegarde du patrimoine.
Le rôle de la Société géologique du Nord et de ses publications dans l'évolution des connaissances sur le Quaternaire.
Les peintures murales de l'Institut des sciences naturelles à Lille, un patrimoine géologique à préserver.
La bibliothèque recherche des sciences de la Terre de l'Université de Lille au fil du temps : historique du patrimoine, un fonds au service de la communauté scientifique.
Le département de géologie du Musée d'histoire naturelle de Lille, des collections à l'image de l'histoire géologique régionale.

Commande / Order

Société Géologique du Nord, à l'attention du Directeur de la publication
c/o Université de Lille – Sciences et technologies, bâtiment SN5 (Sciences de la Terre)
F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France)
E-mail : sgn-edition@univ-lille1.fr
Tél. : 03 20 43 41 40 / +33 (0)3 20 43 41 40
Prix / Price : 40 € TTC + 4 € de frais de port et emballage si le volume n'est pas pris au dépôt

SITES GÉOLOGIQUES REMARQUABLES DE PROXIMITÉ POUR L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE – ÉTAT DES TRAVAUX DU GROUPE DE TRAVAIL « MÉDIATION SCIENTIFIQUE » DE LA SGN EN MARS 2020

*Noticeable near geological sites for secondary education – state of SGN-working group for mediation
(March 2020)*

par Renée DUCHEMIN

48 rue Caumartin, 59000 Lille
ducheminrenee@yahoo.fr

Francis AMÉDRO

26 rue de Nottingham, 62100 Calais
francis.amedro@free.fr

Michel DOFFE

7 rue de Euwis, 59113 Seclin
m_doffe@orange.fr

François DUCHAUSSOIS

10 Les Prés du Midi, 02100 Neuville-Saint-Amand
fj.duchaussois@wanadoo.fr

Francis MEILLIEZ

Université de Lille, Département Sciences de la Terre,
UMR8217 du CNRS/LOG, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex
francis.meilliez@univ-lille.fr

Christine MOREELS

Lycée Jean Perrin, 59130 Lambersart
christine.moreels@ac-lille.fr

Luc PRUVOST

57 rue du 11 novembre, 62172 Bouvigny-Boyeffles
pruvostl@free.fr

Marie-Nathalie ROUGET

Collège A. Camus, 62380 Lumbres
mnatforestier@orange.fr

Nadine SARRAZIN

12 rue du Maréchal Delattre de Tassigny, 59420 Mouvaux
nad.sarrazin@icloud.com

Résumé

Le groupe de travail « Médiation scientifique » de la Société Géologique du Nord présente dix dossiers pédagogiques sur des sites de proximité illustrant des notions indiquées dans les nouveaux programmes de l'enseignement primaire et secondaire.

Abstract

The Société Géologique du Nord mediation working group presents ten educational files for illustrating close sites in relation with the new secondary education programs.

INTRODUCTION

La Société Géologique du Nord (SGN) a mis en place depuis 2016 un groupe de travail « Médiation scientifique » associant des scientifiques, des représentants des corps d'inspection et des professeurs, actifs ou retraités, en lien avec les inspecteurs de SVT (sciences de la vie et de la Terre) en exercice, chargés de réfléchir à la mise en œuvre des programmes scolaires en primaire et au collège. Les retours d'expériences permettent à la SGN de proposer un soutien documentaire aux enseignants, ce qui entre en effet dans ses missions (Blieck *et al.*, 2014).

La loi d'orientation et programmation pour la refondation de l'école de la République du 8 juillet 2013 définit les grands principes de la réforme de l'école élémentaire et du collège (Webographie : Légifrance). Elle est mise en place depuis la rentrée de septembre 2016. Elle entraîne une nouvelle

organisation de l'école et du collège, de nouveaux cycles, un renouvellement profond des pratiques pédagogiques et laisse une place significative aux travaux interdisciplinaires (Campagne *et al.*, 2016). Les programmes des cycles 3 et 4 mentionnent notamment des notions et concepts de géologie au sein de grandes thématiques. Pour mettre en application ces programmes, en particulier en géologie, et les ancrer au mieux dans le contexte régional, comme le recommandent les textes officiels, les enseignants doivent pouvoir exploiter des exemples locaux. La région des Hauts-de-France est riche d'exemples de proximité pouvant être exploités avec des élèves. Quelques supports, parfois mal connus ou identifiés par les professeurs, existent déjà sur le terrain.

Le premier travail du groupe de travail « Médiation scientifique » a consisté en l'étude détaillée des nouveaux programmes et notamment au repérage des parties susceptibles d'être en

lien avec la géologie (Campagne *et al.*, 2016). En s'appuyant sur l'expertise d'universitaires, le groupe a entrepris de localiser les ressources locales ou régionales des différents pays des Hauts-de-France qui cadrent avec les nouveaux programmes du cycle de consolidation (cycle 3) et du cycle des approfondissements (cycle 4) de l'école élémentaire et du collège. Les exemples choisis s'articulent étroitement aux attendus de fin de cycle, aux compétences et connaissances travaillées. Ils s'inscrivent naturellement dans les recommandations qui invitent à privilégier des exemples locaux ou régionaux. La SGN espère que les enseignants pourront trouver dans ces exemples, fondés sur des bases scientifiques éprouvées, des supports pouvant être utilisés à des fins pédagogiques.

Le groupe de travail ambitionne aussi d'impulser une dynamique en facilitant les échanges entre les différents acteurs et utilisateurs de ces dossiers, afin de mutualiser les ressources repérées, et enrichir par d'autres exemples cette rubrique à vocation pédagogique. Dans l'élan actuel vers la « science participative », les professeurs – de tout niveau – sont ainsi invités à signaler à la SGN des affleurements temporaires ou permanents qu'ils connaissent. La SGN examinera la possibilité de les aider à les analyser et à les valoriser, entre autres par une publication dans les *Annales de la Société Géologique du Nord*. Le sens de cette proposition est de permettre aux générations suivantes de bénéficier de données enregistrées, comme nous bénéficions actuellement des descriptions, parfois illustrées, de nombreux observateurs des XIX^e et XX^e siècles, via la ressource numérisée des *Annales* (<https://sgn.univ-lille.fr/editions-sgn>).

Enfin, les nouveaux programmes de lycée mis en place depuis 2020 ont incité le groupe, suivant la même démarche, à entreprendre aussi la réalisation de dossiers plus orientés vers les professeurs de SVT de lycée.

LES DOSSIERS DISPONIBLES (février 2020)

À ce jour, une dizaine de dossiers existent sur le site Web de la SGN : <https://sgn.univ-lille.fr/> (rubrique « territoire », onglet « pédagogie »). Ces dossiers sont partagés avec la plateforme S-Pass Territoires (<https://www.s-pass.org/fr/>), portée par le CAUE (Conseil, Architecture, Urbanisme, Environnement) du Nord (rubrique « ressources », onglet « production »). Le CAUE est une association de type 1901, mise en place par la loi sur l'architecture (3 janvier 1977). Financée par ses cotisants et une taxe parafiscale sur les permis de construire sous le contrôle du Conseil Départemental, elle diffuse du conseil aux particuliers comme aux collectivités et tout type d'institution (www.caue-nord.com). Sur la plateforme S-Pass Territoires, la recherche des livrets pédagogiques peut également se faire par « mots clés ». Les différents dossiers réalisés à ce jour (février 2020) sont résumés dans ce qui suit.

Mélantois : un cours d'eau étouffé par l'urbanisme croissant

Ce dossier "Mélantois - Ru des Voyettes", traite de l'aménagement du territoire en périphérie lilloise. Révélé à partir d'inondations régulières de la bretelle d'accès à l'autoroute A23 au début des années 2000, il confronte les notions de ressources naturelles, de paysage naturel, d'artificialisation du paysage et les conflits d'usages qui en résultent (Fig. 1). Il témoigne de la nécessité de penser un aménagement, quel qu'il soit, dans son contexte et non seulement sur la parcelle qu'il occupe (Meilliez *et al.*, 2014).



Fig. 1. – Autoroute A23 : bretelle d'accès vers Valenciennes noyée parce qu'elle est installée sur le thalweg, souvent asséché, du Ru des Voyettes (photo F. Meilliez, février 2013).

Fig. 1. – A23 highway: flooded access road towards Valenciennes, as being localized upon the frequently draught 'Ru des Voyettes' thalweg (picture by F. Meilliez, Febr. 2013).

Douaisis : la série géologique type de la région - sable et argile sur craie

Les exemples choisis dans le Douaisis, carrière de Hamel (Fig. 2) et carrière de Cantin (Fig. 3), sont axés sur des ressources locales (craie, sable) dont l'exploitation actuelle est arrêtée (Cantin), ou épisodique (Hamel). La loi sur les carrières (Légifrance : loi 93-3 du 4 janvier 1993) fixe les conditions de revalorisation des sites de carrières après exploitation. Un choix de revalorisation environnementale a été fait pour les sites présentés, qui restaure et préserve la biodiversité. Grâce à l'impulsion donnée pour la protection associée de la géodiversité (De Wever *et al.*, 2018), une telle démarche est un premier pas vers une prise en considération de la géodiversité et pour une éventuelle inscription à l'inventaire du patrimoine géologique.

La carrière de Hamel (Fig. 2) exploite le sable landénien (Thanétien), dit « sable à lapins » (Formation des Sables d'Ostricourt : e2a des cartes géologiques). Pour préserver un patrimoine naturel rare dans la région, l'entreprise STB Matériaux

(Webographie) a appliqué la charte Environnement de l'Union Nationale des Industries Extractives (UNICEM). Au cours de l'exploitation sont apparus des milliers d'hyménoptères, notamment des abeilles sauvages de plusieurs dizaines d'espèces différentes. En accord avec les services départementaux, après exploitation, les parties concernées ont été réaménagées : récréation du talus, apports de terres végétales, élimination des plantes invasives (par exemple la Renouée du Japon) et ensemencement de plantes favorables au développement de la biodiversité. De nombreuses espèces animales colonisent ce milieu. On peut, par exemple, observer l'installation de nombreuses hirondelles des rivages (*Riparia riparia*) qui nichent dans l'ancien front de taille. La carrière de Hamel est exemplaire pour sa géologie et pour la démarche de préservation de la biogéodiversité.



Fig. 2. – La carrière de Hamel (59) : vue d'ensemble de l'ancien front de taille qui montre la succession des bancs de sables de la série landénienne (Thanétien, Paléocène). Les sables roux, sont verts à l'origine ; leur teinte change en arrière du front de taille, par oxydation naturelle de la glauconie (le Fe^{2+} s'oxyde en Fe^{3+}) en quelques mois par altération météorique (photo L. Pruvost).

Fig. 2. – Hamel (59) quarry: panoramic view of ancient working faces which exhibit the Landenian glauconitic sandy series (Thanetian, Palaeocene). Rusty sands were originally green as natural oxydation proceeded (Fe^{2+} becomes Fe^{3+}) (picture by L. Pruvost).

La carrière de Cantin (Fig. 3) est une ancienne carrière de craie sénonienne (Coniacien : e4 des cartes géologiques récentes) extraite sur plus de 20 m de profondeur et exploitée jusqu'en 1990. Après sa fermeture, la nature a repris ses droits et la carrière a donné naissance au lac de Cantin. Le niveau d'eau du lac matérialise le niveau piézométrique de la nappe libre de la craie. Le site peut accueillir certains hivers jusqu'à 10 000 oiseaux en halte migratoire. Cette carrière est propriété de la communauté d'agglomération du Douaisis et placée pour sa gestion, sous la protection du Conservatoire d'Espaces Naturels du Nord - Pas-de-Calais (désormais fusionné avec le Conservatoire d'Espaces Naturels de Picardie au sein du Conservatoire d'Espaces Naturels des Hauts-de-France). On peut y observer une diversité de milieux naturels qui

abritent de nombreuses espèces animales et végétales d'une grande valeur patrimoniale (75 espèces animales dont le canard souchet, la libellule fauve, les hirondelles de rivage...).



Fig. 3. – Le lac de Cantin, ancienne carrière de craie devenue pôle nature : refuge de nombreuses espèces d'oiseaux (hérons cendrés, mouettes, goélands, cormorans, etc.) (photo L. Pruvost).

Fig. 3. – Cantin lake is an old abandoned chalk quarry that behaves as a new natural system : various and many birds species use it (common herons, gulls, seagulls, cormorants, etc.). (picture L. Pruvost).

Le trait de côte : côte rocheuse et côte basse, des situations différentes soumises aux mêmes contraintes

Les Hauts-de-France disposent de 190 km de trait de côte, répartis en côte basse (Mer du Nord, Marquenterre) et côte rocheuse (Boulonnais, Pays-de-Caux). Nous avons retenu un exemple de chaque.

Évolution de la côte picarde entre Saint Valéry et Ault

La côte picarde s'étend de Mers-les-Bains au sud à la baie de l'Authie au nord. Au sud, les falaises crayeuses vives du Pays-de-Caux (Côte d'Albâtre) se prolongent par une falaise morte au nord d'Onival. À leurs pieds s'étend un cordon de galets distribué par le courant marin de dérive littorale vers le nord (Fig. 4). Au cours des temps historiques, ce cordon a progressivement migré toujours plus loin ; chaque temps d'arrêt est daté. La migration de ce cordon tend à fermer les estuaires des fleuves côtiers (Somme, Authie, Canche) et à isoler des lagunes que la sédimentation fluviale tend à combler peu à peu, réduisant ainsi l'accès aux ports de rive gauche (exemple de Saint-Valéry-s/Somme). Les Bas-Champs témoignent de ce comblement. Le site de Wissant en est un autre exemple.

Ce dossier met en évidence l'érosion provoquée par les éléments naturels, mais pointe aussi les conséquences des activités humaines (construction de jetées portuaires au sud, exploitation des galets au pied des falaises) qui accélèrent l'évolution naturelle. Ce site est l'un des rares endroits où le galet de silex donne lieu à exploitation, non seulement comme

granulats mais aussi pour une grande diversité d'usages, qui surprennent (webographie : Groupe Lhotellier ; Sibelco).

Des aménagements cherchent à protéger des inondations et à préserver l'état actuel du littoral en maintenant le trait de côte :

- ✧ construction d'épis perpendiculaires au rivage entre Ault et Cayeux pour lutter contre le transfert des galets vers le nord ;
- ✧ restitution de galets venus de carrières situées à un autre point du littoral par l'entreprise d'extraction de galets ;
- ✧ apports de blocs de calcaire du Boulonnais ;
- ✧ aménagement d'une « casquette », ouvrage important sur 7 km de long réalisé de 1997 à 2001.



Fig. 4. – Les Bas Champs de Cayeux (Hâble d'Ault) vus du promontoire d'Ault (80). Au premier plan, on observe la falaise crayeuse (début de la côte d'Albâtre) et la « casquette », ouvrage souligné par les barrières blanches et réalisé entre 1997 et 2001 pour maintenir le trait de côte et prévenir les inondations (photo R. Duchemin).

Fig. 4. – Bas Champs de Cayeux (Hâble d'Ault) viewed from Ault cliff (80). At front are chalky cliffs (beginning of Côte d'Albâtre) and the « casquette », masonry with white stones as built between 1997 and 2001 in order to maintain shoreline and anticipate marine floods (picture by R. Duchemin).

Se pose la question de la pérennité de ces aménagements face à l'érosion, dépendante des aléas climatiques : tempêtes (de plus en plus fréquentes et de plus en plus fortes), élévation du niveau de la mer... Le niveau marin monte inéluctablement depuis 20 000 ans, mais par à-coups. Le 27 juin 1846, Victor Hugo prononçait à l'Assemblée Nationale un vibrant plaidoyer pour engager une politique de protection du trait de côte. Sa famille était en effet propriétaire d'une maison qui se trouvait à Bourg d'Ault, c'est-à-dire un hameau d'Ault installé sur la grève. Moins d'un siècle plus tard, le hameau était entièrement happé par le domaine marin, et seul le clocher de l'église est resté visible un moment.

Évolution de la côte d'Opale : la baie de Wissant.

Le village de Wissant est particulièrement impacté par les phénomènes d'érosion (Clabaut & Chamley, 1986 ; Augris et al., 1990). Régulièrement la digue est détruite et doit être reconstruite après de fortes tempêtes. Ce dossier tente d'expli-

quer les contextes géographique et géologique qui provoquent cet important recul du trait de côte. Le transit sédimentaire important provoqué par les courants marins et par la dérive littorale dont est le siège la baie de Wissant est expliqué dans le dossier mais ce n'est pas sa présence qui permet d'expliquer le recul de la côte particulièrement important ici.

L'examen des différents facteurs intervenant permet d'imputer essentiellement aux tempêtes le recul du cordon dunaire et l'abaissement de la plage (Fig. 5). L'atténuation des saisons (hivers doux, étés "pourris") depuis le début des années 1980 ne permet plus de compenser l'amaigrissement hivernal par un engraissement estival. Ce déséquilibre sédimentaire semble être accentué par l'avancée en mer des digues de Boulogne-sur-Mer qui interceptent une partie du transit littoral. Enfin, la digue de Wissant elle-même constitue un obstacle à la houle qui, libérant son énergie, accentue l'abaissement de la plage devant l'ouvrage. En définitive, l'érosion de la baie de Wissant résulte à la fois des causes naturelles et des causes locales liées à des aménagements.



Fig. 5. – Rangée de pieux protecteurs parallèles au rivage sur la plage au bout de la digue de Wissant. Au fond, à gauche, la dune d'Aval ayant subi la tempête de 2018 (photo M. N. Rouget).

Fig. 5. – Line of posts parallel to the shoreline at the end of Wissant flood barrier. At rear, to the left, the Aval Dune suffered of the 2018 storm (picture by M.N. Rouget).

Bassin minier : traces plus ou moins discrètes d'une industrie extractive souterraine

Une synthèse sur le bassin houiller du Nord – Pas-de-Calais a été présentée dans les *Annales de la SGN* en 2017 (T24) à laquelle a été récemment ajouté un article sur les terrils (Budzik et al., 2019). Ce dossier comprend deux livrets : la fosse 11-19 à Loos-en-Gohelle (Fig. 6), avec les terrils les plus hauts d'Europe, et la mare à Goriaux associée à la fosse d'Arenberg. Ils illustrent des paysages du Nord - Pas de Calais fortement marqués par un passé industriel. Cette année est celle du tricentenaire de la première découverte d'une veine de charbon souterraine à Fresnes-s/Escaut, en 1720. Et voilà déjà 8 ans que le bassin minier du Nord – Pas-de-Calais a

été inscrit au Patrimoine Mondial de l'UNESCO au titre du patrimoine culturel évolutif. Doucement, les terrils résiduels deviennent des lieux de reconquête par une biodiversité nouvelle ; un nouvel écosystème s'installe.



Fig. 6. – Vue panoramique depuis le belvédère du terril 74A de Loos-en-Gohelle, orientée vers le nord-est (photo F. Duchaussois).
Fig. 6. – Panoramic view from top of the 74A heap (Loos-en-Gohelle), looking northeastwards (picture by F. Duchaussois).

Symbole des exploitations souterraines, les affaissements miniers s'identifient aujourd'hui grâce à l'eau dès lors que le niveau initial du sol est descendu sous le niveau piézométrique de la nappe phréatique locale : dans la craie à Pont-à-Vendin, dans les sables landéniens à Carvin. Ils résultent du mode d'abatage du charbon par exploitation totale. L'intensité de l'affaissement dépend surtout de la profondeur et de l'inclinaison de la veine, mais aussi de la présence d'autres exploitations à proximité. Pour un chantier isolé, l'affaissement commence rapidement et s'atténue de façon asymptotique de telle sorte qu'au-delà d'une dizaine d'années, les changements de pente superficiels ne sont détectables que par les perturbations des écoulements (cours d'eau, caniveaux, réseaux aqueux). Ils ont des conséquences sur les bâtiments (voir église de Noyelles-sous-Lens), tout en sachant que les plus fortement endommagés ont été reconstruits avec la participation financière des exploitants (Sallaumines, Loison-sous-Lens...) ; les marques encore visibles ici ou là sur des bâtiments ne sont que résiduelles. En profondeur, les principales modifications ne sont pas visibles puisqu'elles concernent surtout les circulations souterraines de l'eau. Les affaissements les plus spectaculaires aujourd'hui sont marqués par un plan d'eau urbain (Montigny-en-Gohelle, Vendin-le-Vieil...), ou un étang comme celui de la mare à Goriaux (Fig. 7). Sur 120 hectares, cette dernière résulte d'affaissements miniers dus à la fosse Arenberg. Ouverte en 1901, dès 1906 trois petits étangs apparaissent qui finissent par se réunir (1935) pour former un seul vaste plan d'eau. Lors de la période finale d'extraction, l'exploitant y déversait ses eaux d'exhaure (eau pompée dans la craie pour être injectée dans la veine de charbon avant abattage et y diminuer le taux de poussière, puis

re pompée du fond de la mine pour être rejetée en surface). La nappe phréatique des Sables d'Ostricourt au-dessus de l'Argile de Louvil (série landénienne : Thanétien) explique l'existence de cet étang. La craie est à environ 80 m de profondeur.

Il faut aussi examiner le réaménagement des sites miniers après exploitation. La mare à Goriaux fait partie de la forêt domaniale de Raismes – St-Amand - Wallers. Ce site d'une richesse écologique exceptionnelle, géré aujourd'hui par l'ONF, est devenu depuis 1979 un site d'observation de la mise en place d'un nouvel écosystème. Pour sa part, le site des fosses 11-19 (Loos-en-Gohelle) fait l'objet d'une reconversion fondée sur la mémoire minière, la culture, l'économie et l'environnement. Ouvert au public, ce site profite des deux belvédères que constituent les terrils, d'un ancien cavalier minier (ancienne voie ferroviaire minière reconvertie en sentier de promenade) aménagé en corridor biologique. Un programme de réhabilitation des cités minières voisines (logements avec le label Haute Qualité Environnementale, centrale photovoltaïque) s'inscrit dans cette démarche, exemplaire par l'intégration transversale des projets.

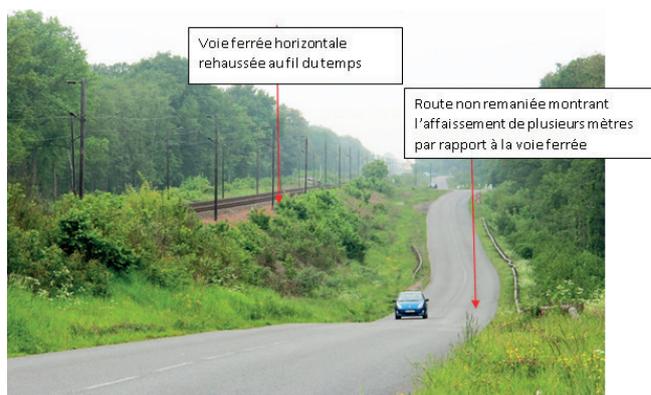


Fig. 7. – Le site de la fosse Arenberg : affaissement de la route (CD313), témoin par rapport à la voie ferrée Douai – Blanc-Misseron maintenue horizontale par des travaux d'entretien annuels (photo F. Duchaussois).
Fig. 7. – The Arenberg coal pit: subsidence of CD313 road; the railway (Douai – Blanc-Misseron) on left is horizontal because of maintenance works while the road was not corrected during subsidence (picture by F. Duchaussois).

Balades géologiques en ville : un exemple à Lille

Le BRGM édite des ouvrages qui proposent une balade dans diverses villes de France (voir Webographie) et commentent les échantillons de roches apposés sur les façades, ou qui constituent les murs des anciens bâtiments. Ces balades sont organisées autour d'une thématique, comme par exemple ici l'histoire géologique régionale, à savoir celle du territoire historique de la SGN, dans les Hauts-de-France et l'Ardenne. Elle est constituée pour l'instant de deux volets : la promenade géologique à Lille plus particulièrement destinée aux enseignants de 1^{re} générale, enseignement de spécialité, et une autre axée plutôt sur l'enseignement au collège.



Fig. 8. – La Porte de Paris à Lille : on y retrouve des matériaux de construction variés qui témoignent d’une histoire géologique du Paléozoïque au Cénozoïque (photo F. Duchaussois).

Fig. 8. – *The Paris Gate (Lille): various building stones are witnesses of a Palaeozoic to Cenozoic geological history (picture by F. Duchaussois).*

Le premier dossier, pour l’instant formulé dans l’optique de l’ancien programme de 1^{er}S, partie « tectonique des plaques et géologie appliquée » peut être facilement utilisé dans le cadre du thème actuel : la dynamique de la lithosphère. Il a été réalisé à partir du guide « promenade géologique à Lille » co-édité par le MNHN, le BRGM et Biotope (voir Webographie). Il propose 10 arrêts en s’appuyant sur les principaux monuments de la ville (vieille bourse, nouvelle bourse, métro Rihour, caserne Vandamme [Fig. 9], porte de Paris [Fig. 8], église Saint-Sauveur, pavillon Saint-Sauveur et gare Lille-Flandres), permettant de rechercher les différents matériaux utilisés dans les constructions et de les replacer dans l’histoire de la Terre (érosion, transport, sédimentation, changements climatiques, mouvements tectoniques, etc.). Le second dossier sur les monuments de Lille : « À la recherche des indices du temps passé dans la ville de Lille » permet d’aborder plus simplement



Fig. 9. – Mur d’enceinte de la caserne Vandamme à Lille : calcaire dévoniens à coraux tabulés *Thammopora cf. cervicornis* (photo F. Duchaussois).
Fig. 9. – *Surrounding wall in Lille (Vandamme barracks): Devonian coral limestone (Tabulidae) : Thammopora cf. cervicornis (picture by F. Duchaussois).*

le découpage des temps géologiques, et en se fondant sur les indices apportés par les roches sédimentaires, d’appréhender les changements climatiques et de la biodiversité au cours du temps, concepts présents dans le programme du cycle 4. D’autres dossiers viendront enrichir cette rubrique. Est en préparation une version pour la classe de seconde concernant le thème : Géosciences et dynamique des sols.

Les risques liés aux cavités souterraines superficielles



Fig. 10. – Fontis dans un champ de la métropole lilloise (photo Gaëtan Cheppe, mairie de Lille).

Fig. 10. – *Sudden vertical cave through a field in the Lille metropolitan area (picture by Gaëtan Cheppe, Lille town council).*

Ce dossier présente les risques liés à la présence de cavités anthropiques dans le sous-sol de la région lilloise (documents synthétisés à partir de documents diffusés lors de la journée Interreg [Programme européen visant à promouvoir la coopération entre les régions européennes de solutions communes dans les domaines du développement urbain, rural et côtier, du développement économique et de la gestion de l’environnement] du 21 novembre 2019 organisée par le CEREMA (Centre d’études et d’Expertise sur les Risques, l’Environnement la Mobilité et l’Aménagement). Se pose le problème d’effondrements brutaux, appelés fontis (Fig. 10), qui interviennent assez fréquemment dans la métropole lilloise. Mais la situation est comparable dans de nombreuses villes de la région dont le sous-sol est truffé de cavités abandonnées, plus ou moins bien connues et remblayées. Ces carrières résultent principalement d’exploitations en carrière souterraine de pierre à bâtir (entre les XIII^e et XX^e siècles surtout), ainsi que d’autres types d’exploitation (pierre à chaux, production de *Barbe de Capucin*). Sont également évoqués les points de faiblesse et les surveillances, visuelle et instrumentée. Un regard particulier est apporté aux carrières de Lezennes, au sous-sol particulièrement démonstratif.

CONCLUSION

Tous ces dossiers, d'abord conçus pour les enseignants de tous niveaux, peuvent aussi être utilisés par les animateurs d'activités périscolaires, associations et décideurs locaux souhaitant se former ou s'informer sur les ressources de leur territoire. Les enseignants pourront les utiliser à leur convenance. Mais ils sont aussi incités à trouver dans leur environnement local des exemples similaires qu'ils pourront adapter à leur secteur. Les enseignants qui repèrent de tels sites sont invités à se rapprocher du groupe « Médiation scientifique » de la SGN pour partager l'information et la valoriser scientifiquement. Le groupe continue son travail

pour proposer un ensemble de dossiers couvrant une large part des sites des Hauts-de-France. Tout au long de l'année 2020, les actions préparées par la SGN pour célébrer son sesquicentenaire (150 ans) seront accompagnées d'une exposition itinérante préparée par la DREAL (Direction Régionale à l'Environnement, l'Aménagement et le Logement), accompagnée du CEN (Conservatoire d'Espaces Naturels) pour les aspects techniques. Cette exposition rend compte d'une partie des travaux réalisés depuis la parution du livre qui avait valorisé quelques-uns des 146 sites, aujourd'hui inscrits à l'Inventaire Régional du Patrimoine Géologique (Robaszynski & Guyétant, 2009). Elle pourra continuer à se déplacer au cours de l'année 2021.

BIBLIOGRAPHIE

- AUGRIS C., CLABAUT P. & VICAIRES O. (1990). – *Le Domaine marin du Nord – Pas-de-Calais. Nature, morphologie et mobilité des fonds*. IFREMER. 95 p., 64 fig., 6 cartes [rapport]
- BLIECK A., BRICE D., CHARVET J., CUVELIER J., DE BAERE J.-P., DHAINAUT A., MATRION A., MEILLIEZ F., MISTIAEN B., OUDOIRE T., RICOUR J., SOMMÉ J. & TRENTESAUX A. (2014). – La Société Géologique du Nord et les sciences de la Terre dans le nord de la France : science, industrie et société. *Soc. Géol. Nord, Mémoire XVII* : 3-40.
- BUDZIK E., MIS J. & MEILLIEZ F. (2019). – Les terrils sur le bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **21** (2^e série) : 33-40.
- CAMPAGNE D., DAMBRINE J.-M., DOFFE M., DUCHAUSSOIS F., DUCHEMIN R., GREVET N., IMPORTUNO F., MEILLIEZ F., MOULLET J.-M., PRUVOST L., ROUGET M.-N. & SARRAZIN N. (2016). — Quelle place pour la géologie dans les programmes de l'école au lycée ? *Ann. Soc. Géol. Nord*, **23** (2^e série) : 11-16.
- CLABAUT P. & CHAMLEY H. (1986). – Observations sédimentologiques sur le littoral de Wissant (Site des Caps, Boulonnais). *Ann. Soc. Géol. Nord*, **105** : 169-178.
- DE WEVER P., EGOROFF G., CORNÉE A., GRAVIOU P., AVOINE J. & BAILLET L. (2018). – *Patrimoine géologique : Inventaire national*. Mus. Nat. Hist. Nat., EDP sciences édit. : 252 p.
- MEILLIEZ F., COULON H. & MAVEL J. (2014). – Cours d'eau, inondabilité et urbanisme : quelques exemples à méditer sur le territoire de Lille-Mélantois. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **21** (2^e série) : 35-42.
- ROBASZYNSKI F. & GUYETANT G. (2009). — *Des roches aux paysages dans le Nord - Pas-de-Calais. Richesse de notre patrimoine géologique*. Conservatoire des Sites Naturels du Nord et du Pas-de-Calais, Lillers & Société Géologique du Nord, Villeneuve d'Ascq édit. : 152 p.

WEBOGRAPHIE

- N.B. — Tous les sites ci-dessous ont été à nouveau consultés le 3 mars 2020.
- ANNALES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD : <https://iris.univ-lille.fr/handle/1908/32/browse>
- DREAL Hauts-de-France : dossiers techniques concernant l'environnement : <https://www.hauts-de-france.developpement-durable.gouv.fr/?-Les-dossiers->
- GROUPE LHOTELLIER : production de granulats : <https://www.lhotellier.fr/>
- INDUSTRIE DU GALET À CAYEUX/MER : <http://www.cayeux-sur-mer.fr/economie-et-developpement/industrie-du-galet/>
- BRGM / INFOTERRE : consultation des cartes géologique set de la banque de données du sous-sol : <http://infoterre.brgm.fr/>
- BRGM / PUBLICATIONS : <https://www.brgm.fr/editions/ouvrages-cartes-brgm-editions>
- LÉGIFRANCE : LOIS SUR LES CARRIÈRES : <https://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do?cidTexte=JORFTEXT000000178298&fastPos=1&fastReqId=1053985691&categorieLien=cid&oldAction=rechTexte>
- STB MATÉRIAUX : <http://www.stbmateriaux.fr/engagements-durables/les-engagements.html>

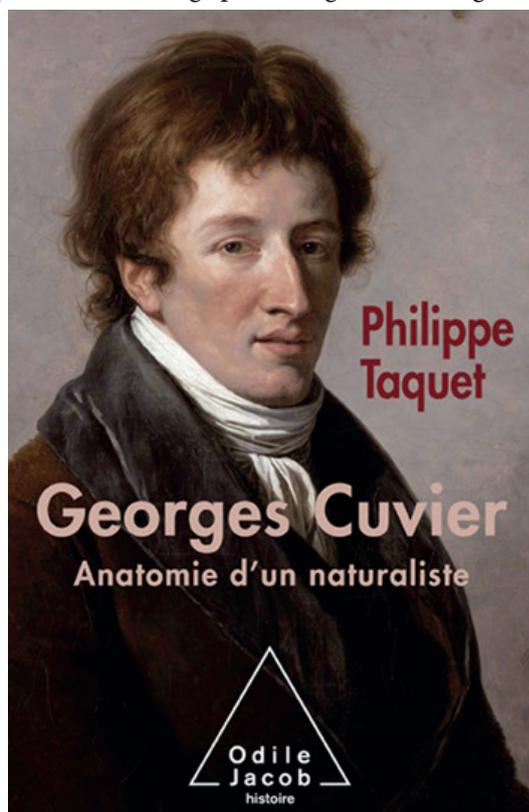
GEORGES CUVIER – ANATOMIE D'UN NATURALISTE, PAR PHILIPPE TAQUET, 2019, ODILE JACOB, 779 P., 16 P. DE PLANCHES, ISBN 978-2-7381-4352-5

par Jessie CUVELIER

UMR 8198 Evo-Eco-Paleo, CNRS & Université de Lille, F-59000 Lille, France
jessie.cuvelier@univ-lille.fr

Cet ouvrage est le deuxième tome d'une trilogie que Philippe Taquet consacre au célèbre anatomiste français Georges Cuvier (1769-1832). Ce savant, issu d'une modeste famille protestante de Montbéliard, est l'un des fondateurs de l'anatomie comparée. Il traverse quatre régimes politiques différents, l'Ancien Régime, la Révolution, l'Empire et la Restauration, au cours desquels il progresse dans sa carrière professionnelle. Aujourd'hui, les œuvres de Cuvier sont reconnues mondialement, en particulier le discours d'introduction à son ouvrage sur les ossements fossiles de quadrupèdes (Cuvier, 1992) où il expose ses idées sur la disparition d'espèces fossiles lors de crises. Récemment, plusieurs œuvres ont été rééditées en version bilingue par le Muséum National d'Histoire Naturelle, en particulier ses cours sur l'histoire des sciences naturelles professés à la fin de sa carrière (Cuvier, 2020 ; Pietsch, 2012, 2015, 2018).

Il y a 22 ans, Philippe Taquet a commencé ses recherches sur Cuvier par la transcription du récit d'une expédition dans les Alpes souabes, rédigé par Georges Cuvier, âgé de 18 ans,



et annoté par des dessins au crayon et à l'aquarelle du savant (Taquet, 1998). Depuis plusieurs années, Philippe Taquet a entrepris la rédaction d'une biographie exhaustive en trois volumes, rendant compte jour après jour des activités de Georges Cuvier (Taquet, 2006a). Le premier tome de cette biographie, *Georges Cuvier : Naissance d'un génie* (Taquet, 2006b), relate la vie de Cuvier depuis sa naissance à Montbéliard en 1769 jusqu'à son départ pour Paris en 1795, soit sa jeunesse et les premières années de sa carrière en tant que précepteur en Normandie (cf. Gaudant, 2006).

Le présent ouvrage constitue le deuxième tome de la trilogie ; il est consacré à l'ascension de Georges Cuvier dans les milieux scientifiques sous la I^{re} République française. Philippe Taquet expose les huit premières années de la carrière scientifique de ce citoyen, de son arrivée à Paris, en mars 1795 jusqu'à sa nomination en tant que secrétaire perpétuel à l'Institut (l'actuel Académie des Sciences) en avril 1803, en 622 pages. Cet ouvrage rend compte également de l'essor d'une communauté de jeunes scientifiques français (Etienne Geoffroy Saint-Hilaire, Alexandre Brongniart, Constant Duméril, Jean Hermann) et étrangers (le professeur hollandais Adriaan Gilles Camper, le médecin allemand Christoph Heinrich Pfaff, les physiciens italiens Giovanni Fabbioni et Alessandro Volta, le naturaliste américain Charles Wilson Peale entre autres). Ce cercle d'amis parisiens, rassemblés autour de Cuvier, ainsi que ses correspondants étrangers vont mettre en lumière les sciences naturelles à cette époque.

L'auteur aborde la situation professionnelle et les recherches scientifiques de l'anatomiste aussi bien que ses relations personnelles, à travers quelques anecdotes. Dès mars 1795, Georges Cuvier devient membre des principales sociétés savantes parisiennes, où il présente ses travaux sur le larynx des oiseaux et la circulation sanguine des vers. Très rapidement, en juillet il est nommé suppléant de Jean-Claude Mertrud, professeur de la chaire d'anatomie des animaux au Muséum. En novembre, Georges Cuvier prononce un discours introductif à ses cours d'anatomie au Muséum. Et lors d'un dîner, Louis Jean-Marie Daubenton décèle déjà le potentiel de ce jeune savant et prévient son ami Etienne Geoffroy Saint-Hilaire du zèle de son collègue en lui offrant un exemplaire de *La Fontaine*, ouvert à la fable de *La Lice et sa compagne* ! En décembre, Cuvier est nommé membre de l'Institut national des sciences et des arts, créé

4 mois auparavant, en août 1795. En avril 1796, il présente un mémoire sur les éléphants fossiles et actuels à la séance publique de l'Institut, donnée au Louvre, et divers travaux aux séances de la Société philomatique et de la Société d'histoire naturelle, de Paris. Le 11 novembre 1797, Cuvier est présent lors de l'élection de Bonaparte à l'Institut. Le mois suivant, il prononce la première des 38 éloges nécrologiques qu'il rédigera tout au long de sa carrière.

Pendant que Etienne Geoffroy Saint-Hilaire consigne dans ses lettres à Cuvier son malheur lors de l'expédition d'Égypte de Napoléon (1798-1802), Georges Cuvier est nommé professeur au Collège de France en janvier 1800, à la mort de Daubenton. À cette époque, il s'intéresse de plus en plus aux fossiles trouvés dans les gypses de Montmartre et entretient une correspondance assidue avec Adriaan Gilles Camper sur le mosasaure de Maastricht. Pour obtenir de l'aide pour son futur ouvrage sur les ossements fossiles de quadrupèdes, Cuvier rédige un manifeste à l'intention de tous où il expose ses objectifs et son projet de recherche. Ce texte intégralement retranscrit est fondamental, en incitant les savants étrangers à envoyer des fossiles à Cuvier. Cette démarche a permis d'enrichir les collections paléontologiques du Muséum National d'Histoire Naturelle. Pour finir, Cuvier est désigné Inspecteur de l'Instruction Publique en juin 1802, fonction qui l'amène à voyager en France, jusqu'à Marseille et Bordeaux où il apprend qu'il devient professeur au Muséum en remplacement de Mertrud, décédé en octobre 1802, et surtout il est élu secrétaire perpétuel de l'Institut, fonction qui l'oblige à retourner à Paris.

En même temps que Philippe Taquet retrace les échelons gravés par Cuvier, le lecteur apprend à connaître l'homme derrière le savant, qui sort fréquemment avec ses amis dans des cafés, n'hésite pas à jouer dans des pièces de théâtre, donne, avec mélancolie, l'autorisation à son frère Frédéric Cuvier de se marier pendant qu'il est attristé par le mariage de la sœur d'Alexandre Brongniart, qu'il apprécie.

Cet ouvrage est l'aboutissement d'une recherche conséquente de livres et d'articles sur le savant, d'un dépouillement méticuleux de comptes rendus, rapports et procès-verbaux de séances et réunions de l'Institut et des sociétés savantes, et un travail remarquable de transcription des correspondances puisque l'auteur s'est appuyé sur des archives de différents pays. L'auteur a également eu accès à des archives redécouvertes de la famille Brongniart. Depuis la publication d'une biographie de cette famille par de Launay (1940), certaines archives avaient disparu jusqu'à ce qu'elles soient retrouvées par les descendants de de Launay et vendues aux enchères au grand étonnement de la famille Brongniart qui avait prêté ces documents à de Launay pour ses recherches (Taquet P., 2009 ; Lejeune P., s.d.) ! Heureusement, ces documents ont été préemptés en 2008 par le Muséum National d'Histoire Naturelle. Cependant, j'ai observé quelques défauts qui freinent la lecture de ce livre. Premièrement, cette édition brochée

est une chronologie détaillée des travaux mais également un recensement exhaustif de la présence de Cuvier aux séances, avec des phrases souvent répétitives qui peuvent décourager certains lecteurs. La majorité des notes indiquent les sources des documents. Néanmoins, certaines sont intéressantes et auraient dû être dans le texte. De plus, il aurait été judicieux de regrouper les notes décrivant brièvement les protagonistes dans une annexe « auteur » classée alphabétiquement, car elles sont redondantes et le lecteur s'y perd. Cela aurait permis de faciliter la lecture. Pour terminer, l'ouvrage propose des planches avec de très belles illustrations, regroupées au milieu ; malheureusement, il n'y a pas d'appel de ces illustrations dans le texte.

Néanmoins, j'ai éprouvé un réel plaisir à lire cet ouvrage, sans pour autant avoir lu le premier tome de la biographie et je le conseille à un public averti, passionné d'histoire des sciences. Il est d'un abord difficile pour les néophytes et nécessite une lecture attentive et du temps, mais c'est une œuvre originale qui nous amène à côtoyer les savants d'une période tourmentée de l'histoire française.

BIBLIOGRAPHIE

- CUVIER G. (1992). — *Recherches sur les ossements fossiles de quadrupèdes : où l'on établit les caractères de plusieurs espèces d'animaux que les révolutions du globe paraissent avoir détruites. Discours préliminaire* (1812). Réédition GF-Flammarion, 189 p.
- CUVIER G. (2020). — *Historical Portrait of the Progress of Ichthyology from Its Origins to Our Own Time / Tableau historique des progrès de l'ichtyologie depuis son origine jusqu'à nos jours (1828-1849)*. Nouvelle édition de PIETSCH T.W., Paris, Muséum national d'Histoire naturelle, 670 p.. Collection Archives n° 29.
- GAUDANT J. (2006). — *Georges Cuvier, naissance d'un génie*, par Philippe Taquet. *Travaux du Comité Français d'Histoire de la Géologie*, 3^e série, 20 : 203-205 ; World Wide Web address: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00907023/document> [consulté le 24/03/2020]
- LAUNAY L. de (1940). — *Une grande famille de savants. Les Brongniart*. G. Rapilly et fils, Paris, 208 p.
- LEJEUNE P. (s.d.). *Le journal retrouvé d'Alexandre Brongniart (1790-1802)*. World Wide Web address: <https://www.autopacte.org/12a%20Le%20journal%20retrouv%E9%20d%27Alexandre%20Brongniart.pdf> [consulté le 24/03/2020]
- PIETSCH T.W. ed. (2012). — *Cuvier's History of the Natural Sciences: twenty-four lessons from Antiquity to the Renaissance / L'histoire des sciences naturelles de Cuvier : vingt-quatre leçons de l'Antiquité à la Renaissance*. Paris, Muséum national d'Histoire naturelle, 734 p.. Collection Archives n° 16.
- PIETSCH T.W. ed. (2015). — *Cuvier's History of the Natural Sciences: nineteen lessons on the Sixteenth and Seventeenth Centuries / L'histoire des sciences naturelles de Cuvier : dix-neuf*

leçons sur les seizième et dix-septième siècles. Paris, Muséum national d'Histoire naturelle, 859 p.. Collection Archives n° 20.

PIETSCH T.W. ed. (2018). — *Cuvier's History of the Natural Sciences: twenty lessons from the first half of the Eighteenth Century / L'histoire des sciences naturelles de Cuvier : vingt leçons sur la première moitié du dix-huitième siècle*. Paris, Muséum national d'Histoire naturelle, 576 p.. Collection Archives n° 26.

TAQUET P. (1998). — Les premiers pas d'un naturaliste sur les sentiers du Wurtemberg : récit inédit d'un jeune étudiant nommé Georges Cuvier. *Geodiversitas*, **20** (2) : 285-318.

TAQUET P. (2006a). — Les années de jeunesse de Georges Cuvier. *Bulletin de la Société d'émulation de Montbéliard*,

129 : 215-224 ; World Wide Web address: <http://www.montbeliard-emulation.fr/documents/pdf/bulletin34.pdf?PHPSESSID=3efe14e6c26b963c20e11daecb2ced01> [consulté le 24/03/2020]

TAQUET P. (2006b). — *Georges Cuvier : Naissance d'un génie*. Odile Jacob, Paris, 539 p.

TAQUET P. (2009). — Les contributions respectives de Georges Cuvier et d'Alexandre Brongniart à l'élaboration de l'Essai sur la géographie minéralogique des environs de Paris, d'après les manuscrits retrouvés d'Alexandre Brongniart. *Travaux du Comité Français d'Histoire de la Géologie*, 3^e série, **23** : 1-16 ; World Wide Web address: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00911668v2/document> [consulté le 24/03/2020]

LA MINE EN FRANCE, HISTOIRE INDUSTRIELLE ET SOCIALE

Ouvrage collectif sous l'égide de l'Agence Nationale pour la Garantie des Droits des Mineurs (ANGDM), 2019, Serge Domini Éditeur, ISBN : 978-2-35475-131-9

par Francis MEILLIEZ

Université de Lille, Faculté des sciences et technologies, UMR 8187 LOG /CNRS/ULCO, bâtiment SN5 (Sciences de la Terre),
F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex

Cet ouvrage, très bien illustré, en est à sa quatrième édition d'un survol de l'ensemble du secteur minier en France, hors hydrocarbures. Limité à 248 pages, auxquelles ont collaboré 36 contributeurs, il est très bien venu dans les départements du Nord et du Pas-de-Calais où l'exploitation charbonnière a tant marqué les paysages, les populations et la culture régionale que l'on y concevait difficilement d'autres types de mine que la houille. Son ambition est de couvrir l'histoire minière des 250 dernières années. Toutes les sources sont bien indiquées. L'ouvrage est divisé en 7 parties : les activités minières et les entreprises (81 pages) ; les techniques minières (22 pages) ; la sécurité (18 pages) ; l'Après-Mine (20 pages) ; la mémoire de la mine (20 pages) ; la mine en France aujourd'hui et demain (10 pages). Le Code Minier distingue les substances dont l'exploitation relève de la mine (enjeu stratégique justifiant la prévalence de l'État) de celles qui relèvent du droit des carrières. Seule la mine est concernée ici. Le Code Minier ayant beaucoup évolué depuis 1970, on sent bien que les avis ne sont pas unanimes sur les bienfaits d'une évolution qui s'avère tellement contraignante que la France s'expose au risque d'être entièrement dépendante de l'étranger pour sa fourniture en matières premières minérales de type minier. Mais par ailleurs les géologues savent bien que si les aléas de l'évolution géologique ont dispersé des gisements nombreux et variés sur le territoire français, aucun n'a jamais été en capacité d'assurer l'autonomie nécessaire au pays. L'ouvrage contribue à ce débat à fleurets mouchetés. La conscience de l'empreinte environnementale de chaque exploitation est relativement récente hors de quelques cas particulièrement sévères. La prise de conscience est réelle, certains auteurs sont même tiraillés. Mais personne n'aborde vraiment la question de fond : quelle société voulons-nous ? Et avec quelles pratiques par rapport à la consommation de matières primaires ? Il est vrai que ce n'était pas le sujet du livre.

Les exposés sur les techniques sont certes brefs, mais laissent entrevoir que vouloir exporter d'un gisement à l'autre un modèle économique unique a contribué à étouffer des exploitations pouvant répondre à des besoins locaux sans

prétention à alourdir les investissements imposés par ce modèle unique. Les pages sur la sécurité attestent d'efforts réels, mais toujours en retard sur l'événement. Certes, on ne traite les accidents qu'après coup, et il est facile de stigmatiser aujourd'hui. Mais ces expériences montrent bien la nécessité d'anticiper mieux l'exploitation d'une matière première. Ce qui ramène à la question du besoin : faut-il absolument trouver un gisement pour produire un matériau, ou faut-il réfléchir au fondement de ce qui apparaît au premier abord dans notre société comme une impérieuse nécessité ?

Les pages sur l'après-mine sont très révélatrices du sentiment que le lecteur peut qualifier d'inachevé, de gâchis, de préservation, voire de sauvetage, selon sa sensibilité. Toutes bien écrites – ce qui n'est pas facile dans un format réduit – la tentation est d'évaluer la qualité du traitement d'après-mine au taux de ré-industrialisation des territoires. C'est une vue réaliste, mais de court terme (moins d'un siècle). Toutes les migrations historiques sont d'abord des mouvements d'adaptation à la recherche de ressources plus satisfaisantes. Dans la « vieille Europe », la mobilité du chasseur-cueilleur a disparu. Plus les sociétés se sont enracinées sur un territoire, plus il leur est difficile de penser que, rationnellement, une matière première minérale n'est pas renouvelable, et que le terme de son exploitation est inéluctable. Ce constat ne résout en rien les problèmes réels immédiats, c'est évident. Les incidences à long terme (au-delà du siècle) sont d'un autre ordre. On ne fait pas des trous impunément ! Qu'ils soient aériens ou souterrains, tous les trous ont déstabilisé les terrains alentours, et modifié les circulations de l'eau. Mais les processus géologiques ne se manifestent pas sur l'instant ; ils prennent leur temps. Et il est vrai que ce ne sont pas les compagnies minières qui ont étendu les espaces urbains au-dessus de cavités souterraines ou en aval de haldes qui, par définition, sont à limite de stabilité. Faut-il rappeler l'accident de 1979 survenu au Pays de Galles ? Mais cette question n'est pas non plus le sujet du livre.



Fig. 1 – Vue sur la Fosse 9-9bis et les cités minières d'Oignies (62) depuis le sommet du terril 110. Le tout repose sur la craie du Crétacé supérieur. Au fond les tours de l'ancienne sucrerie de Thumeries, sur les dépôts sableux yprésiens qui culminent à 100 m à Mons-en-Pévèle. En second plan le terril d'Ostricourt (T108) et un peu plus loin le terril de Leforest (T122). Cliché F. Meilliez (2008).

Fig. 1 — Panoramic view over the 9-9bis Oignies (62) coal mine from top of the 110 heap. As a bulk this colliery lies over Upper Cretaceous chalk. In the bottom point towers from an ancient sugar factory (Thumeries). They lie over Ypresian sands which form the Mons-en-Pévèle hill (top over 100 m in altitude). In the background is the Ostricourt heap (T108), and a little further the Leforest heap (T122). Photograph by F. Meilliez (2008).

La découverte de la richesse patrimoniale est également très bien évoquée et illustrée. Qu'il s'agisse des sites, des matériels, des productions culturelles. Certes le bassin minier du Nord – Pas-de-Calais a su « jouer de grandes partitions » (mise en place pionnière du Centre Historique Minier de Lewarde, classement au patrimoine mondial de l'UNESCO en tant que « paysage culturel évolutif »), mais de nombreux sites parsèment la France qui témoignent d'une époque et d'une culture locale associée. Tous méritent d'être valorisés. Peut-être faudrait-il imaginer des circuits qualifiés « culture industrielle » à l'échelle des régions.

Enfin évoquer la nécessité d'un avenir minier sur le territoire français était une entreprise qui n'est certes pas

dans l'air du temps, mais qui est une nécessité sur laquelle il faut réfléchir. Mais pour cela il y a un très gros chantier à organiser pour mettre à portée du citoyen les outils qui lui permettront de comprendre les questions évoquées plus haut et de réfléchir à des solutions où l'intérêt général sera pris en compte. L'illustration « schématique de la place dans notre vie quotidienne des minéraux et des roches de notre sous-sol » (pages 238 et 239) devrait être affichée dans toutes les écoles primaires, comme support de discussion.

En résumé, un ouvrage abondamment illustré, bien écrit et divers dans les points de vue abordés, utile pour se faire une réelle vision du domaine minier (hors hydrocarbures) en France.

JEAN RICOUR (1921-2019)

par Alain BLIECK

38 Rue Paul Doumer, 59320 Haubourdin
alain.blieck@yahoo.fr

& Paul BROQUET

37 Rue Danton, 25000 Besançon
paul.broquet@wanadoo.fr

L'HOMME

Fils d'une institutrice et d'un voyageur de commerce, Jean Ricour est né à Lille le 7 octobre 1921. Son ascendance est flamande, belge par sa grand'mère maternelle et française par sa grand'mère paternelle. Il fait ses études à Lille, au lycée Faidherbe et à la Faculté des sciences. Licencié ès-sciences, il sera brièvement professeur en classe de 5^e au collège de Béthune à l'automne 1941. Jean Ricour a eu quatre enfants : Jean-Émile antiquaire, Madeleine professeure émérite de l'Université de Paris, Aline ingénieure géophysicienne à l'Institut français du pétrole et Jean-Michel médecin. Il a 7 petits-enfants et 7 arrière-petits-enfants. Il a la douleur, en 2010, de perdre sa fille Aline à laquelle des professions voisines le liaient particulièrement. Il avait fait don de son corps à la Science.

Jean Ricour a toujours été très actif même en dehors de ses activités professionnelles. Lorsqu'il est en classe de quatrième il construit un canoë en bois et toile qui survécut en Mer du Nord jusqu'à la guerre. La bicyclette ne l'effraye pas car il s'est bien entraîné sur les pavés du Nord. C'est ainsi que l'armistice de 1940 le surprend à Cahors qu'il a gagné par ce moyen de locomotion pour fuir l'invasion allemande avant de prendre le chemin du retour vers Lille. Son métier lui permit de visiter de nombreux pays, du Spitzberg à la Guyane en passant par la Chine. Passionné de voile, il visite toutes les îles de la Méditerranée, à l'exception des Sporades et des Columbrettes. En 1987 il fait une traversée de l'Atlantique à la voile et visite les Antilles : Saba, Saint-Martin, Saint-Barthélémy, Saint Kitts, Tintamare, Saint Eustache, Anguilla, Prickly, le Banc d'argent. En 1991 il s'initie au parapente, en 2000 il fait le tour du monde aérien et passe à l'île de Pâques qu'il désirait visiter depuis longtemps.

D'un caractère optimiste, il fut professionnellement heureux : d'avoir vu grandir le BRGG dont il était, lors de son embauche, le dixième élément ; d'avoir vu éclore une théorie comme la tectonique des plaques succédant à celle de la dérive des continents ; d'avoir vu l'utilité de la géologie mieux comprise du grand public...

CARRIÈRE PROFESSIONNELLE

De mars à juillet 1942, c'est comme préparateur de minéralogie qu'il entre dans la vie professionnelle sous la houlette de Pierre Pruvost, doyen de la Faculté des sciences de Lille.

Après son mariage en 1942, il gagne Paris où il est nommé assistant à l'Institut de paléontologie humaine d'août 1942 à février 1943. Il intègre l'année suivante le Bureau de recherches géologiques et géophysiques (BRGG), organisme qu'il ne quittera plus. Pour préparer sa thèse de doctorat d'état, une bourse de recherche du Centre National de la Recherche Scientifique lui est attribuée de 1943 à 1953. Dès son arrivée au BRGG (devenu BRGGM en 1953 puis BRGM en 1959), grâce à une étude des mines de houille du Keuper des Vosges rouvertes sous l'Occupation, il prend contact avec le Trias de Lorraine sous la direction de Louis Guillaume, ingénieur en chef du BRGG. Il échappe au Service du Travail Obligatoire (STO) en Allemagne grâce à une affectation de mineur de fond en France. Durant l'occupation, avec la complicité de Louis Guillaume, il introduit, comme ingénieurs dûment engagés au BRGG, des agents de la France Libre qui peuvent ainsi effectuer leur mission sous une couverture officielle. L'un d'eux, M. Cabois, sous le pseudonyme de Collinet, peut même visiter, piloté par un Allemand, les installations dont il doit transmettre le soir même les coordonnées à Londres. Cet agent fait d'ailleurs son chemin puisqu'on le retrouve en 1967 à l'ambassade de France à Washington, puis ambassadeur en Libye et même administrateur du BRGM.

Après la guerre, Jean Ricour est chargé, au titre du Code Minier, de la région des Alpes où il prend contact avec les grands travaux de barrage d'EDF. Il poursuit ensuite, avec Georges Lienhardt, la reconnaissance du bassin houiller de Lons-le-Saunier en liaison avec Charbonnages de France. Il doit, à cette occasion, s'initier aux techniques de sondage en carottage continu. Il crée par la suite, avec Georges Lienhardt et Jean Deroubaix le service sondages du BRGM. Entre 1952 et 1957, il publie de nombreux rapports de fin de sondage avec G. Lienhardt, A. Lefavrais, A. Bonte et Ch. Greber. C'est ainsi qu'il contribue avec l'équipe du BRGG et grâce aux sondages implantés sur le bassin houiller du Jura à démontrer le chevauchement, au Pontien, des terrains secondaires du Jura sur le Tertiaire de la Bresse avec un minimum de 7 km de recouvrement anormal (voir sa liste de publications ci-dessous : Lefavrais-Raymond *et al.*, 1957 ; le Pontien était une subdivision stratigraphique du Miocène terminal de la Parathétys, équivalent du Messinien). En 1955, en bon disciple de Louis Guillaume et d'Antoine Bonte, il souligne l'importance de la recherche de l'eau en France et le rôle que le BRGM

peut jouer en ce domaine. Dans les années 1960, il garde un contact permanent avec le Laboratoire de Géologie Appliquée de Lille où il rencontre très régulièrement le Professeur A. Bonte. C'est d'ailleurs à cette époque (1959-1960) que dans le cadre d'un Diplôme d'Études Supérieures, l'un de nous (PB) réalise en collaboration avec l'antenne de Douai du BRGM l'inventaire des ressources hydrauliques d'une partie du Douaisis, contribuant à la première cartographie piézométrique de la nappe de la craie ainsi qu'à l'estimation des potentialités de cette nappe (Broquet, 1961).

À l'époque du macarthysme, l'appartenance politique de J. Ricour provoque un brusque freinage de sa carrière et il lui est demandé de quitter le BRGM. Mais il ne se décourage pas. Avec le soutien efficace d'Henri Nicolas et de Claude Beaumont, il ne quitte pas le BRGM et crée le service d'Inventaire des ressources hydrauliques des départements du Nord et du Pas-de Calais, ébauche du réseau des services géologiques régionaux du BRGM. Muté à Orléans en 1967, il est nommé adjoint de Claude Guillemin, directeur du Service géologique national. Ils lancent ensemble le BRGM dans la géothermie. Jean Ricour est ensuite chargé de créer une Direction des relations extérieures dont il assure la charge. Il participe ès qualités au Congrès géologique international de Paris en 1980. Ayant été par la suite nommé conseiller du Directeur général chargé des pays méditerranéens, il s'estime trop éloigné du terrain et demande, en 1984, à "retourner au charbon". C'est ainsi qu'il termine sa carrière à Marseille comme Directeur de la division Sud-Est du BRGM qui couvre tout le littoral méditerranéen, y compris la Corse ainsi que l'Auvergne et la Région Rhône-Alpes. Ayant ainsi gagné la Provence, ce qu'il convoitait de longue date, il l'adopte, ne la quitte plus et y prend sa retraite en 1985.

CARRIÈRE SCIENTIFIQUE

Jean Ricour est l'auteur de plus de cent communications scientifiques. Il a soutenu en Sorbonne en 1962 une thèse de doctorat d'État réalisée sous la direction de son maître Pierre Pruvost et intitulée "*Contribution à une révision du Trias français*". Il bouleverse à cette occasion bien des idées admises par le maître de la stratigraphie de l'époque, Maurice Gignoux. Grâce aux forages profonds effectués par les pétroliers dans le Bassin de Paris, il démontre que le Trias, considéré jusque-là comme régressif, y est transgressif et que les évaporites ne peuvent par conséquent être le résultat d'une régression et d'un dessèchement de la mer sur place. Il insiste aussi sur le fait que la couleur rouge n'est pas caractéristique des dépôts désertiques et que les influences marines sont dominantes dans le Trias. Il s'intéresse aussi à la formation des cargneules et des dépôts évaporitiques. Il trouve dans les gypses de la zone interne des Alpes des végétaux identiques à ceux du Keuper de Lorraine, ce qui anéantit l'hypothèse d'une chaîne dite "Vindélicienne" séparant les deux régions. Ce travail de

thèse vaut à Jean Ricour d'être inscrit sur la « Liste d'aptitude à l'Enseignement supérieur », possibilité dont il n'a jamais fait usage malgré plusieurs offres.



Fig. 1. Jean Ricour en septembre 2019 sur la terrasse de sa maison de retraite à Leucate dans l'Aude. Photo par Mme Madeleine Ricour Bonnet.
Fig. 1. Jean Ricour in September 2019, on the terrace of his retirement home in Leucate, Aude, France. Photograph by Mrs Madeleine Ricour Bonnet.

Jean Ricour rédige aussi de nombreux rapports internes du BRGM ayant trait à des disciplines diverses. Il a animé, au sein des éditions du BRGM, une série intitulée « *Découverte géologique de...* » telle ou telle région de France qui comporte dix volumes, le dernier concernant la région de Marseille. Il est aussi coauteur d'un volume intitulé « *Terroirs et thermalisme de France* » (1992, éditions du BRGM) [voir la liste de ses publications ci-dessous].

Sa curiosité scientifique l'a toujours attiré vers les théories nouvelles. C'est ainsi qu'en 1941, en cours de géographie de 5^e au collège de Béthune, il parle de la dérive des continents à des fils d'ouvriers mineurs subjugués. Jean Ricour est aussi très attiré par deux grands géologues novateurs : Jacques Bourcart, inventeur de la notion de marge continentale, et Louis Glangeaud, découvreur des diapirs d'évaporites en Méditerranée. Ces deux savants feront partie de son jury de thèse avec Pierre Routhier et Louis Barrabé.

Disciple de Pierre Pruvost, Jean Ricour respecte les Anciens sans toutefois prendre leurs écrits pour des dogmes. Pierre Pruvost poussait ses élèves à la critique, mais les avertissait sportivement que s'ils avaient tort, ils lui payeraient à boire. L'inverse était vrai. Lorsque Jean Ricour a l'occasion d'avoir des élèves, à l'École du Génie Rural comme chef de travaux pratiques d'hydrogéologie, puis à la Faculté de Médecine de Marseille comme chargé de cours d'hydrologie thermique, il ne

manque jamais de citer la parole de Claude Bernard évoquant la relation entre anciens et modernes : « *nous sommes des pygmées et ils sont des géants mais, montés sur leurs épaules, nous voyons plus loin qu'eux* » [N.B.- La métaphore "Des nains sur des épaules de géants" semble remonter au Moyen-Âge, elle a été utilisée au fil des siècles par divers scientifiques : https://fr.wikipedia.org/wiki/Des_nains_sur_des_épaules_de_géants]. Après son départ à la retraite, il applique le même esprit scientifique à tout ce qui l'entoure et ses observations ne sont pas toujours bien ressenties.

Jean Ricour fut lauréat du Prix Gosselet de la Société des Sciences, de l'Agriculture et des Arts de Lille (SSAAL) en 1943, et lauréat du Prix Pruvost de la Société Géologique de France en 1961. Il fut président de la Société Géologique du Nord en 1960, et président de la Société Géologique de France en 1974. Il a été durant vingt ans, de 1967 à 1988, membre du Conseil supérieur d'hygiène publique de France (section eau) et, pendant quatre ans, de 1983 à 1986, membre du Haut Comité du thermalisme et du climatisme. Il a été chef de travaux pratiques de géologie générale et géologie appliquée

à l'École du Génie Rural de 1958 à 1962 (tout en restant attaché au BRGM) et, après son départ à la retraite, de 1985 à 1987, chargé de cours d'hydrologie thermique à la Faculté de médecine de Marseille. En 1983, Jean Ricour est nommé Officier dans l'Ordre National du Mérite par François Mitterrand. Consultant indépendant après 1985, il est chargé, en France et à l'étranger, d'expertiser et de mener à bien des projets dans le domaine de l'aménagement des eaux et plus particulièrement des eaux minérales. En 1996, il est le premier lauréat du prix Castany de l'Association internationale des hydrogéologues. En 2001 il effectue, pour la Société des eaux de Marseille, un audit sur l'alimentation en eau souterraine de la ville d'Alger.

Jean Ricour est décédé paisiblement à Leucate le 14 octobre 2019 à l'âge de quatre-vingt-dix-huit ans.

Remerciements.

La présente notice a été rédigée en grande partie à partir de documents transmis par Jean Ricour lui-même en 2013 ainsi que par Mme Madeleine Ricour Bonnet, sa fille, que nous remercions chaleureusement.

RÉFÉRENCE CITÉE

BROQUET P. (1961). — *Inventaire des ressources hydrauliques des départements du Nord et du Pas-de-Calais*. Feuille topographique au 1/20 000 de Douai (n° 27, coupures 5 et 6). BRGM édit., rapport n°A-1 788-40 (15 mars 1961) : 29 pages, 10 fig., 4 tabl.

PUBLICATIONS DE JEAN RICOUR

J. Ricour est l'auteur de plus de cent publications dont voici les titres les plus significatifs (extrait du *Mémoire XVII* de la SGN, 2014, p. 107-108)

LEFAVRAIS-RAYMOND A., LIENHARDT G., MONOMAKHOFF C. & RICOUR J. (1957). — Données nouvelles sur le chevauchement de la bordure du Jura sur la Bresse dans la région de Lons-le-Saunier (Jura). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, sér. 6, **VII** : 1157-1166.

RICOUR J. (1962). — *Contribution à une révision du Trias français*. Thèse de doctorat. *Mémoire pour servir à l'explication de la Carte géologique de la France*. Imprimerie nationale : 471 p. 122 fig., 32 pl.

RICOUR J. en collaboration avec BONTE A., LAVEINE J.-P., LEPLAT J. & SOULIEZ G. (1987). — *Découverte géologique du Nord de la France*. Éditions du BRGM : 65 p., 93 fig.

POMEROL C. & RICOUR J. dir. (1992). — *Terroirs et thermalisme de France*. Éditions du BRGM : 288 p.

GUIEU G., RICOUR J. & ROUIRE J. avec la collaboration de PHILIP J. & MONTEAU R. (2008). — *Découverte géologique de Marseille et de son environnement montagneux*. Deuxième édition revue et complétée. Éditions Jeanne Laffitte et BRGM : 243 p., 230 fig.

Publications aux *Annales de la SGN*

BONTE A. & RICOUR J. (1948). — Contribution à la stratigraphie du Givétien. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXVIII** : 25-36.

RICOUR J. (1948). — Le gisement quaternaire de la carrière Ruquier à Oissel (Seine-inférieure). *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXVIII** (3) : 196.

BONTE A. & RICOUR J. (1950). — À propos de la limite Givétien-Frasnien. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXX** (1) : 159.

MINOUX G., RICOUR J. & WATERLOT G. (1958). — Le nouveau forage effectué à l'Établissement thermal de Saint-Amand-les-eaux en 1954. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXXVII** (3) : 219.

CLUSEAU R. & RICOUR J. (1960). — Recherche de griffons d'alimentation des étangs de Lécluse et Ecourt-Saint-Quentin (Pas-de-Calais) par mesures thermométriques. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXXX** (2) : 87-90.

LEROUX E., RICOUR J. & WATERLOT G. (1960). — La surface piézométrique de la nappe de la craie du Nord de la France, ses variations naturelles et artificielles. Les diverses zones de perméabilité. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXXX** (4) : 234-240.

RICOUR J. (1960). — Projet de construction d'un lysimètre de vastes dimensions dans la craie du Nord de la France. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXXX** (4) : 275-276.

MARGAT J. & RICOUR J. (1962). — Présentation des maquettes d'une carte hydrogéologique à 1/50.000 : Feuille de Douai. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXXXII** (3) : 149-153.

DASSONVILLE G. & RICOUR J. (1963). — Interprétation des essais de débit appliquée à la localisation des venues d'eau dans un captage à la craie. *Ann. Soc. Géol. Nord*, **LXXXIII** (1) : 57-60.

RICOUR J. (1970). — Contribution des sciences de la Terre aux études sur l'"environnement". *Ann. Soc. Géol. Nord*, **XC** (4) : 421-427.

BRUNO MISTIAEN (1946-2019)

par Denise BRICE

14 rue Yves Decugis, 59650 Villeneuve d'Ascq
dbrice@orange.fr

& Alain BLIECK

38 rue Paul Doumer, 59320 Haubourdin
alain.blieck@yahoo.fr

JEUNESSE ET FORMATION

Bruno Mistiaen est né le 1er mai 1946 à La Chapelle d'Armentières (Nord) dans la maison familiale où il aura passé toute sa vie. Pour avoir bien connu Bruno, nous voyons dans le fait qu'il est né le jour de la Fête du travail comme un symbole. L'un de ses traits de comportement était sa très grande capacité de travail, dans le calme et dans la durée. Son père, Georges Mistiaen (1901-1975), vendait du tissu, chez lui dans la maison de La Chapelle d'Armentières, en faisant du porte à porte et sur les marchés. Sa mère, née Jeanne Legrain (1912-1999), faisait les marchés avec son mari. Tous deux étaient originaires d'Armentières. Ils ont eu deux enfants, Bruno et une fille, Marie-Edith, d'un an et demi sa cadette (née en 1947).

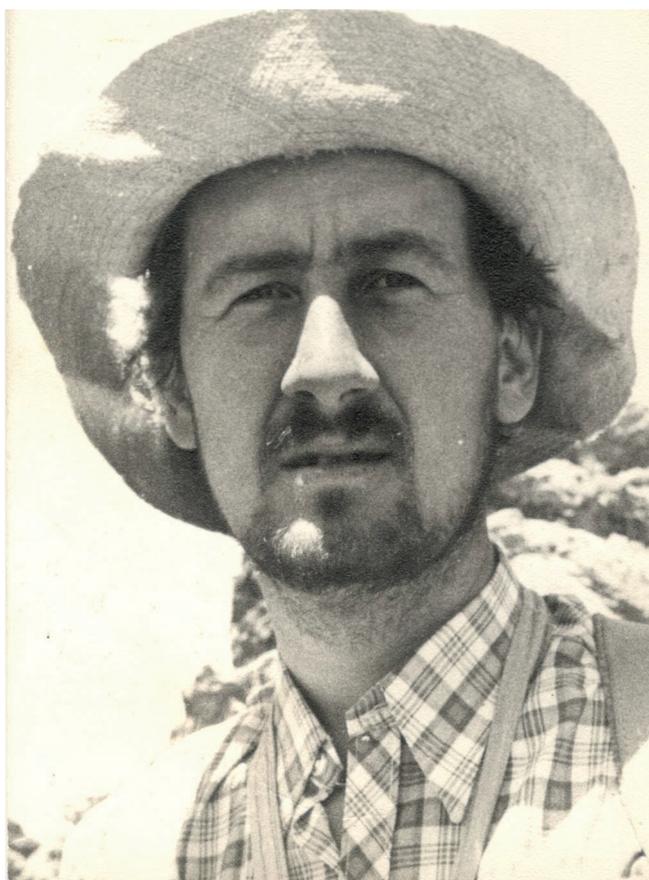


Fig. 1. Bruno Mistiaen dans les années 1970, lors d'une de ses missions de terrain. Photo aimablement transmise par Marie-Edith Mistiaen, sa sœur.

Fig. 1. Bruno Mistiaen in the 1970s, during one of his field expeditions. Photograph kindly provided by Marie-Edith Mistiaen, his sister.

Bruno est allé à l'école primaire de garçons Saint Edouard à Armentières jusqu'au Certificat d'études primaires élémentaires, communément appelé "Certificat d'études". Il est entré en classe de 6^e au lycée Saint Jude d'Armentières (à une époque où le lycée correspondait à l'ensemble de l'enseignement du second degré, aujourd'hui l'Institut catholique Saint Jude) jusqu'en classe de terminale où il a obtenu le baccalauréat en sciences expérimentales ("Sciences Ex") en 1966. Bruno, dans le rôle du grand frère, a eu une enfance heureuse, véritablement "cuvé" par sa mère. Il avait investi le jardin de la maison familiale où il fit ses premiers pas de naturaliste. Déjà très attiré par les sciences naturelles (plantes, insectes, roches), il se destinait à être soit missionnaire soit explorateur. Adolescent, tous les matins, il partait courir dans la campagne environnante, ce qui lui a certainement fourni une excellente forme physique. Après la messe du dimanche, il partait avec sa famille au bord de la mer, à Sangatte en particulier, pour y ramasser des « cailloux ». Avant que sa vocation de géologue ne se concrétise, il était volontiers zoologiste. C'est ainsi qu'il avait récupéré dans une ferme la carcasse d'un veau qu'il a dépecé et dont il a reconstitué le squelette. Cette passion précoce pour la zoologie l'amènera, des années plus tard, à ramener de Chine un serpent vivant !

Bruno Mistiaen est entré à la Faculté libre des sciences de l'Université catholique de Lille, souvent dénommée "la Catho", en 1967 pour suivre en deux ans le Diplôme universitaire d'études supérieures (D.U.E.S.) obtenu en 1969. Puis il est allé à l'Université des sciences et technologies de Lille (USTL ou Université Lille 1) suivre la Maîtrise de géologie, obtenue en 1971 (Certificats de Pétrologie et de Géologie historique en 1969-1970, Certificats de Géologie appliquée et de Géologie structurale en 1970-1971). C'est pendant ces deux années que l'un de nous deux (AB) a partagé avec Bruno la vie heureuse d'étudiant en géologie. Ensuite nos routes ont divergé. Bruno fit son service militaire en Allemagne en 1972, puis, de retour à Lille, obtenait le D.E.A. de Géologie de l'USTL en 1973, avec pour sujet « Contribution à l'étude des stromatopores du Calcaire de Blacourt (Givétien de Ferques. Boulonnais) » [les stromatopores sont des organismes marins constructeurs de récifs (appartenant vraisemblablement à des éponges), très développés au Paléozoïque, actuellement disparus]. Bruno Mistiaen était un paléontologue de terrain, ses zones de prédilection étant le Boulonnais, le Massif ardennais (y compris l'Avesnois) et l'Afghanistan. Pour ses travaux de thèse de

doctorat, dès 1973, Bruno accompagna en Afghanistan le Professeur Albert de Lapparent dans le cadre de la RCP 44 du CNRS (Recherche Coordonnée sur Programme). Cette première mission dans les Montagnes centrales d'Afghanistan fut suivie de trois autres missions de trois mois en 1975, 1976 et 1978, dans le cadre d'une Mission permanente du CNRS, missions interrompues par l'invasion soviétique de 1979 ; elles étaient consacrées essentiellement aux stromatopores. En 1973, il était accompagné et aidé par l'abbé Claude Heddebaut, enseignant-chercheur à la Catho de Lille, habitué à des récoltes de fossiles dans les montagnes des Pyrénées ; au cours de cette mission, il a contracté le paludisme (endémique en Afghanistan, ce dont il n'avait pas été informé) et il en est décédé à 48 ans. En 1973 et 1975, l'une de nous deux (DB) a accompagné Bruno en Afghanistan. En 1978, le second auteur de la présente notice (AB) l'a accompagné pendant deux semaines dans les Montagnes centrales, à la recherche de vertébrés dévoniens, où il a pu constater l'excellente forme physique dont faisait preuve Bruno qui, chaque soir, revenait à la jeep avec un sac à dos de plusieurs dizaines de kilos. Le matériel fossile récolté a été le sujet de ses deux thèses de doctorat : en 1976, la thèse de doctorat de 3^e cycle de l'USTL intitulée « *Stromatopores du Dévonien de Ferques* » ; puis en 1985, la thèse de doctorat d'état de l'USTL intitulée « *Phénomènes récifaux dans le Dévonien d'Afghanistan (Montagnes Centrales). Analyse et systématique des stromatopores* ». À la fin de sa carrière universitaire, l'aspect de vieux sage à la longue barbe grisonnante qu'il affichait (Fig. 2) lui valut le surnom affectueux d'ayatollah, en référence à ses années afghanes.

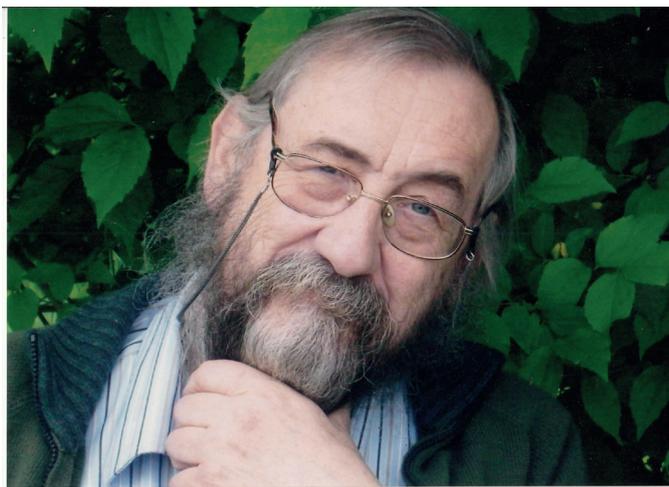


Fig. 2. Bruno Mistiaen le jour de son 62^e anniversaire, en mai 2008, à Wambrechies (Nord). Photo de sa sœur Marie-Edith Mistiaen.
 Fig. 2. Bruno Mistiaen on his 62nd birthday, in May 2008, Wambrechies (Nord, France). Photograph by his sister Marie-Edith Mistiaen.

CARRIÈRE ACADÉMIQUE

Après une année comme assistant délégué à l'Université de Picardie (Amiens), c'est en 1975 que Bruno Mistiaen a

véritablement entamé sa carrière universitaire en entrant comme enseignant-chercheur à la Faculté libre des sciences (F.L.S.) de la Catho de Lille puis à l'Institut Supérieur d'Agriculture (I.S.A.). Il aura été successivement Chargé d'enseignement, Chargé de cours, Maître de conférences, Professeur suppléant et enfin Professeur titulaire en Sciences de la Terre à la F.L.S. Il a enseigné des cours et travaux pratiques dans les domaines de la géologie (cartographie, pétrologie, pédologie) et de l'entomologie, avec en particulier un cours sur les insectes ravageurs. Il a encadré une foultitude d'étudiants sur le terrain, tant en géologie qu'en entomologie, dont il était très apprécié et à qui il a transmis sa passion des sciences naturelles dans une ambiance détendue. Bruno était volontiers blagueur, il n'hésitait pas à "faire le clown". Lors des descriptions de sols sur le terrain à Ambleteuse, il avait l'habitude de façonner sa « tête » avec de l'argile et des herbes pour amuser les étudiants. Il arborait la plupart du temps un sourire entendu qui le rendait si sympathique à ses étudiants et ses collègues. Véritable boute-en-train, il aimait tout particulièrement interpréter les chansons de Jacques Brel et « la jeune fille du métro » où il imitait successivement à chaque refrain Brel, Brassens et même Renaud.

Bruno Mistiaen a exercé plusieurs fonctions d'administration de l'enseignement à l'ISA : responsabilité et animation des semaines agronomiques de 1^{re} année (à partir de 1977), responsabilité des stages de première et troisième année (1977-1980), responsabilité de l'alternance professionnelle (1977-1978), responsabilité et animation du secteur des sciences de la Terre (1977-1992), gestion des contrats de pédologie (1979-1992), et enfin responsabilité du département Environnement et Aménagements (1992-2003). Il a également assuré la préparation et l'animation de sessions de formation en géologie pour les professeurs de sciences naturelles de l'Enseignement secondaire (1977 : Pays de Bray ; 1979 : Bretagne ; 1981 : géomorphologie du Nord de la France ; 1983 : récifs dévoniens en Ardenne belge et française ; 1985 : Pyrénées ; 1987 : Vosges ; 1989 : Normandie ; 1991 : Boulonnais ; 1993 : Corbières, Mouthoumet ; 1995 : Bretagne ; 1997 : Vosges ; 1999 : Ardenne). Il a enseigné en Master 2^e année de l'USTL dans le cadre de l'ancien DEA "BEFA" (Biodiversité et environnements fossiles et actuels). Bruno était également engagé dans des activités associatives, en particulier à la Société Géologique du Nord (SGN) dont il était membre depuis son année de maîtrise de géologie en 1970-1971, au moment du centenaire de la société. Il fut conseiller SGN pendant de nombreuses années, jusqu'à en devenir le second vice-président en 1994 et le premier vice-président en 2010-2012. Il était également membre du Conseil Scientifique de l'Environnement du Nord - Pas-de-Calais, du Conservatoire des sites naturels du Nord - Pas-de-Calais, du Comité Français de Stratigraphie et de la Commission régionale du patrimoine géologique (C.R.P.G.) depuis 2013. Au niveau international, il fut membre de la Subcommission on Devonian Stratigraphy

(SD), de l'International Commission of Stratigraphy (I.C.S., l'une des commissions de l'International Union of Geological Sciences ou I.U.G.S.), et de l'International Association for Study of Fossil Cnidaria and Porifera (IASFCP).

Après sa période afghane, Bruno Mistiaen a étudié seul ou plus souvent en collaboration, des stromatopores et d'autres organismes fossiles (coraux tabulés, vers) provenant de nombreuses régions du monde, confiés par des collègues étrangers ou prélevés au cours de ses nombreuses missions scientifiques en Europe, Iran, Mongolie, Chine, Australie, Pakistan, Vietnam, Maroc, effectuées dans le cadre d'unités de recherche du CNRS (GRECO 007 de 1976 à 1988, URA 1365 de 1989 à 1997, UPRESA 8014 de 1998 à 2001) et du Programme international de corrélation géologique de l'UNESCO (PICG 421 puis 499). Bruno a encadré ou co-encadré plusieurs mémoires de recherche (diplômes et thèses de doctorat) : thèse de doctorat de l'USTL de Francis Douay soutenue en 1993 (pédologie et formations superficielles de Flandre intérieure), thèse de doctorat de l'Université Libre de Bruxelles de F. Ezzoubair en 2000 (Tabulés permians de Timor et affinités biologiques des Spongiomorphides du Trias d'Autriche), mémoire de Master 2 d'Elvire Heidinger en 2005 (microstructure et ultrastructure des stromatopores), thèse de doctorat de l'Université de Bretagne occidentale d'Yves Plusquellec en 2006 (Pleurodictyformes (Cnidaria Tabulata, Dévonien) du Massif armoricain et des régions maghrébo-européennes), thèse de doctorat de l'USTL et de l'Université de Liège (en co-tutelle avec le Prof. Frédéric Boulvain) de Benoît Hubert en 2008 (stromatopores dévoniens de l'Ardenne et du Boulonnais), thèse d'HDR de l'USTL de Jean-Pierre Nicollin en 2008 (foraminifères du Lias et brachiopodes du Dévonien et de la base du Carbonifère), thèse de doctorat de l'USTL et de l'Université de Varsovie (en co-tutelle avec le Prof. Jerzy Trammer) de Mikolaj Zapalski en 2008 ("*Tabulata (Anthozoa) from the Devonian of the Southern Region of the Holy Cross Mts. (Poland)*"), thèse de doctorat de l'USTL d'Emilie Pinte en 2008 (coraux tabulés dévoniens et carbonifères d'Europe occidentale), thèse de doctorat de l'USTL et de l'Université Shahid Beheshti (Téhéran, Iran - en co-tutelle avec le Prof. M.R. Mosavi) de Reza Aaripour en 2009 ("*Microfacies, sedimentary environment & sequence stratigraphy of Devonian strata in East Alborz Mountains*").

Ses travaux sur les coraux et les stromatopores du Dévonien sont internationalement reconnus. Fossiles énigmatiques, les stromatopores n'ont été que récemment rattachés aux Porifera (éponges). Les spicules qu'il a découverts en 1981 dans des formes paléozoïques confirment non seulement l'appartenance des stromatopores aux éponges mais encore l'unicité systématique jusqu'alors fortement discutée entre les formes paléozoïques et mésozoïques [voir sa liste de publications]. Bruno est l'auteur de plus d'une centaine de publications dans des revues périodiques et de chapitres de livres.

Bruno Mistiaen a reçu plusieurs distinctions de la Société des sciences, de l'agriculture et des arts de Lille (S.S.A.A.L.) : la Médaille Gosselet en 1981, le Prix Gosselet en 1986, et le Grand Prix Kuhlmann en 2005. Il devint membre titulaire de cette société savante en 2007.

LE BOULONNAIS

Le Boulonnais occupe une place à part dans les travaux de Bruno Mistiaen. Cette région située à la pointe nord-ouest du Pas-de-Calais est, en terme de géomorphologie, une demi-boutonnière entaillée par le détroit du Pas de Calais. Cette situation met ainsi à l'affleurement, par le jeu naturel de l'érosion, de nombreux terrains anciens, en particulier Dévonien et Carbonifère. Ceux-ci ont été et sont exploités par l'intermédiaire de carrières dont les matériaux extraits ont évolué au cours du temps ("marbres", calcaires, granulats). Bruno a consacré de nombreux travaux à l'étude des organismes fossiles constructeurs de récifs, récoltés dans ces terrains, en particulier dans le Givétien (Dévonien moyen), et plus spécifiquement aux stromatopores dès son mémoire de DEA en 1973 et sa thèse de doctorat de 3^e cycle en 1976 (voir ci-dessus).

À partir de 1973, B. Mistiaen, soit seul soit généralement accompagné de l'une de nous deux (DB) et de Christian Loones (géologue indépendant), est allé très souvent dans le Boulonnais, précisément à Ferques, pour rechercher dans le Givétien des carrières du Griset et du Banc Noir (creusées et exploitées par la Société Stinkal), des stromatopores (et des brachiopodes pour D. Brice et Ch. Loones) rapportés pour étude au laboratoire. Généralement ces visites avaient lieu le samedi car les ouvriers de la société Stinkal étaient au repos. Cependant ses visites aux carrières Stinkal se sont poursuivies régulièrement car l'exploitation des calcaires dans les deux carrières faisait apparaître constamment de nouveaux affleurements de stromatopores à différents niveaux dont il fallait vérifier s'il s'agissait des mêmes espèces afin de donner le maximum de précisions dans l'ouvrage qui sera publié par Bruno en 1980 au *Bulletin du Muséum national d'Histoire naturelle* [voir la liste des publications ci-dessous]. Ces visites régulières ont permis de créer des liens avec les membres de la direction de la Société Stinkal qui nous demandait parfois des renseignements sur l'extension des calcaires qu'ils exploitaient, et que nous leur communiquions avec plaisir. À la suite de ces échanges portant sur la richesse extraordinaire des faunes et leur excellente conservation, nous leur avons demandé s'il serait possible de sauvegarder un front de taille en fin d'exploitation sur le flanc est de la carrière du Griset, qui deviendrait une coupe de référence, véritable « étalon » pour la communauté scientifique internationale. Suite à l'accord de la Société Stinkal, une association Loi 1901 nommée "Association pour Valoriser le Dévonien du Griset" (AVDG) a été créée en juin 2006 pour sauvegarder, valoriser et promouvoir le

patrimoine géologique du Givétien exposé dans la carrière du Griset. Bruno Mistiaen en était le président. Le Comité scientifique de l'AVDG était composé de scientifiques de Lille et Paris (France), Londres (Angleterre) et Bruxelles (Belgique).

SON ENGAGEMENT HUMANITAIRE

Au début des années 2000, Bruno a été contacté par le foyer d'Esquermes (Lille) qui lui a demandé de servir d'interprète auprès de jeunes réfugiés afghans — il avait en effet appris le dari, une variante afghane du persan, sur le terrain en Afghanistan. C'est dans ce contexte qu'il fit la connaissance d'Hocen Rezai en 2003 à Frelinghien. Hocen avait alors 16 ans. Bruno devint tuteur d'Hocen en 2004 et puis l'adopta en 2005. C'est pendant cette période que Bruno s'est investi quasi-quotidiennement au niveau de la "jungle de Calais" (expression qui désignait les camps de migrants et de réfugiés installés à partir du début des années 2000 à Calais, Coquelles et Sangatte, non loin de l'entrée française du tunnel sous la Manche et de la zone portuaire de Calais) pour venir en aide aux réfugiés afghans. Bruno trouvait à la Catho, en particulier à l'ISA, des étudiants venant donner des cours de français aux jeunes afghans qui faisaient preuve d'une remarquable capacité d'apprentissage ; ils arrivaient à s'exprimer en français au bout de trois mois. Bruno les aidait ensuite dans les démarches administratives auprès de la Préfecture de Lille et de l'ambassade d'Afghanistan à Paris pour leur obtenir des papiers de résidents. Cet engagement humanitaire, Bruno l'exerçait au sein de plusieurs associations dont l'Amitié franco-afghane (AFRANE) qu'il avait contribué à créer en 1979, le Réseau d'accueil d'immigrés à Lille (RAIL) et l'association Tissage Réseau Armentières Accueil Migrants (TRAAM). Une fois les bons papiers obtenus, les résidents afghans pouvaient être inscrits dans des établissements scolaires tels qu'école primaire et collège Saint Charles. C'est ainsi qu'Hocen est allé jusqu'au baccalauréat S, a suivi des études supérieures en DUT de génie civil à Béthune, puis une licence professionnelle en économie de la construction à Valenciennes. Il travaille actuellement au sein de l'entreprise BOTTE Fondation à Lomme en tant que dessinateur/projeteur en bâtiment.

Bruno, catholique pratiquant, participait aux "Cercles du silence", un mouvement initié par des Frères franciscains pour protester contre l'enfermement de sans-papiers en France. Celui qu'il rejoignait se réunissait le dernier mardi de chaque mois pour dénoncer en particulier les atteintes aux droits de l'homme.

C'est en 2012 que Bruno a officiellement pris sa retraite. Il est néanmoins resté actif en recherche et en enseignement, tout en continuant d'aller sur le terrain. Il a profité de cette période pour redoubler d'activité dans son jardin — retour aux sources sans doute. En octobre 2018, lui a été diagnostiqué un cancer du poumon à un stade avancé de la maladie. Il a

été suivi à l'hôpital privé de la Louvière à Lille, puis dans les dernières semaines à l'hôpital de Tourcoing où il s'est éteint doucement le 10 octobre 2019 à l'âge de 73 ans. Il laisse parmi sa famille, ses amis, ses nombreux étudiants et ses collègues le souvenir d'un être profondément humaniste, très sociable, mais réservé au plan des émotions, tout en ayant été un véritable "joyeux drille" en société.

Remerciements

Nos remerciements vont à Marie-Edith Mistiaen, la sœur de Bruno, qui nous a éclairés en particulier sur ses années de jeunesse ; à Émilie Pinte (Professeur à l'Institut Supérieur d'Agriculture), une des anciennes élèves de Bruno, qui nous a communiqué son CV ; à Gaëlle Guyétant avec qui Bruno collabora en tant qu'administrateur au Conservatoire d'Espaces naturels du Nord - Pas-de-Calais ; à Françoise Debrenne, l'une de ses collègues, experte en organismes fossiles constructeurs de récifs du Paléozoïque ; et à Jean-Pierre Nicollin, son collègue à l'Institut Supérieur d'Agriculture, qui a relu cette notice et apporté quelques anecdotes illustrant la personnalité de Bruno Mistiaen.

SOURCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BRICE D. & DEFEBVRE A. (2005). — Grand Prix Kuhlmann - Lauréat Monsieur Bruno Mistiaen. Société des Sciences, de l'Agriculture et des Arts de Lille, rapport pour la séance solennelle, 2 p. [inédit].
- DEBRENNE F. (2019). — Bruno Mistiaen (1946-2019). *Géochronique*, **152** : 11.
- GUYETANT G. (2020). — Hommage : Bruno Mistiaen. *La lettre d'infos* (Conservatoires d'espaces naturels Hauts-de-France), **8** (février 2020) : 17.

PUBLICATIONS ET TRAVAUX DE BRUNO MISTIAEN

- BRICE D., DE LAPPARENT A.F. & MISTIAEN B. (1975). — Le Dévonien supérieur à l'Est d'Hajigak (Afghanistan). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **94** : 67-70.
- BRICE D., BULTYNCK P., COLBEAUX J.-P., LETHIERS F., MISTIAEN B. & ROHART J.-C. (1976). — Une nouvelle coupe dans le Dévonien de Ferques (Boulonnais). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **96** : 135-155.
- BRICE D., BIGEY F., MISTIAEN B., PONCET J. & ROHART J.-C. (1977). — Les organismes constructeurs (Algues, Stromatopores, Rugueux, Tabulés, Bryozoaires) dans le Dévonien de Ferques (Boulonnais-France). Associations. Répartition stratigraphique. *Mémoire du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, **89** : 136-151.
- BRICE D., COLBEAUX J.-P., MISTIAEN B. & ROHART J.-C. (1979). — Les Formations dévoniennes de Ferques (Bas

- Boulonnais, France). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **98** : 307-324.
- MISTIAEN B. (1980). — Stromatopores du Givétien de Ferques (Boulonnais, France). *Bulletin du Muséum National d'Histoire naturelle*, Paris. 4^e série (2) sect. C (3) : 167-257.
- MISTIAEN B. (1980). — Niveaux construits à Bryozoaires Fistuliporides dans le Dévonien de l'Hazarajat, Afghanistan central. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **7**, **XXII** (1) : 103-113.
- BRICE D. & MISTIAEN B. (1980). — Découverte de *Stringocephalus* et autres Stringocephalidae (Brachiopodes Terebratulida) dans le Givétien d'Afghanistan. *Geobios*, **13** (6) : 849-859.
- MISTIAEN B. (1982). — Comments on the stratigraphic distribution of Stromatoporoids around the Middle-Upper Devonian boundary. In Papers on the Frasnian-Givetian boundary. Subcommission on Devonian Stratigraphy: 91-100.
- BLIECK A., JANVIER P., LELIEVRE H., MISTIAEN B. & MONTENAT C. (1982). — Vertébrés du Dévonien supérieur d'Afghanistan. *Bulletin du Muséum National d'Histoire naturelle*, Paris. 4^e série, 4, sect. C (1-2) : 3-19.
- MISTIAEN B. & PONCET J. (1983). — Évolution sédimentologique de petits biohermes à Stromatolithes et Vers dans le Givétien de Ferques, Boulonnais. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **CII** : 205-216.
- BRICE D. & MISTIAEN B. (1984). — Mission géologique en Afghanistan. *Ensemble*, **41** (3) : 147-153.
- MISTIAEN B. (1984). — Comments on the caunopore tubes: stratigraphic distribution and microstructure. *Palaeontographica Americana*, **54** : 501-508.
- MISTIAEN B. (1984). — Disparition des Stromatopores paléozoïques ou survie du groupe : hypothèse et discussion. *Bulletin de la Société Géologique de France*, Paris (7), **XXVI** : 1245-1250.
- MISTIAEN B. (1985). — Phénomènes récifs dans le Dévonien d'Afghanistan. (Montagnes Centrales). Analyse et systématique des Stromatopores. *Publication de la Société Géologique du Nord*, **11**, vol. I : 1-381 ; vol. II : 1-245.
- BRICE D. & MISTIAEN B. (1988). — Description stratigraphique de la Formation de Blacourt - Givétien de Ferques (Boulonnais - France). In BRICE D. ed., Le Dévonien de Ferques. Bas-Boulonnais (N. France). *Biostratigraphie du Paléozoïque*, Brest, **7** : 43-64.
- MISTIAEN B. (1988). — Stromatopores du Givétien et du Frasnien de Ferques (Boulonnais - France). In BRICE D. ed., Le Dévonien de Ferques. Bas-Boulonnais (N. France). *Biostratigraphie du Paléozoïque*, Brest, **7** : 163-195.
- MISTIAEN B. (1988). — Tabulés Auloporida du Givétien et du Frasnien de Ferques (Boulonnais - France). In BRICE D. ed., Le Dévonien de Ferques. Bas-Boulonnais (N. France). *Biostratigraphie du Paléozoïque*, Brest, **7** : 197-230.
- MISTIAEN B. (1988). — Trace d'Ophiuride dans les grès à *Cruziana*, Ordovicien inférieur des Montagnes Centrales d'Afghanistan. Importance et extension du faciès à *Cruziana*. *Geobios*, **21** (6) : 797-803.
- BRICE D., MILHAU B., MISTIAEN B., ROHART J.-C. & VIDIER J.-P. (1989). — Le Givétien supérieur (Dévonien) à Ferques (Boulonnais-France) : observations nouvelles. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **108** : 113-123.
- MISTIAEN B. (1989). — Importance de la symétrie d'ordre douze chez les Tabulata. Conséquences systématiques. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*, Paris, **308** (II) : 451-456.
- MISTIAEN B. & PONCET J. (1989). — Biosedimentological evolution of a stromatolitic buildup in the Formation de Blacourt (Givetian), Boulonnais. North of France. *Memoir of the Association of Australasian Palaeontologists*, **8** : 413-423.
- FONTAINE H., MISTIAEN B., TANTIWANIT W. & TONG-DZUY T. (1990). — Devonian fossils from Northeast Thailand. Some new data from Tabulata and Stromatoporoidea. In FONTAINE H., Ten years. *C.C.O.P. Tech. Bull.*, Bangkok. **20** : 319-330.
- MISTIAEN B. (1991). — *Dendropora explicita* MICHELIN, 1846 et *D. briceae* nov. sp. (Tabulata) dans leur localité type, le Boulonnais. Présence du genre en Afghanistan. *Geobios*, **24** (2) : 141-155.
- MISTIAEN B. (1991). — Nouvelle interprétation morphofonctionnelle du Stromatopore frasnien *Stachyodes australe* (WRAY, 1967). *Geobios, Mémoire spécial* **13** : 175-182.
- BRICE D. & MISTIAEN B. (1992). — Epizoaires des brachiopodes frasnien de Ferques (Boulonnais, Nord de la France). *Geobios, Mémoire spécial* **14** : 45-58.
- BRICE D. & MISTIAEN B. (1992). — Le G.F.P, une rétrospective. In Paléogéographies et biogéographies de l'Europe occidentale au Paléozoïque. *Bulletin de liaison du Groupe Français du Paléozoïque*, **3** : 3-9.
- BRICE D., MILHAU B., MISTIAEN B., ROHART J.-C. & WEYANT M. (1993). — Précisions stratigraphiques sur le Frasnien de Ferrières-la-Grande (Dévonien supérieur, Avesnois, Nord, France). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **2** (2^e série) : 91-104.
- BRICE D., MILHAU B. & MISTIAEN B. 1994. — Affinités nord-américaines de taxons dévoniens (Givétien-Frasnien) du Boulonnais, Nord de la France. Migrations et diachronies. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **165** (4) : 291-306.
- LACHKHEM H. & MISTIAEN B. (1994). — *Stachyodes australe* WRAY, 1967) : Stromatopore à morphologie et mode de croissance particuliers. *Mémoire Institut géologique Université de Louvain*, Louvain-la-Neuve, **35** : 191-195.
- MISTIAEN B. (1994). — Skeletal density: implications for development and extinction of Paleozoic Stromatoporoids. *Cour. Forsch.-Inst. Senckenberg*, Frankfurt-am-Main, **172** : 319-327.
- TOURNEUR F., LACHKHEM H. & MISTIAEN B. (1994). — *Trypanopora conili* nov. sp. (Annelida ?) du Calcaire de Couvin, Eifélien du bord sud du Synclinerium de Dinant (Belgique). Affinités biologiques et relations avec les organismes hôtes.

- Mémoire Institut Géologique Université de Louvain, Louvain-la-Neuve*, **35** : 83-122.
- MISTIAEN B. (1996). — Recherches et richesses paléontologiques : le patrimoine géologique de la Catho. *Bulletin de l'Ensemble scientifique de Lille* (15 mars 1996), **95** : 2-3.
- IVEN C., TOURNEUR F. & MISTIAEN B. (1997). — New data on the morphology and microstructure of the genus *Caliapora* SCHLUTER 1889 (Tabulata, Middle Devonian). Systematic implications and reflections about function of squamulae. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, Madrid. (Sec. Geol.), **91** (1-4) : 261-271.
- MENDEZ-BEDIA I. & MISTIAEN B. (1997). — Genus *Stromatoporella* NICHOLSON, 1886 from the Cantabrian Mountains (Santa Lucia Formation, Lower Middle Devonian, NW Spain). *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat.*, Madrid. (Sec. Geol.), **91** (1-4) : 343-353.
- MISTIAEN B. (1997). — Découverte du genre *Amphipora* SCHULZ, 1883, dans le Famennien terminal "Strunien", de la carrière du Parcq, à Etroeungt, stratotype du Calcaire d'Etroeungt et ailleurs en Avesnois (Nord de la France). *C. R. Acad. Sci.*, Paris, **324**, sér. Ila : 665-662.
- MISTIAEN B., HOU Hong-fei & WU Xian-tao (1997). — Identité des genres *Stylostroma* GORSKY 1938 et *Pennastroma* DONG 1964, Stromatopores du Famennien supérieur (Strunien). *Geobios, Mémoire spécial* **20** : 407-414.
- NGUYEN Huu Hung & MISTIAEN B. (1997). — *Vacuustroma*, un genre nouveau de Stromatopore dendroïde du Dévonien du Vietnam et du Boulonnais (France). *Geobios*, **30** (2) : 193-204.
- MILHAU B., MISTIAEN B., BRICE D., DÉGARDIN J.-M., DERYCKE C., HOU Hong-fei, ROHART J.-C., VACHARD D. & WU Xian-tao (1997). — Comparative Faunal content of Strunian (Devonian) between Etaoucun (Guilin, Guangxi, South China) and the stratotype area (Etroeungt, Avesnois, North of France). *Proc. 30th Intern. Geol. Congr.* **12**: 79-94.
- MISTIAEN B. (1998). — Le Calcaire d'Etroeungt (Avesnois), son importance stratégique actuelle. *Publication de la Société Géologique du Nord*, **28** : 81-82.
- MISTIAEN B. (1998). — Pourquoi ces séismes qui frappent l'Afghanistan ? *Les Nouvelles d'Afghanistan*, Paris, **81** : 10-12.
- MISTIAEN B., MILHAU B., KHATIR A., HOU Hong-fei, VACHARD D. & WU Xian-tao (1998). — Famennien terminal (Strunien) d'Etroeungt (Avesnois, Nord de la France) et d'Etaoucun (Guangxi, Chine du Sud). Incidences paléogéographiques des données relatives aux Stromatopores et Ostracodes. *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **6** (2) : 97-104.
- NGUYEN Huu Hung & MISTIAEN B. (1998). — Some new species of dendroid stromatoporoids from the Muc Bai Formation (Givetian) of North Central Vietnam. *Journal of Geology*, Ha Noi, B (11-12): 41-45.
- NGUYEN Huu Hung & MISTIAEN B. (1998). — Uppermost Famennian Stromatoporoids of North Central Vietnam. *Journal of Geology*, Ha Noi, B (11-12) : 57-75.
- STREEL M., BRICE D., DÉGARDIN J.-M., DERYCKE C., DREESEN R., GROESSENS E., HANCE L., LEGRAND-BLAIN M., LETHIERS F., LOBOZIAK S., MAZIANE N., MILHAU B., MISTIAEN B., POTY E., ROHART J.-C., SARTENAER P., THOREZ J., VACHARD D. & BLIECK A. (1998). — Proposal for a Strunian substage and a subdivision of the Famennian Stage into four substages. *Subcommission on Devonian Stratigraphy, Newsletter* **15**: 47-52.
- MISTIAEN B. (1999). — On some Devonian (Frasnian) stromatoporoids from Kerman Province, eastern Iran. *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **7** (1) : 33-44.
- BRICE D., MISTIAEN B. & ROHART J.-C. (1999). — New data on distribution of brachiopods, rugose corals and stromatoporoids in the upper Devonian of central and eastern Iran. Paleobiogeographic implications. *Annales de la Société Géologique du Nord*. 2^e série, **7** : 21-32.
- MISTIAEN B. & WEYER D. (1999). — Late Devonian Stromatoporoid from the Sudetes Mountains (Poland), and endemism of the Upper Famennian to Uppermost Famennian (= « Strunian ») stromatoporoids fauna in western Europe. *Senckenbergiana Lethaea*, **79** (1): 51-61.
- MISTIAEN B., GHOLAMALIAN H., GOURVENNEC R., PLUSQUELLEC Y., BIGEY F., BRICE D., FEIST M., FEIST R., GHOBADI P.M., KEBRIA-EE M., MILHAU B., NICOLLIN J.-P., ROHART J.-C., VACHARD D. & YAZDI M. (2000). — Preliminary data on the Upper Devonian (Frasnian, Famennian) and Permian fauna and flora from the Chahriseh area (Esfahan Province, Central Iran): charophytes, microproblematica, stromatoporoids, tabulate, ostracods, trilobites, conodonts, and ichnofauna. In: 1^o Congreso Ibérico de Paleontología / XVI Jornadas de la Sociedad española de Paleontología. VIII International meeting of IGCP 421: 258-259. [Extended abstract]
- MISTIAEN B., GHOLAMALIAN H., GOURVENNEC R., PLUSQUELLEC Y., BIGEY F., BRICE D., FEIST M., FEIST R., GHOBADI P.M., KEBRIA-EE M., MILHAU B., NICOLLIN J.P., ROHART J.-C., VACHARD D. & YAZDI M. (2000). — Preliminary data on the Upper Devonian (Frasnian, Famennian) and Permian fauna and flora from the Chahriseh area (Esfahan Province, Central Iran). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **8** (2^e série) : 93-102.
- MISTIAEN B. (2001). — Devonian stromatoporoids and other reef organisms from Kal-e Sardar (Shotori Range, Iran). Biostratigraphic and palaeogeographic implications. In *Contribution to Siberian IGCP 421/421 joint meeting*, Novosibirsk (4-21 august 2001) : 102-103. (Extended abstract)
- MISTIAEN B. & FERNANDEZ-MARTINEZ E. (2001). — Alveolitos y estromatopóridos del Devónico de Iran: consideraciones paleobiogeográficas. In XVII Jornadas de la Sociedad Española de Paleontología. *Publicaciones del Seminario de Paleontología de Zaragoza*, **5** (2) : 557-564.
- BLIECK A., BRICE D., MISTIAEN B. & FEIST R. (2001). — 15th International Senckenberg Conference. *Géochronique*, **50** : 5.

- MISTIAEN B., BRICE D. & ROHART J.-C. (2001). — Trente années de recherche sur le Dévonien de Ferques (Boulonnais). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **9** (2^e série) (1) : 5-12.
- BRICE D., MISTIAEN B. & ROHART J.-C. (2002). — Progrès dans la connaissance des flores et faunes dévoniennes du Boulonnais (1971-2000). *Annales de la Société géologique du Nord*, **9** (2^e série) (2) : 61-74.
- MISTIAEN B. (2002). — Stromatopores et coraux tabulés du Membre des Pâtures, Formation de Beaulieu (Frasnien de Ferques, Boulonnais). *Annales de la Société géologique du Nord*, **9** (2^e série) : 85-90.
- MISTIAEN B., BECKER T., BRICE D., DEGARDIN J.-M., DERYCKE C., LOONES C. & ROHART J.-C. (2002). — Données nouvelles sur la partie supérieure de la Formation de Beaulieu (Frasnien de Ferques - Boulonnais, France). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **9** (2^e série) 2 : 75-84.
- BRICE D. & MISTIAEN B. (2002). — Le Strunien. In Colloque "Géologie, patrimoine et environnement en Nord - Pas de Calais" (Lille, 26-28 novembre 2002). *Musée d'Histoire Naturelle de Lille* : 24-25. (Résumé étendu)
- BRICE D. & MISTIAEN B. (2003). — Le Dévonien : ses subdivisions. Le Strunien un sous-étage du Famennien ? *Annales de la Société Géologique du Nord*, **10** (2^e série) : 97-109.
- FERNANDEZ-MARTINEZ E. & MISTIAEN B. (2003). — *Alveolites parvus*, tabulate coral from the Upper Devonian of Iran. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **10** (2^e série) : 261-273.
- PLUSQUELLEC Y., FERNANDEZ-MARTINEZ E., MISTIAEN B. & TOURNEUR F. (2004). — Révision de *Crenulipora difformis* LE MAITRE 1956 (Tabulata, Dévonien du Nord Gondwana) : Morphologie, structure et microstructure. *Revue de Paléobiologie*, **23** (1) : 181-208.
- HUBERT B., BRICE D., MISTIAEN B. & METAIS A. (2005). — Inventaire des éléments géologiques remarquables. Réserve naturelle Pointe de Givet. (Rapport pour l'ONF) : 1-58.
- STREEL M., BRICE D. & MISTIAEN B. (2006). — Strunian. *Geologica Belgica*, **9** (1-2) : 105-109.
- BLIECK A., BRICE D., COURVILLE P., CRONIER C., DERYCKE C., HUBERT B., MISTIAEN B., NICOLLIN J.-P. & ZAPALSKI M. (2006). — La Vie en Ardenne occidentale au Paléozoïque supérieur (Dévonien-Carbonifère, - 416 à - 299 Ma : paléobiodiversité, événements paléobiologiques, paléoenvironnements, paléobiogéographie. *Géologie de la France*, **2006** (1-2) : 21-27.
- HUBERT B., ZAPALSKI M.K., NICOLLIN J.-P., MISTIAEN B. & BRICE D. (2007). — Selected benthic faunas from the Devonian of the Ardennes: an estimation of paleobiodiversity. *Acta Geologica Polonica*, **57** (2): 223-262.
- ZAPALSKY M.K., HUBERT B., NICOLLIN J.-P., MISTIAEN B. & BRICE D. (2007). — The palaeobiodiversity of stromatoporoids, tabulates and brachiopods (Devonian, Ardennes). *Bulletin de la Société Géologique de France*, **178** : 55-62.
- HUBERT B.L.M., MISTIAEN B. & ZAPALSKI M.K. (2007). — Excursion précongrès A2: Paleozoic of the subpolar Urals, X Fossil Cnidaria & Porifera Congress. *Géochronique*, **104** : 8.
- MANSY J.-L., GUENOC P., ROBASZYNSKI F., AMÉDRO F., AUFFRET J.-P., VIDIER J.-P., LAMARCHE J., LEFÈVRE D., SOMMÉ J., BRICE D., MISTIAEN B., PRUD'HOMME A., ROHART J.-C. & VACHARD D. (2007). — Notice explicative de la carte géologique de France (1/50.000), feuille de Marquise (seconde édition) (5). BRGM édit., Orléans : 1-213.
- MISTIAEN B. (2007). — Givetian coral-stromatoporoid and algal-sponge-worm buildup, Boulonnais, France. In VENNIN E, ARETZ M., BOULVAIN F. & MUNNECKE A. eds, Facies from Palaeozoic reefs and accumulations. *Mémoire du Muséum National d'Histoire Naturelle*, **195** : 195-197.
- MISTIAEN B. (2007). — An older Devonian stromatoporoid from the Ardennes, St Joseph Formation, Emsian (Vireux, France). In HUBMANN B. & PILLER W. E. eds, Fossil Corals and Sponges. Proceedings of the 9th International Symposium on Fossil Cnidaria and Porifera. *Österr. Akad. Wiss., Schriftenr. Erdwiss. Komm.*, **17** : 153-165.
- ZAPALSKY M.K., HUBERT B. & MISTIAEN B. (2007). — Estimation of the Palaeo-environmental changes: can analysis of distribution of tabulae in tabulates be a tool? In ALVARO J.J, ARETZ M., BOULVAIN F. MUNNECKE A., VACHARD D. & VENNIN E. eds., Palaeozoic Reefs and Bioaccumulations: Climatic and Evolutionary Controls. *Geological Society, London, Special Publications*, **275**: 275-281.
- ZAPALSKI M.K., HUBERT B. & MISTIAEN B. (2007). — X Międzynarodowy Kongres Kopalnych Koralowców i Gąbek St. Petersburg, 12-16 sierpnia 2007. *Przegląd Geologiczny*. **55** (10) : 831, 887-888. [En Polonais]
- MISTIAEN B. (2008). — Analyse de l'ouvrage : Devonian events and correlations. R.T. BECKER & W.T. KIRGHGASSER eds., Geological Society, London, Special Publication 278. *Géochronique*, **106** : 48.
- MISTIAEN B., BRICE D. & DEVILLE P. (2008). — Recherches et richesses paléontologiques : le patrimoine géologique de l'Université catholique de Lille. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **14** (2^e série) : 15-20.
- ZAPALSKI M.K., PINTE E. & MISTIAEN B. (2008). — Late Famennian? *Chaetosalpinx* in *Yavorskia* (Tabulata): the youngest record of tabulate endobiont. *Acta Geologica Polonica*, **58** (3) : 321-324.
- AHARIPOUR R., MOSSAVI MIR R., MOSADDEGH H. & MISTIAEN B. (2009). — Facies features and palaeoenvironmental reconstruction of the Early to Middle Devonian syn-rift volcano-sedimentary succession (Padeha Formation) in the Eastern-Alborz mountains, NE Iran. *Facies*: 1-16.
- MISTIAEN B. & BRICE D. (2009). — Les « marbres » du Boulonnais à Ferques. Des calcaires carbonifères aux aspects très variés. In ROBASZYNSKI F. & GUYETANT G. eds, *Des roches aux paysages dans le Nord - Pas-de-Calais. Richesse de notre patri-*

- moine géologique*. Société Géologique du Nord et Conservatoire des Sites Naturels du Nord et du Pas-de-Calais édit. : 64-67.
- MISTIAEN B. & BRICE D. (2009). — Le Boulonnais sous les tropiques. Les carrières du Griset et du Banc Noir à Ferques. In ROBASZYNSKI F. & GUYETANT G. eds, *Des roches aux paysages dans le Nord – Pas-de-Calais. Richesse de notre patrimoine géologique*. Société Géologique du Nord et Conservatoire des Sites Naturels du Nord et du Pas-de-Calais édit. : 68-71.
- MISTIAEN B. & BRICE D. (2009). — Le Strunien. Le passage graduel entre le Dévonien et le Carbonifère. In ROBASZYNSKI F. & GUYETANT G. eds, *Des roches aux paysages dans le Nord – Pas-de-Calais. Richesse de notre patrimoine géologique*. Société Géologique du Nord et Conservatoire des Sites Naturels du Nord et du Pas-de-Calais édit. : 114-115.
- FERNANDEZ-MARTINEZ E., FERNANDEZ L.P., MENDEZ-BEDIA I., SOTO F. & MISTIAEN B. (2010). — Earliest Pragian (Early Devonian) corals and stromatoporoids from reefal settings in the Cantabrian Zone (N. Spain). *Geologica Acta*, **8**: 301-323.
- MISTIAEN B., BRICE D., HUBERT B. & LOONES C. (2011). — Classical Devonian and Carboniferous sites in the Ferques area, Boulonnais, Northern France). *Kölner Forum Geol. Paläont*, **20** : 51-98.
- MISTIAEN B., BRICE D., ZAPALSKI M.K. & LOONES C. (2012). — Brachiopods and their auloporid epibionts in the Devonian of Boulonnais (France). Comparison with other association globally. In TALENT J. ed., *Global Biodiversity, Extinction Intervals and Biogeographic Perturbations Through Time. Earth and Life*, 159-188, 1 appendix.
- MISTIAEN B., BRICE D., LOONES C. & DE SOUSA A. (2012). — Un affleurement temporaire exposant le contact entre les Formations de Beaulieu et de Ferques (Frasnien, Boulonnais). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **19** (2^e série) : 1-9.
- ZAPALSKI M.K., TRAMMER J. & MISTIAEN B. (2012). — An unusual growth pattern in the Frasnian *Alveolites* (Tabulata) from the Holy Cross Mountains (Poland). *Palaeontology*, **55**: 697-706.
- HUBERT B., DEVLEESCHOUWER X., MISTIAEN B., BRICE D., NICOLLIN J.-P., CAMBIER G., VALLET F., POTY E. & MOTTEQUIN B. (2013). — Macrofauna, rock magnetism and sedimentology in the Etroeungt Limestone ('Strunian', Uppermost Famennian) at Avesnelles (northern France). In WHALEN M. et al. eds, IGCP 580-596 Geophysical and Geochemical Techniques: A Window on the Palaeozoic World, Programme with Abstracts. Geological Survey of Canada and ERCB Core Research Center, Calgary: 36-37.
- MISTIAEN B., BRICE D., DEVLEESCHOUWER X., HUBERT B., KHATIR A., MOTTEQUIN B., NICOLLIN J.-P. & POTY E. (2013). — Le « Calcaire d'Etroeungt » dans les coupes historiques d'Etroeungt et d'Avesnelles, Nord de la France. Avesnois. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **20** (2^e série) : 43-51.
- BLIECK A., BRICE D., CHARVET J., CUVELIER J., DE BAERE J.-P., DHAINAUT A., MATRION A., MEILLIEZ F., MISTIAEN B., OUDOIRE T., RICOUR J., SOMMÉ J. & TRENTESAUX A. (2014). — La Société Géologique du Nord et les sciences de la Terre dans le nord de la France : science, industrie et société. In BLIECK A. & DE BAERE J.-P. eds, *La Société géologique du Nord et l'histoire des sciences de la terre dans le nord de la France. Mémoires de la Société Géologique du Nord*, **XVII** : 1-38.
- MISTIAEN B., BRICE D., HUBERT B. & PINTE E. (2014). — Devonian paleobiogeographic affinities of Afghanistan and surrounding areas (Iran, Pakistan). *Journal of Asian Earth Sciences*, **102** : 102-126.
- MISTIAEN B., BRICE D., BLIECK A., AVERBUCH O., CHARLET J.-M., COCKS L.M., COLBEAUX J.-P., DEBUYSER M., DEMARQUE D., DE WEVER P., GROESSENS G., HUBERT B.L.M., LOONES C., MANSY J.-L.†, MARTINI G., MEILLIEZ F. & VIDIER D. (2016). — Le Boulonnais (Pas-de-Calais) : Un patrimoine remarquable, avec une attention particulière au Dévonien. *Annales de la Société géologique du Nord*, **23** (2^e série) : 31-39.
- BRICE D. & MISTIAEN B.† (2019). — M. l'abbé Gilbert Tieghem (1921-2019). *Annales de la Société géologique du Nord*, **26** (2^e série) : 87-88.

JEAN-PIERRE LAVEINE (1936-2020)

par Alain BLIECK

38 rue Paul Doumer, 59320 Haubourdin
alain.blieck@yahoo.fr

Jessie CUVELIER

UMR 8198 Evo-Eco-Paleo, CNRS & Université de Lille, 59000 Lille
jessie.cuvelier@univ-lille.fr

Elisabeth LOCATELLI

21 rue Jeanne Maillotte, 59800 Lille
elisabeth.locatelli@wanadoo.fr

& Thierry OUDOIRE

Musée d'Histoire Naturelle de Lille, 19 rue de Bruxelles, 59000 Lille
toudoire@mairie-lille.fr

JEUNESSE ET FORMATION

Jean-Pierre Laveine est né le 7 janvier 1936 à Quaregnon, en Belgique, dans le Borinage, ancienne région charbonnière des environs de Mons, d'un père belge et d'une mère française, maraîchers de leur état. Il y est resté jusqu'au début de la Deuxième Guerre mondiale lorsque, avec sa famille, il a "évacué" dans la région de Montpellier. Ils sont revenus en Belgique avant la fin de la guerre, et ont subi en 1944 les bombardements aériens des Alliés. Jean-Pierre Laveine, enfant, passa une bonne partie de son temps à jouer sur les terrils, ces collines artificielles résultant de l'entassement des résidus d'exploitation houillère ; on peut imaginer que c'est là qu'est née sa vocation de naturaliste, par l'observation des fossiles qu'il pouvait y récolter (géologie, paléobotanique) ainsi que de la faune et de la flore qui s'y installaient (zoologie, botanique). Orphelin de père vers l'âge de 11-12 ans, il revient en France à Onnaing, dans la région de Valenciennes avec sa sœur aînée et sa mère. Celle-ci est issue d'une famille modeste de quatre enfants, très doués à l'école. Elle-même, née Arthémise Cornette, terminera 1^{re} au Certificat d'études primaires (CEP) du département en 1914. Malheureusement, la Première Guerre mondiale l'empêcha de poursuivre ses études. Néanmoins, la famille Cornette comptera un maire dans ses rangs [ce patronyme est assez courant dans le nord de la France - cf. la Webographie]. Jean-Pierre a donc bénéficié d'un héritage culturel excellent ; élève doué, il fut stimulé par sa mère qu'il aidait aux travaux de maraîchage. Celle-ci s'est sacrifiée pour qu'il poursuive des études qu'elle-même n'avait pas pu faire. Il intègre l'École Normale de Douai en 1951 pour devenir instituteur. À ce titre, il est naturalisé français à ses 18 ans. D'abord en poste à Lambersart (Nord), il fut ensuite professeur dans différents lycées techniques. Jean-Pierre Laveine a fait l'École des officiers d'où il est sorti sous-lieutenant ; il devint officier de réserve. Il a heureusement échappé à la guerre d'Algérie, en tant que soutien de famille. En parallèle de son activité d'enseignant, il poursuivit des études universitaires à Lille. Il recopiait — à la main, les

moyens de reproduction actuels n'étant pas encore accessibles facilement aux étudiants — les cours des autres étudiants le soir, souvent jusqu'à 2h du matin. Il épousa Raymonde Pariseaux en 1957. M. et Mme Laveine eurent un fils, Frédéric, en 1971. Raymonde Laveine est décédée en 2011.



Fig. 1. — Promotion 1951-55 des élèves de l'École Normale de Garçons de Douai (Nord). J.-P. Laveine est le 3^e à partir de la gauche de la rangée du haut (encadré blanc). Photo de l'Amicale des Anciens de l'ENG de Douai : <http://eng.iufm.free.fr/images/1951-55.jpg>

Fig. 1. — The 1951-55 student class of Ecole Normale de Garçons de Douai (Nord, France). J.-P. Laveine is the third one from left hand side of the top row (white circle). Photograph of alumni of the Ecole Normale de Garçons de Douai at <http://eng.iufm.free.fr/images/1951-55.jpg>

CARRIÈRE PROFESSIONNELLE

Jean-Pierre Laveine est entré au CNRS comme attaché de recherche en 1961, au sein du laboratoire de paléobotanique de l'Université de Lille, alors dirigé par le Prof. Paul Corsin. Devenu chargé de recherche, puis maître de recherche, il soutint sa thèse de doctorat d'état en 1967 sur "*Contribution à l'étude de la flore du terrain houiller : les Neuroptéridées du Nord de la France*". Il participa à la transformation de la Faculté des Sciences de Lille en Université des Sciences et Technologies de Lille (Université Lille 1). Pendant les pauses café à l'université, puis, lorsqu'après sa retraite il

eut quitté l'université pour le Musée d'Histoire Naturelle de Lille, il parlait souvent du travail qu'il avait fallu faire pour l'emménagement de la Faculté des sciences sur le tout nouveau campus à Villeneuve d'Ascq en 1965. Une partie des collections de paléobotanique de la faculté a ainsi été déplacée et installée au sous-sol du bâtiment des sciences de la Terre à Villeneuve d'Ascq (voir l'historique de Oudoire *et al.*, 2014), avec l'aide essentielle de ses collègues Robert Coquel, Stanislas Loboziak et du garçon de laboratoire de l'époque, Robert Ballenghien dont le décès en 1997 l'affecta énormément (voir des photos *in* Locatelli, 2014, fig. 15). La bibliothèque recherche de paléobotanique a, quant à elle, été installée au 1^{er} étage du même bâtiment ; elle revêtait une importance particulière aux yeux de J.-P. Laveine qui en avait confié l'entretien et la reliure des ouvrages à R. Ballenghien (Laveine, 1998). C'est grâce à ces collections et à cette bibliothèque que Jean-Pierre Laveine a pu mener à bien sa thèse de doctorat et ses recherches ultérieures. Il avait tenu à les mettre à la disposition de tous, contrairement à une habitude encore trop fréquente à l'époque, qui consistait à les installer "dans le bureau du professeur" ... [la bibliothèque a ultérieurement été agrandie et déplacée au 3^e étage du bâtiment des sciences de la Terre de l'université ; cf. Locatelli, 2014, fig. 16].

En 1970, il était secrétaire-adjoint de la Société Géologique du Nord (SGN, dont il était membre depuis 1960), et c'est à ce titre qu'il a organisé avec Jacques Paquet le colloque du Centenaire de la SGN à Villeneuve d'Ascq [voir la rubrique "La SGN il y a 50 ans" dans ce tome-ci des *Annales*]. Il intégra l'enseignement supérieur en 1974 comme professeur à l'Université de Lille. "J.-P. Laveine [a] décrit le fonctionnement très hiérarchisé et mandarin à cette époque, en particulier en géologie, son domaine, où il fut amené à subir plusieurs répressions." (Mounier, 2019). Hors des polémiques, l'histoire retiendra que son élection s'est faite dans un contexte tendu où il entrait en concurrence avec le candidat ayant les faveurs du professeur de paléobotanique de l'époque.

Membre du Comité national de la recherche scientifique (CoNRS), il travailla à la reconnaissance du laboratoire de paléobotanique de Lille comme unité de recherche CNRS, en participant avec les Prof. Claude Babin (Brest) et Hubert Lardeux (Rennes) à la création du GRECO 7 (Groupement de REcherche COordonnée "Biostratigraphie du Paléozoïque" entre les laboratoires de paléontologie de Lille, Brest et Rennes auxquels a été adjointe ultérieurement une petite équipe de l'Université de Caen) à la fin des années 1970 [la partie lilloise de cette unité de recherche est devenue par la suite URA 1365 puis UPRESA 8014 - Laboratoire de Paléontologie et Paléogéographie du Paléozoïque - et enfin UMR 8217 Géosystèmes]. Il est à noter que, parmi ses nombreuses activités universitaires, Jean-Pierre Laveine, ancien instituteur formé à l'école de la République — ce dont il était fier — faisait preuve de réelles qualités pédagogiques. L'une d'entre nous

(JC) qui l'a eu comme professeur a pu constater que même les plus réticents à la paléontologie venaient à ses cours...



Fig. 2. — Jean-Pierre Laveine en 2017, avec sa chienne Iaskia. Photo de Frédéric Laveine, son fils.

Fig. 2. — Jean-Pierre Laveine in 2017, with his dog Iaskia. Photograph by his son Frédéric Laveine.

ACTIVITÉS DE RECHERCHE

L'essentiel des travaux de recherche de Jean-Pierre Laveine relevait de la paléontologie, et plus particulièrement de la paléobotanique, la science des plantes fossiles, en relation avec le bassin houiller tout proche du Nord - Pas-de-Calais. Il s'était spécialisé dans l'étude des plantes carbonifères, en particulier des Neuroptéridées, des Ptéridospermées du Houiller (Carbonifère supérieur, correspondant en gros au Pennsylvanien de l'actuelle charte internationale de stratigraphie - cf. Webographie). Utiles en biostratigraphie et en paléobiogéographie, ces "fougères à graines" fossiles aident à la prospection des séries houillères. Les travaux de Jean-Pierre Laveine ont ainsi porté sur les bassins du Nord - Pas-de-Calais et de Lorraine, souvent en collaboration avec ses collègues paléobotanistes et palynologistes de l'université : d'abord Paul et Paule Corsin, et Jacques Danzé dans les années 1960, puis surtout Robert Coquel, Stanislas Loboziak et Claudine Brousmiche à partir des années 1970 ; mais aussi avec des ingénieurs du BRGM et des compagnies houillères, en particulier Alexis Bouroz et Jacques Chalard. Il s'est intéressé aux bassins houillers du nord de l'Espagne, en particulier ceux des Asturies, à partir des années 1980 [voir les articles de Leyva *et al.*, Luque *et al.*, etc. dans les actes du 10^e Congrès International de Stratigraphie et Géologie du Carbonifère (Madrid, 1983) de sa liste de publications ci-dessous]. À partir des années 1984-85 et pendant une quinzaine d'années, il a travaillé sur le Carbonifère de Chine en collaboration avec Yves Lemoigne de l'Université de Lyon [voir en particulier les

actes du 11^e Congrès International de Stratigraphie et Géologie du Carbonifère (Pékin, 1987) de sa liste de publications]. C'est ensuite vers la Thaïlande qu'il s'est tourné à partir des années 1990, en collaboration avec sa collègue Benjavun Ratanasthien de l'Université de Chiang Mai. Les thèmes développés dans le cadre de ces partenariats internationaux, en particulier celui de la biostratigraphie, ont également fortement intéressé les industries pétrolières qui ont alimenté le laboratoire en contrats financiers, faisant suite à ceux des compagnies houillères. Néanmoins, c'est dans le domaine de la systématique que J.-P. Laveine s'est principalement illustré, par ses nombreux articles sur l'architecture des frondes des fougères fossiles (voir sa liste de publications), parfois en collaboration avec ses collègues Christopher J. Cleal (National Museum of Wales, Cardiff, Royaume-Uni) et Y. Lemoigne. Il n'hésitait cependant pas à travailler avec des "amateurs" ayant constitué une collection privée de fougères fossiles avec, en particulier, des spécimens montrant des frondes très bien conservées, permettant des observations paléo-anatomiques de qualité. Il consacrait du temps à former et orienter les recherches de ces amateurs, comme M. Amor Belhis, ancien mineur de fond ou M. Louis Legrand (voir la liste de publications), vers des échantillons qui pouvaient compléter les spécimens existant dans les collections du musée et de l'université. J.-P. Laveine était membre de plusieurs sociétés savantes, françaises et étrangères, parmi lesquelles la Société des Sciences, de l'Agriculture et des Arts de Lille (SSAAL), l'Organisation francophone de Paléobotanique (devenue Agora Paleobotanica) Agora Paleobotanica, Botanical Society of America (section paléobotanique). Il était resté membre de l'Amicale des Anciens Élèves de l'École Normale d'Instituteurs de Douai (Webographie). Il a dirigé les thèses de doctorat de Valeria Horvath [1985, *Apports de la palynologie à la stratigraphie du Carbonifère moyen de l'unité structurale de la Sobia-Bodon (Zone cantabrique, Espagne)*], de Sylvie Crasquin [1986, *Les ostracodes dinantiens du synclinal de Laval et du synclinorium de Namur (systématique, biostratigraphie, paléoécologie)*], de Sophie Beckary [1988, *Étude anatomique des végétaux des coal balls carbonifères du site de Truébano, province de Léon, Espagne*] et de Bruno Milhau [1990, *Les ostracodes du bassin de Waitemata (Miocène inférieur) de la région d'Auckland (Nouvelle-Zélande): systématique, paléoécologie, paléogéographie*].

ACTIVITÉS MUSÉALES

Jean-Pierre Laveine était depuis 1982 "conservateur universitaire de géologie" au Musée d'Histoire Naturelle de Lille, une fonction qu'il a prise à la suite de Paul Corsin (Oudoire *et al.*, 2014). À partir de cette date, il est allé régulièrement deux jours par semaine au musée. Plus tard, à la fermeture du Musée industriel, la Ville de Lille a créé le service administratif 'Musée de géologie et houiller', avec une

gestion autonome par rapport au reste du musée (regroupant les parties zoologie-botanique, ethnographie et sciences & techniques), et recruté un conservateur territorial pour le gérer et s'occuper des collections à plein temps. À partir de la nomination de Sophie Beckary, une de ses anciennes élèves, en 1986, il devint conservateur universitaire associé en géologie. Professeur de classe exceptionnelle de l'Université de Lille quand il a pris sa retraite en 2004 à l'âge de 68 ans, il est resté deux ans à l'université comme professeur émérite, avant de s'installer au Musée d'Histoire Naturelle de Lille où il a poursuivi ses recherches jusqu'au dernier moment, son dernier article étant paru en 2019. Il nous avait confié qu'il avait à cœur de terminer ce dernier article avant de "partir". Chaque matin au musée, il prenait plaisir à retrouver ses collègues et échanger des souvenirs et anecdotes avec eux. Il venait de temps en temps à l'université où il ne manquait pas de passer saluer ses anciens collègues avant d'aller travailler à la bibliothèque recherche. En bon instituteur et professeur qu'il fut, il s'est également fortement investi dans les projets pédagogiques du musée, apportant notamment son expertise pour la reconstitution paléoenvironnementale à l'échelle du Carbonifère de l'exposition « Pays'Âges » (Oudoire *et al.*, 2014 ; voir sa liste de publications). Ses derniers travaux portaient sur la redéfinition complète de la systématique des espèces regroupées sous les genres *Odontopteris* STERNBERG 1825 et *Mixoneura* WEISS 1870, et avaient pour objectif principal la création du genre *Cyrillopteris* LAVEINE 2019.

Il nous avait paru très fatigué à la fin de 2019 et au début de cette année. Au cours de ces derniers mois, il évoquait avec lucidité sa maladie, un cancer, et sa mort qu'il savait inéluctable. L'humour froid que nous lui connaissions l'avait amené à préparer lui-même la rédaction de son faire-part de décès où il parlait de sa mort comme de son "ultime contribution à la lutte contre le réchauffement climatique : à savoir l'arrêt de [sa] respiration". De l'union de son fils Frédéric avec Mme Hu Xiu Ping, sa belle-fille d'origine chinoise, étaient nés un petit-fils et une petite-fille qu'il adorait. Il nous a quittés le 21 mars 2020, dans sa 85^e année. Il laissera à celles et ceux qui l'ont connu le souvenir d'un homme droit, parfois inaccessible, mais taquin, juste et profondément humain.

Remerciements

Nous tenons à remercier chaleureusement M. Frédéric Laveine pour les renseignements d'ordre familial et professionnel qu'il nous a fournis sur son père, Mme Françoise Debrenne (directrice de recherche honoraire CNRS, Ste Geneviève-des-Bois) qui a travaillé avec Jean-Pierre Laveine quand ils étaient membres du Comité national de la recherche scientifique et M. Bernard Maitte (Université de Lille, SGN) qui a bien voulu relire d'un œil critique une version préliminaire du texte.

RÉFÉRENCES CITÉES

- LAVEINE J.-P. (1998). — Robert Ballenghien (1939 - 1997). *Bulletin de l'A.S.A. (Association de Solidarité des Anciens de l'Université Lille I)*, février 1998, "Figures et Acteurs" ; World Wide Web address : https://asap.univ-lille.fr/IMG/pdf/figures_et_acteurs_2016.pdf?1212/c5d48da09f400cfe7e94d2295d4da9c3bd9ce681 (p. 59) [consulté le 14/05/2020].
- LOCATELLI E. (2014). — La bibliothèque recherche des sciences de la Terre de l'Université de Lille au fil du temps : historique du patrimoine, un fonds au service de la communauté scientifique. In : BLIECK A. & DE BAERE J.-P. eds, La Société géologique du Nord et l'histoire des sciences de la Terre dans le nord de la France. *Mémoires de la Société Géologique du Nord*, **XVII** : 151-173.
- MOUNIER Y. (2019). — *Entretien avec Jean-Pierre Laveine (mardi 19 mars 2019)*. World Wide Web address : <https://asap.univ-lille.fr/spip.php?article589> [consulté le 11/05/2020].
- OUDOIRE T., CUVELIER J., D'ANDREA J., KOCH C. & DHAINAUT A. (2014). — Le département de géologie du Musée d'histoire naturelle de Lille, des collections à l'image de l'histoire géologique régionale. In : BLIECK A. & DE BAERE J.-P. eds, La Société géologique du Nord et l'histoire des sciences de la Terre dans le nord de la France. *Mémoires de la Société Géologique du Nord*, **XVII** : 175-183.

WEBOGRAPHIE

- Amicale des Anciens de l'École Normale de Garçons et de l'IUFM de Douai : <http://eng.iufm.free.fr/index.htm> ; <https://engiuftmdouai.blogspot.com> [consultés le 14/05/2020]
- International Chronostratigraphic Chart : <http://www.stratigraphy.org/ICSchart/ChronostratChart2020-01.jpg> [consulté le 11/05/2020]
- Nom patronymique Cornette : <https://www.filae.com/nom-de-famille/CORNETTE.html> [consulté le 11/05/2020]

LISTE DES PUBLICATIONS DE JEAN-PIERRE LAVEINE

établie par Jessie Cuvelier

- CARETTE J., CAYEUX J., DANZE J., LAVEINE J.-P., LE MERCIER A. & VIGREUX S. (1960). — Les spores de l'assise de Bruay dans l'Ouest du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7^e série, **II** : 552-565.
- LAVEINE J.-P. (1960). — Contribution à l'étude du terrain houiller. Recherche et étude des microspores de la partie inférieure de l'assise de Bruay. *Université de Lille, Diplôme d'Études Supérieures* : 1-52, pl. I-VIII.
- DANZE J. & LAVEINE J.-P. (1960). — Sur un mode d'accolement des "spores" dans la tétrade, nouveau pour les spores paléozoïques. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **250** : 4427-4428.
- LAVEINE J.-P. (1962). — Étude des microspores d'un charbon provenant d'un sondage à Zeddam (Limbourg néerlandais). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LXXXI** : 91-96, pl. VI-VII.
- CORSIN P., CARETTE J., DANZE J. & LAVEINE J.-P. (1962). — Classification des spores et des pollens du Carbonifère au Lias. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **254** : 3062-3065.
- DANZE J. & LAVEINE J.-P. (1962). — Étude de quelques sporomorphes du Stéphanien de Grand-Croix. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **254** : 3735-3736.
- BONTE A. & LAVEINE J.-P. (1962). — Sur la nature et l'âge des sédiments liasiques dans le sous-sol de Boulogne-sur-Mer (Pas-de-Calais). *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **255** : 2786-2788.
- BRICHE P., DANZE-CORSIN P. & LAVEINE J.-P. (1963). — Flore infraliasique du Boulonnais (Macro- et Microflore). *Mémoires de la Société Géologique du Nord*, **XIII** : 1-143, pl. I-XI.
- DANZE J. & LAVEINE J.-P. (1963). — Étude palynologique d'une argile provenant de la limite Lias-Dogger, dans un sondage à Boulogne-sur-Mer. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LXXXIII** : 79-90, pl. XIII-XVI.
- LAVEINE J.-P. (1964). — *Contribution à l'étude des microspores de différents niveaux du Westphalien C inférieur. Corrélations palynologiques entre les Groupes d'Auchel-Bruay et de Béthune-Noeux*. Thèse de doctorat de 3^e cycle, Université de Lille : 1-96, pl. I-XII.
- LAVEINE J.-P. (1965). — Les spores de la subdivision *Operculatitriteles* nov. subdiv. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **260** : 2556-2558, 1 pl.
- LAVEINE J.-P. (1965). — Contribution à l'étude des microspores de différents niveaux du Westphalien C inférieur. Corrélations palynologiques entre les groupes d'Auchel-Bruay et de Béthune-Noeux. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LXXXV** : 129-153, pl. X-XII.
- AGRALI B., AKYOLE E., KONYALI Y., CORSIN P.M. & LAVEINE J.-P. (1965). — Nouvelles formes de spores et pollens provenant de charbons primaires et tertiaires de divers gisements turcs. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LXXXV** : 169-182, pl. XV-XVI.
- DOLLE P. & LAVEINE J.-P. (1965). — Technique d'étude des limbes fossiles. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LXXXV** : 301-304, pl. XXVI.
- CORSIN P.M., LAVEINE J.-P., LEVET-CARETTE J. & LOBOZIAK S. (1965). — Sur la classification des spores et des pollens du Carbonifère au Lias de P. Corsin, J. Carette, J. Danzé et J.-P. Laveine. Mise au point et application. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LXXXV** : 327-336.
- LAVEINE J.-P. (1966). — Remarques sur quelques frondes ptéridospermophytiques paléozoïques. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **262** : 1625-1628.

- LAVEINE J.-P. (1966). — À propos de la classification des Neuroptéridées. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **262** : 1680-1683.
- LAVEINE J.-P. (1967). — *Contribution à l'étude de la flore du terrain houiller, les Neuroptéridées du Nord de la France*. Thèse de doctorat d'État, Université de Lille, Études géologiques pour l'Atlas de topographie souterraine, HBNPC : 1-344, pl. A-P ; Atlas : pl. I-LXXXIV.
- LAVEINE J.-P. (1967). — Supplément à l'étude des Neuroptéridées du Nord de la France. Figuration complémentaire du *Linopteris regniezi* Laveine. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **LXXXVII** : 211-213, pl. XVIII-XIX.
- CORSIN P., BOUROZ A. & LAVEINE J.-P. (1968). — Le stratotype du Westphalien C dans le bassin houiller du Nord - Pas-de-Calais. Limites et contenu paléontologique. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **266** : 455-460.
- BOUROZ A., CHALARD J., CORSIN P. & LAVEINE J.-P. (1969). — Le stratotype du Westphalien C dans le bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais. Limites et contenu paléontologique. *In* : C.R. 6e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Sheffield 1967), **I** : 99-105.
- LAVEINE J.-P. (1969). — Quelques Pécoptéridinées houillères à la lumière de la palynologie (I). *Pollen et Spores*, **XI** (3) : 619-668, pl. 1-17.
- LAVEINE J.-P. (1970). — Note préliminaire sur les spores *in situ* de quelques Pécoptéridinées houillères. Implications paléobotaniques et stratigraphiques. *Cong. et Coll. Univ. Liège*, **55** : 299-307.
- LAVEINE J.-P. (1970). — Quelques Pécoptéridinées houillères à la lumière de la palynologie (II). *Pollen et Spores*, **XII** (2) : 235-297, pl. 18-38.
- LAVEINE J.-P. (1971). — Sporomorphes *in situ* de quelques Parispermées (Neuroptéridées paripinnées) du Carbonifère. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XCII** (2) : 155-173, pl. X-XXIV.
- BENEST M., FENET B., GUARDIA P., LAVEINE J.-P., LEMOIGNE Y. & THOMAS G. (1971). — Découverte de Westphalien C-D et de Stéphien inférieur ou moyen dans les formations détritiques du Djebel Khar (Oran, Algérie). *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **272** : 1724-1726.
- DOUBINGER J., LAVEINE J.-P. & PONS A. (1972). — La palynologie stratigraphique vue sous l'angle de la paléobotanique et de la botanique. Problèmes de paléoécologie. (Colloque d'Orsay). *Mémoires du BRGM*, **77** : 271-284, pl. 1-3.
- LAVEINE J.-P. (1973). — Découverte d'*Adelophthalmus imhofi* (Reuss), Euryptéridé, dans le bassin houiller de Lorraine. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XCIII** : 249-252, pl. XXXI-XXXII.
- LAVEINE J.-P. (1974). — Précisions sur la répartition des principales espèces du Carbonifère supérieur de Lorraine. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **278** : 851-854.
- LOBOZIAK S., BROUSMICHE C., COQUEL R. & LAVEINE J.-P. (1976). — Recherches paléobotaniques et palynologiques dans le Westphalien supérieur des champs de Marienau et Cocheren, Houillères du Bassin de Lorraine. *In* : Actes du 101^e Congrès national des Sociétés savantes (Lille), **1** : 85-91.
- LAVEINE J.-P., COQUEL R. & LOBOZIAK S. (1976). — Considérations générales sur la phylogénie des Calliptéridiacées. *In* : Actes du 101^e Congrès national des Sociétés savantes (Lille), **1** : 93-104.
- LAVEINE J.-P. (1977). — Report on the Westphalian D. *In* : Symp. on Carboniferous Stratigraphy, Geol. Surv. of Tchechoslovakia (Prague, 1973) : 71-88, pl. I-II, 4 tabl.
- LAVEINE J.-P., COQUEL R. & LOBOZIAK S. (1977). — Phylogénie générale des Calliptéridiacées (Pteridospermopsida). *Geobios*, **10** (6) : 757-847, pl. 1-26.
- LAVEINE J.-P. (1977). — Importance de la compréhension du mode d'architecture de la fronde pour la systématique des Neuroptéridées et des Calliptéridiacées. Implications stratigraphiques. *Col. Pa*, Univ. de Madrid, **31** : 3-6.
- COQUEL R. & LAVEINE J.-P. (1977). — *Alethopteris jankii* nov. sp. du Westphalien C-D du Nord de la France. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XCVIII** : 123-126, pl. XI-XIV.
- LAVEINE J.-P., COQUEL R. & BROUSMICHE C. (1978). — L'espèce *Pecopteris simoni* (Zeiller, 1886-1888), synonyme postérieur de *Palaeoweichselia defrancei* (Brongniart, 1828). *Geobios*, **11** (5) : 755-759, 1 pl.
- BROUSMICHE C. & LAVEINE J.-P. (1982). — Caractères, répartition et synonymie du *Pecopteris avoldensis* (Stur) dans le bassin houiller sarro-lorrain. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **CI** : 51-63, pl. I-IV.
- LAVEINE J.-P. & BROUSMICHE C. (1982). — Documents pour servir à la reconstitution de la fronde chez les Neuroptéridées. *Geobios*, **15** (2) : 243-247, pl. 1.
- FISSUNENKO O.P. & LAVEINE J.-P. (1984). — Comparaison entre la distribution des principales espèces-guides végétales du Carbonifère moyen dans le bassin du Donetz (URSS) et les bassins du Nord - Pas-de-Calais et de Lorraine (France). *In* : C.R. 9^e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Washington, 1979), **I** : 95-100, tabl. 1-3.
- JOSTEN K.H. & LAVEINE J.-P. (1984). — Paläobotanisch-stratigraphische Untersuchungen im Westfal C-D von Nordfrankreich und Nordwestdeutschland. *Fortschritte in der Geologie von Rheinland und Westfalen*, **32** : 89-117, pl. 1-11.
- LAVEINE J.-P., CHAMLEY H., BLIECK A., BOUQUILLON A., CANDILIER A.-M., COMBLE-DESPAQUIS C., CRASQUIN S., DEBRABANT P., DE WEVER P., LETHIERS F., LOBOZIAK S. & STREEL M. (1984). — Recherches stratigraphiques dans le Paléozoïque du Nord de la France. *In* : Programme Géologie Profonde de la France, Première phase d'investigation 1983-1984, Thème 1 (Colloque national, Paris, sept. 1984). *Doc. BRGM*, **81-1** : 15-32.
- BECKARY S. & LAVEINE J.-P. (1985). — Découverte du genre *Medullosa* COTTA dans le Carbonifère du NW de l'Espagne,

- province de Leon. In : C.R. 10^e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Madrid, 1983), 2 : 141-154, 4 fig., 4 pl.
- BROUSMICHE C., COQUEL R., LAVEINE J.-P., LOBOZIAK S. & SETLIK J. (1985). — *Radiitheca dobranyana* n.gen., n.sp., fougère pécoptérienne du Carbonifère, productrice de spores de type *Microreticulatisporites* (Knox) Potonié et Kremp. In : C.R. 9^e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Washington, 1979), 5 : 145-154, 2 fig., 3 pl.
- BROUSMICHE C., COQUEL R., LAVEINE J.-P., LOBOZIAK S. & SETLIK J. (1985). — Les spores de *Pecopteris aspidioides* Sternberg. In : C.R. 9^e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Washington, 1979), 5 : 159-162, 1 pl.
- DELVOLLE J.-J. & LAVEINE J.-P. (1985). — Sur quelques flores du Carbonifère des Pyrénées béarnaises. *Geobios*, 18 (3) : 281-304, 3 fig., 8 pl.
- LAVEINE J.-P. & BROUSMICHE C. (1985). — Observation d'un fragment de tronc probablement de *Neuropteris* au toit de la veine San Juan, Carrière Abeduriu, bassin des Asturies. In : C.R. 10^e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Madrid, 1983), 2 : 137-140, 1 pl.
- LAVEINE J.-P., LETHIERS F., DE WEVER P., WEYANT M., CRASQUIN S., COMBLE C. & BOUQUILLON A. (1985). — Recherches biostratigraphiques concertées dans le Paléozoïque du Nord de la France. In : Programme Géologie Profonde de la France, 2^e phase, BRGM édit. *Doc. BRGM*, 95-1, thème 1 : 15-31.
- LEYVA F., GRANADOS L.F., SOLOVIEVA M.N., LAVEINE J.-P., LYS M., LOBOZIAK S., MARTINEZ DIAZ C., BROUSMICHE C., CANDILIER A.-M. & GARCIA CORTES A. (1985). — La Estratigrafia del Carbonifero Medio en el area Los Tornos-Villoria-Colladona (Sector Oriental de Cuenca Central). In : C.R. 10^e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Madrid, 1983), 1 : 231-248, 6 fig., 3 pl.
- LEYVA F., GRANADOS L.F., SOLOVIEVA M.N., LAVEINE J.-P., LYS M., LOBOZIAK S., MARTINEZ DIAZ C., BROUSMICHE C., CANDILIER A.-M., GARCIA A. & ESNAOLA J.M. (1985). — La Estratigrafia del Carbonifero Medio en la zona de Campo de Caso-Tanes (Sector Central de la region de Mantos). In : C.R. 10^e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Madrid, 1983), 1 : 249-268, 6 fig., 4 pl.
- LEYVA F., GRANADOS L.F., SOLOVIEVA M.N., REITLINGER E.A., MARTINEZ DIAZ C., LAVEINE J.-P., LOBOZIAK S., BROUSMICHE C., CANDILIER A.-M. & HORVATH V. (1985). — La Estratigrafia del Carbonifero Medio en el Sector Central de la Unidad Estructural de la Sobia-Bodon (Cuencas de Quiros-Tevera). In : C.R. 10^e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Madrid, 1983), 1 : 213-230, 2 fig., 4 pl., 3 tabl.
- LUQUE C., GERVILLA M., SAENZ DE SANTA MARIA J.A., LEYVA F., LAVEINE J.-P., LOBOZIAK S. & MARTINEZ CHACON M.L. (1985). — Características sedimentológicas y paleontológicas de los paquetes productivos en el corte de La Inverniza-El Cabo (Cuenca Central Asturiana). In : C.R. 10^e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Madrid, 1983), 1 : 281-302, 2 fig., 3 pl., 2 tabl.
- MARTINEZ DIAZ C., GRANADOS L.F., LAVEINE J.-P., SOLOVIEVA M.N., REITLINGER E.A., GERVILLA M., LOBOZIAK S., BROUSMICHE C., CANDILIER A.-M., PENDAS F. & HORVATH V. (1985). — Aportaciones a la Cronoestratigrafia del Carbonifero Medio de Asturias y nuevos datos para un intento de correlacion de las escalas marinas y continentales. In : C.R. 10^e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Madrid, 1983), 1 : 269-280, 7 fig.
- SAENZ DE SANTA MARIA J.A., LUQUE C., GERVILLA M., LAVEINE J.-P., LOBOZIAK S., BROUSMICHE C., COQUEL R. & MARTINEZ DIAZ C. (1985). — Aportacion al conocimiento estratigrafico y sedimentologico del Carbonifero Productivo de la Cuenca Central Asturiana. In : C.R. 10^e Cong. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Madrid, 1983), 1 : 303-326, 4 fig., 7 pl., 2 tabl.
- LAVEINE J.-P. (1986). — The size of the frond in the genus *Alethopteris* Sternberg (Pteridospermopsida, Carboniferous). *Geobios*, 19 (1) : 49-56, 1 pl.
- ROBARDET M., WEYANT M., LAVEINE J.-P. & RACHEBOEUF P. (1986). — Le Carbonifère inférieur du Synclinal du Cerron del Hornillo (province de Séville, Espagne). *Revue de Paléobiologie*, 5 (1) : 71-90, 3 fig., 4 pl., 2 tabl.
- LAVEINE J.-P. (1987). — Importance of understanding of the architecture of frond for systematics of Neuropteridae and Calopteridiaceae and its stratigraphic implications. *Acta Palaeontologica Sinica*, 26 (1) : 71-79.
- LAVEINE J.-P., avec la collaboration technique de CANDILIER A.-M. (1987). — La flore du bassin houiller du Nord de la France. Biostratigraphie et méthodologie. *Annales de la Société Géologique du Nord*, CVI : 87-93, 2 tabl.
- LAVEINE J.-P., LEMOIGNE Y., LI X., WU X., ZHANG S., ZHAO X., ZHU W. & ZHU J. (1987). — Paléogéographie de la Chine au Carbonifère à la lumière des données paléobotaniques, par comparaison avec les assemblages carbonifères d'Europe occidentale. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, 304 (Série II, 8) : 391-394.
- RICOUR J., BONTE A., LAVEINE J.-P., LEPLAT J. & SOULIEZ G. (1987). — *Découverte géologique du Nord de la France*. Collection Jean Ricour, BRGM édit., 66 p.
- ZHANG S., LAVEINE J.-P., LEMOIGNE Y. & DING H. (1987). — Fossil plants from the Penchi Formation (Carboniferous) in Taiyuan area, Shanxi province, North China. *Revue de Paléobiologie*, 6 (1) : 5-17, 3 fig., 3 pl.
- CLEAL C.J. & LAVEINE J.-P. (1988). — The juvenile frond of the Middle Carboniferous Pteridosperm *Paripteris* Gothan. *Geobios*, 21 (2) : 245-250, 1 pl.
- LAVEINE J.-P. (1989). — Guide paléobotanique dans le terrain houiller sarro-lorrain. *Houillères du Bassin de Lorraine, Mém. spécial* : 154 p., 112 fig., 64 pl.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S. & LEMOIGNE Y. (1989). — Global paleobotany as exemplified by some Upper Carboniferous Pteridosperms. In : *Festschrift Eva Paproth*, vol. 1. *Bulletin de la Société Belge de Géologie*, 98 (2) : 115-125, 3 fig.

- LAVEINE J.-P. (1989). — Fossilisation and systematics of Carboniferous compression floras. *In* : C.R. 11^e Congr. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Beijing, 1987), **3** : 124-127, pl. 1.
- LI X., WU X., ZHANG S., ZHAO X., ZHU W., ZHU J., LAVEINE J.-P. & LEMOIGNE Y. (1989). — Paleogeography of China in Carboniferous time at the light of paleobotanical data, in comparison with Western Europe Carboniferous assemblages. *In* : C.R. 11^e Congr. Intern. Strat. Géol. Carbonifère (Beijing, 1987), **3** : 336-342, 1 fig.
- BABIN C., LAVEINE J.-P., LEMOIGNE Y. & ZHANG S. (1990). — La biostratigraphie du Paléozoïque et le temps. *In* : Journée Louis David. *Documents des Laboratoires de Géologie de Lyon*, **H. S. 9** : 23-44, 5 fig.
- LAVEINE J.-P., LEMOIGNE Y., ZHANG S. & DENG G. (1990). — Sur la ptéridospermée *Paripteris* Gothan, d'un gisement chinois du Carbonifère inférieur. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **310** (Série II) : 1147-1153, pl. I.
- LAVEINE J.-P., LEMOIGNE Y., ZHANG S. & DENG G. (1991). — L'organisation des appareils reproducteurs mâles dans le genre *Paripteris* Gothan 1941 (Ptéridospermée du Carbonifère). *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **312** (Série II) : 573-580, 1 fig., pl. I-II.
- VACHARD D., LAVEINE J.-P., ZHANG S., DENG G. & LEMOIGNE Y. (1991). — Calcareous microfossils (Foraminifers, Algae, Pseudo-algae) from the Uppermost Viséan of Jiu Hu near Guangzhou (Canton), People's Republic of China. *Geobios*, **24** (6) : 675-681, 2 fig., pl. 1.
- ADOUTTE A., ALBAREDE F., BRAHIC A., COPPENS Y., COURTILLOT V., DEVILLERS C., DANCHIN A., DEBRENNE F., DUPLESSY J.-C., GINSBURG L., HEYLER D., JAEGER J.-J., JANVIER P., LAVEINE J.-P., LELIEVRE H., LAURENT G., TAPPONNIER P., TASSY P., VALET J.-P. & VIALOU D. (1992). — Les végétaux fossiles. *In* : "La mémoire de la Terre", Ed. du Seuil : 181-194.
- LAVEINE J.-P., LEMOIGNE Y. & ZHANG S. (1992). — Pangaea, Palaeotethys and *Paripteris*. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **314** (Série II) : 1103-1110, 3 fig., pl. I-II.
- ZHANG S., WANG Q., XIAO Z., LAVEINE J.-P. & LEMOIGNE Y. (1992). — The Permian flora from the Shuangtsüan Formation of the Western Hills of Beijing, North China. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **1** (2^e série) : 173-181, 3 fig., pl. VII-IX.
- LAVEINE J.-P. (1993). — The distribution of Eurasiatic late Paleozoic floras : a main tool for paleogeographic relationships. *In* : Proc. Intern. Symp. on Biostratigraphy of Mainland Southeast Asia : Facies & Paleontology (Chiang-Mai, Thailand, 1993), **II** : 347-359, 3 fig.
- ZHANG S., HUO F., CAO J., LIU Z., LAVEINE J.-P. & LEMOIGNE Y. (1993). — The Carboniferous flora of the Zhongning district, Ningxia Region, North China. *Revue de Paléobiologie*, **Volume spécial n° 6** [1992] : 1-93, 11 fig., 29 pl.
- ZHANG S., HUO F., CAO J., LIU Z., XIAN S., LAVEINE J.-P. & LEMOIGNE Y. (1993). — A Lower Permian florule from the Baiyazi area, Alxa Zuoqi, Southwestern Inner Mongolia, North China. *Revue de Paléobiologie*, **Volume spécial n° 6** [1992] : 95-112, 4 fig., 3 pl.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S., LEMOIGNE Y. & DENG G. (1993). — The Carboniferous flora of the Huaxian area near Guangzhou, Guangdong Province, South China. *Revue de Paléobiologie*, **Volume spécial n° 6** [1992] : 113-148, 4 fig., 10 pl.
- LAVEINE J.-P., BELHIS A., LEMOIGNE Y. & ZHANG S. (1993). — Frond architecture in the genera *Neuraethopteris* Cremer, *Alethopteris* Sternberg and *Lonchopteris* Brongniart (Carboniferous pteridosperms). *Revue de Paléobiologie*, **Volume spécial n° 6** [1992] : 149-166, 3 fig., 3 pl.
- GOGANOVA L.A., LAVEINE J.-P., LEMOIGNE Y. & DURANTE M. (1993). — General characteristics of the Carboniferous Pteridosperm *Cardioneuropteris* Goganova *et al.*, from the Uppermost Viséan strata of Kuucheku colliery near Karaganda, Central Kazakhstan, CIS. *Revue de Paléobiologie*, **Volume spécial n° 6** [1992] : 167-219, 10 fig., 19 pl.
- LAVEINE J.-P., RATANASTHIEN B. & SITIRACH S. (1993). — The Carboniferous flora of Northeastern Thailand: its paleogeographic importance. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **317** (Série II) : 279-285, 2 fig., 1 pl.
- LAVEINE J.-P., LEMOIGNE Y. & ZHANG S. (1993). — General characteristics and paleobiogeography of the Parispermaceae (genera *Paripteris* Gothan and *Linopteris* Presl), Pteridosperms from the Carboniferous. *Palaeontographica*, Abt. B, **230** (1-6) : 55-113, 20 fig., 15 pl.
- GOGANOVA L., LAVEINE J.-P., LEMOIGNE Y. & DURANTE M. (1993). — Frond architecture, its importance for paleobiogeography and evolution: The example of *Cardioneuropteris* nov. gen., Carboniferous Pteridosperm from the Upper Viséan of Kazakhstan. *In* : C.R. 12^e Congr. Intern. Strat. Géol. Carbonifère et Permien (Buenos Aires, 1991), **2** : 41-60, 2 fig., 5 pl.
- LAVEINE J.-P. (1993). — Frond architecture, phyllotaxy and general habit of some representatives of the genus *Eusphenopteris* Simson-Scharold, Carboniferous Pteridosperm. *In* : C.R. 12^e Congr. Intern. Strat. Géol. Carbonifère et Permien (Buenos Aires, 1991), **2** : 73-88, 5 pl.
- LAVEINE J.-P., LEMOIGNE Y. & ZHANG S. (1993). — The importance of the distribution of some Eurasiatic Carboniferous plants for paleogeographic reconstructions. *In* : C.R. 12^e Congr. Intern. Strat. Géol. Carbonifère et Permien (Buenos Aires, 1991), **2** : 89-106, 3 fig., 4 pl.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S. & LEMOIGNE Y. (1994). — The Paleogeographic distribution of the *Parispermaceae* : an answer to the papers by Li Xing-xue, Shen Guang-long and Wu Xiu-yuan, entitled : "First appearance of *Paripteris* and their migration and dispersion" and by Wu Xiu-yuan and Shen Guang-long, entitled : "Preliminary study of the migration and dispersion of Neuropterids". *Geobios*, **27** (4) : 395-401.
- LAVEINE J.-P., RATANASTHIEN B. & SITIRACH S. (1994). — The Carboniferous flora of Na Duang coal mine, northeastern

- Thailand. Its paleogeographic interest. *In* : IGCP Project 306, Proc Intern. Symposium on Stratigraphic Correlation of Southeast Asia (Bangkok, Nov. 1994) : 83-90.
- LAVEINE J.-P. (1995). — Paul Bertrand (1879-1944): French paleobotanist. *Geological Society of America Memoirs*, **185** (W.C. Darrah volume) : 99-117, 21 fig.
- LAVEINE J.-P. & GOUBET P. (1995). — Mise au point sur *Palaeoweichselia defrancei* (Ptéridospermée du Carbonifère), à partir d'un bel échantillon récolté dans le bassin houiller du Nord de la France. *Sciences géologiques, Bulletin*, **48** : 21-47, 5 fig., 3 pl.
- LAVEINE J.-P. (1996). — Végétaux vasculaires. *In* : DELVOLVE J.-J., Chapitre Carbonifère à faciès Culm. *Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées*. Édition BRGM - ITGE, **1** : 310.
- LAVEINE J.-P. (1996). — Confirmation of the bifurcate semi-pinnate model of frond architecture for a historical specimen of *Laveineopteris rarinervis* (Bunbury, 1847), Upper Carboniferous pteridosperm. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **322** (Série II a) : 483-492, 3 fig., 2 pl.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S., LEMOIGNE Y., AN D., ZHENG Q. & CAO J. (1996). — The Upper Paleozoic floras of Hotan area (Xinjiang Province, Northwest China), and their paleogeographical significance. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences, Paris*, **322** (Série II a) : 781-790, 4 fig., 2 pl.
- LAVEINE J.-P. & BLANC C. (1996). — L'holotype « perdu » de *Neuropteris heterophylla*, espèce-type du genre *Neuropteris* (Ptéridospermée du Carbonifère) : un spécimen retrouvé qu'il convient de vite oublier. *Geobios*, **29** (2) : 137-147, 2 pl.
- CLEAL C.J., LAVEINE J.-P. & SHUTE C.H. (1996). — Architecture of the Upper Carboniferous Pteridosperm frond *Macroneuropteris macrophylla*. *Palaeontology*, **39** (3) : 561-582, 4 fig., 4 pl., 1 tabl.
- LAVEINE J.-P. (1997). — Synthetic analysis of the Neuropterids. Their interest for the decipherment of Carboniferous palaeogeography. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **95** (1-4) : 155-189, 22 fig.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S., LEMOIGNE Y. (1997). — L'importance de l'approche qualitative en paléontologie : l'exemple des « Neuroptéridées » (ptéridospermées du Carbonifère). Quelques implications. *Geobios, Mém. spéc.* **20** : 315-329, 6 fig.
- LAVEINE J.-P. (1998). — Proposal to conserve the name *Neuropteris* (fossil plants) with a conserved spelling and ultimate type. *Taxon*, **47** : 451-452.
- CLEAL C.J., LAVEINE J.-P. & SHUTE C.H. (1998). — Further observations on the Upper Carboniferous Pteridosperm frond *Macroneuropteris macrophylla*. *Palaeontology*, **41** (3) : 383-386, 1 pl.
- IZART A., VASLET D., BRIAND C., BROUTIN J., COQUEL R., DAVYDOV V., DONSIMONI M., EL WARTITI M., ENSEPBÆV T., GELUK M., GOREVA N., GÖRÜR N., IQBAL N., JOLTAEV G., KOSOVAYA O., KRAINER K., LAVEINE J.-P., MAKHLINA M., MASLO A., NEMIROVSKAYA T., KORA M., KOZITSKAYA R., MASSA D., MERCIER D., MONOD O., OPLUSTIL S., SCHNEIDER J., SCHÖNLAUB H., STSCHEGOLEV A., SÜSS P., VACHARD D., VAI G.B., VOZAROVA A., WEISSBROD T. & ZDANOWSKI A. (1998). — Stratigraphic correlations between the continental and marine Tethyan and Peri-Tethyan basins during the Late Carboniferous and the Early Permian. *In*: CRASQUIN-SOLEAU S., IZART A., VASLET D. & DE WEVER P. eds, Peri-Tethys : stratigraphic correlations 2. *Geodiversitas*, **20** (4) : 521-595, 8 fig., 62 logs.
- LAVEINE J.-P., LEGRAND L. & DUQUESNE H. (1998). — Morphological analysis of the « bifurcate semi-pinnate » frond architecture of the Carboniferous pteridosperm *Laveineopteris rarinervis*, with the support of some recently discovered specimens. *Revue de Paléobiologie*, **17** (2) : 381-443, 15 fig., 15 pl.
- LAVEINE J.-P., RATANASTHIEN B. & HUSSIN A.H. (1999). — The Carboniferous floras of Southeast Asia: Implications for the relationships and timing of accretion of some Southeast Asian blocks. *In* : METCALFE I. ed., Gondwana Dispersion and Asian Accretion. IGCP 321 Final Results Volume: 229-246, 6 fig.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S., LEMOIGNE Y. & RATANASTHIEN B. (1999). — Paleogeography of East and Southeast Asia during Carboniferous times on the basis of paleobotanical information: some methodological comments and additional results. *In*: RATANASTHIEN B. & RIEB S.L. eds, Proc. Intern. Symp. on Shallow Tethys (ST) 5 (Chiang Mai, Thailand, 1-5 February, 1999): 55-72.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S. & LEMOIGNE Y. (2000). — Paleophytogeography and Paleogeography on the basis of examples from the Carboniferous. *Revue de Paléobiologie*, **19** (2) : 409-425, 2 fig.
- JOSTEN K.H., LAVEINE J.-P. & VAN AMEROM H.W.J. (2001). — Eine Calamiten-Modifikation aus dem Oberkarbon. *Geologie und Paläontologie Westfalen*, **58** : 67-85, 2 fig., 7 pl.
- LAVEINE J.-P., DIMICHELE W.A. (2001). — The qualitative approach for Carboniferous plant taxonomic analyses: implications of the *Linopteris-Reticulopteris* distinction. *Revue de Paléobiologie*, **20** (2) : 415-433, 1 fig., 3 pl.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S. & LEMOIGNE Y. (2003). — Apports des études paléobotaniques dans le bassin houiller du Nord - Pas-de-Calais aux reconstitutions paléogéographiques du Carbonifère. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **10** (2^e série) : 111-134.
- LAVEINE J.-P. & AZHAR H.H. (2003). — The Carboniferous flora of Eastern Peninsular Malaysia. *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 811-830, fig. 1-6, pl. 1-5.
- LAVEINE J.-P., RATANASTHIEN B. & SITIRACH S. (2003). — The Carboniferous flora of Northeastern Thailand. *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 761-797, fig. 1-8, pl. 1-12.
- LAVEINE J.-P., VACHARD D., RATANASTHIEN B. & SITIRACH S. (2003). — The Lower Carboniferous Na Duang Marine Band (Na Duang Coal Mine, Loei District, Northeastern Thailand). *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 799-809, fig. 1-2, pl. 1-3.



- LAVEINE J.-P., ZHANG S., HUANG H., ZHANG M., LIU L. & LEMOIGNE Y. (2003). — Carboniferous fossil plants from Northern Guangxi Zhuang Autonomous Region, South China. *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 733-751, fig. 1-10, pl. 1-3.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S. & LEMOIGNE Y. (2003). — General conclusions and references. *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 831-849, fig. 1.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S., LIU L., AN D., ZHENG Q., CAO J. & LEMOIGNE Y. (2003). — The late Paleozoic floras of the Hotan area (Xinjiang Uygur Autonomous Region, Northwest China), and their palaeogeographical significance. *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 473-559, fig. 1-9, pl. 1-20.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S., LIU L., GU F., LIU Y., WEN J. & LEMOIGNE Y. (2003). — The Late Carboniferous flora of the Delingha area (Wulan County, Qinghai Province, Northwest China). *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 567-651, fig. 1-11, pl. 1-28.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S., LIU L., WU Q. & LEMOIGNE Y. (2003). — On the occurrence of the genus *Paripteris* Gothan in the Carboniferous section of Pijiao (Changting District, Fujian Province, South China). *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 721-731, fig. 1-7, pl. 1-2.
- LAVEINE J.-P., ZHANG S., LIU L., ZHAO B., PAN X., CAO J., LIU Z. & LEMOIGNE Y. (2003). — The Late Carboniferous flora of the Hulstai area (Alxa Zuoqi Banner, Inner Mongolia Autonomous Region, North China). *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 661-716, fig. 1-8, pl. 1-16.
- VACHARD D., LAVEINE J.-P., ZHANG S., HUANG H., ZHANG M., LIU L. & LEMOIGNE Y. (2003). — A rich assemblage with *Eoparastaffella* (Foraminifera) from the Lower Visean Cf4 β (Mississippian) of Tianshui area (Guangxi Zhuang Autonomous Region, South China). *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 753-758, fig. 1-2, pl. 1.
- VACHARD D., LAVEINE J.-P., ZHANG S., LIU L., ZHAO B., PAN X., CAO J., LIU Z. & LEMOIGNE Y. (2003). — Some Pennsylvanian-Cisuralian (Carboniferous-Permian) assemblages from the Hulstai area (Alxa Zuoqi Banner, Inner Mongolia Autonomous Region, North China). *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 717-720, pl. 1.
- VACHARD D., LAVEINE J.-P., ZHANG S., LIU L., AN D., ZHENG Q., CAO J. & LEMOIGNE Y. (2003). — Pennsylvanian and Cisuralian (Carboniferous/Permian) carbonate microfossils from the Hotan area (Xinjiang Uygur Autonomous Region, Northwest China), biostratigraphic implications. *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 561-565, pl. 1-2.
- VACHARD D., LAVEINE J.-P., ZHANG S., LIU L., GU F., LIU Y., WEN J. & LEMOIGNE Y. (2003). — Some assemblages of foraminifera, algae and pseudoalgae from the Keluke Formation (Delingha area, Wulan County, Northwest China), and their dating. *Revue de Paléobiologie*, **22** (2) : 653-659, pl. 1-2.
- LAVEINE J.-P. (2005). — The *Cyclopteris* of *Laveineopteris* (Late Carboniferous pteridosperm). Fancies and facts: methodological and taxonomical implications. *Revue de Paléobiologie*, **24** (2) : 403-487, fig. 1-3, pl. 1-23.
- LAVEINE J.-P., KAHLERT E. & SCHULTKA S. (2005). — Frond architecture of two remarkable specimens of the pteridosperm *Laveineopteris rarinervis* from the Late Carboniferous (early Westphalian D) of Piesberg near Osnabrück (Germany): morphological implications. *Revue de Paléobiologie*, **24** (2) : 489-504, fig. 1-2, pl. 1-5.
- LYONS P.C. & Laveine J.-P. (2005). — Association of entire orbicular cyclopterids with *Neuropteris ovata* pinnate foliage from the Late Pennsylvanian (Stephanian) of West Virginia, USA: taxonomical implications. *Revue de Paléobiologie*, **24** (2) : 505-514, pl. 1-4.
- LAVEINE J.-P. (2007). — *La formation du charbon*. Catalogue de l'Exposition Pays'âges, Musée d'Histoire naturelle de Lille : 27-39., fig. 1-25.
- LAVEINE J.-P. & BELHIS A. (2007). — Frond architecture of the seed-fern *Macroneuropteris scheuchzeri*, based on Pennsylvanian specimens from the Northern France coal field. *Palaeontographica*, Abt. B, **277** (1-4) : 1-41., fig. 1-7, pl. 1-19.
- LAVEINE J.-P. (2008). — Detailed information on the frond characteristics of the Carboniferous pteridosperm *Neuropteris heterophylla*, type species of the genus *Neuropteris*. *Palaeontographica*, Abt. B, **278** (4-6) : 71-110., fig. 1-7, pl. 1-16.
- LAVEINE J.-P. & LEGRAND L. (2008). — The degree of foliar-laminate segmentation of the Pennsylvanian seed-fern *Macroneuropteris scheuchzeri*. *Revue de Paléobiologie* : **27** (2) : 469-474.
- LAVEINE J.-P. (2009). — Errata - Detailed information on the frond characteristics of the Carboniferous pteridosperm *Neuropteris heterophylla*, type species of the genus *Neuropteris*. *Palaeontographica*, Abt. B, **279** (1-6) : 123.
- LAVEINE J.-P. & BECKARY S. (2009). — Des terrils dans le paysage : pourquoi ? In : ROBASZYNSKI F. & GUYETANT G. coord., *Des roches aux paysages dans le Nord – Pas-de-Calais. Richesse de notre patrimoine géologique*. Conservatoire des Sites Naturels du Nord et du Pas-de-Calais & Société Géologique du Nord édit. : 104-109.
- LAVEINE J.-P. & OUDOIRE T. (2009). — Bifurcation of the *Alethopteris* frond. *Revista Española de Paleontología*, **24** (2) : 121-131, fig. 1-5, Valencia.
- LAVEINE J.-P., RATANASTHIEN B., SITIRACH S. & DEMARQUE D. (2009). — The Carboniferous flora of northeastern Thailand: additional documentation from the Na Duang-Na Klang basin. *Revue de Paléobiologie*, **28** (2) : 315-331, pl. 1-6.
- LAVEINE J.-P. & DELBECQUE S. (2011). — The bifurcate “outer” semi-pinnate frond of the seed-fern *Barthelopteris germarii*, based on Late Pennsylvanian specimens from the Blanzey-Montceau basin, Massif Central, France. *Palaeontographica*, Abt. B, **287** (1-6) : 1-55, fig. 1-4, pl. 1-13.

- LAVEINE J.-P., avec la collaboration technique de J. CUVELIER (2011). — Jacques Chalard (1921-2010). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **18** (2^e série): 3-9.
- LAVEINE J.-P. & DUFOUR F. (2013). — The bifurcate “outer-inner” semi-pinnate frond of the Permo-Pennsylvanian seed-fern *Neurodopteris auriculata*, type species of the genus *Neurodopteris*. *Palaeontographica*, Abt. B, **289** (4-6) : 75-137, fig. 1-5, pl. 1-14.
- LAVEINE J.-P. & OUDOIRE T. (2015). — Partial alopecia for the Permo-Pennsylvanian seed-fern *Macroneuropteris scheuchzeri*. *Review of Palaeobotany and Palynology*, **216** : 132-142, pl I-V.
- LAVEINE J.-P. & OUDOIRE T. (2016). — Morphological analysis of the Grand'Eury 1890 large frond fragment attributed to *Odonopteris reichiana*, from the Late Pennsylvanian (Stephanian) of the Gard coalfield (SE of Massif Central, France). Morphological and taxonomical considerations on the odontopterids. Erection of *Cyrillopteris* gen. nov. *Palaeontographica*, Abt. B, **294** (1-4) : 1-83, fig. 1-2, pl. 1-20.
- LAVEINE J.-P., OUDOIRE T. & CUVELIER J. (2016). — André Dalinval (1920-2015). *Annales de la Société Géologique du Nord*, **23** (2^e série) : 65-68.
- LAVEINE J.-P. & LEGRAND L. (2019). — Some Late Paleozoic medullosans substantiate the bifurcate semi-pinnate model of frond architecture. Reconstructing the frond of the genus *Mixoneura*. *Palaeontographica*, Abt. B, **299** (1-6) : 1-101, figs 1-7, pl. 1-23.

LISTE DES MEMBRES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

Arrêtée au 2 septembre 2020, établie par Fabien GRAVELEAU et Didier TORZ

Membres à perpétuité

Voir la note parue dans le tome 19 (2^e série) des *Annales* (2012), p. 175

Membres à vie (Présidents d'Honneur)

BRICE Denise, chercheuse émérite, Université Catholique de Lille – FLST & ISA, à Lille (59)

ROBASZYNSKI Francis, Géologue, Professeur honoraire, Polytech'Mons (Belgique)

Membres titulaires/personnes morales

ACOM France, Association des Communes Minières de France, Liévin (62)

AGENCE DE L'EAU Artois-Picardie, Etablissement Public, Douai (59)

APBG, Association des Professeurs de Biologie et Géologie (enseignants du second degré), Sibiville (62)

BDE Géosciences Lille, Villeneuve d'Ascq (59)

BRGM/DPSM - Nord – BRGM Hauts de France, EPIC, Lesquin (59)

CDP Consulting, Entreprise, Blois (41)

CCI Grand Lille, Lille (59)

Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement (CAUE) du Nord, Lille (59)

EGEE Développement, Villeneuve d'Ascq (59)

MRES, Maison Régionale de l'Environnement et des Solidarités, Lille (59)

UNICEM, Union nationale des industries de carrières et matériaux de construction, Hauts de France, Arras (62)

Membres titulaires/personnes physiques

AMEDRO Francis, Retraité, Professeur de SVT, Calais (62)

AUGUSTE Patrick, Paléontologue – Archéozoologiste, Chargé de recherche CNRS, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)

AVERBUCH Olivier, Géologue structuraliste - Maître de conférences, Université de Lille, Cité scientifique, Département Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)

BAELE Jean-Marc, Professeur de Géologie, Université de Mons (Belgique)

BAILLON Christophe, Ingénieur, Lille (59)

BALESCU Sanda, Maître de conférences, Géologie du Quaternaire, Université de Lille, Cité scientifique, Département Géographie & Aménagement, Villeneuve d'Ascq (59)

BARROIS Charles, Etudiant en droit - Université Paris 1 - Panthéon Sorbonne (75)

BEAUCHAMP Niniane, Technicienne Gestion Administrative, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)

BECCALETTO Laurent, Géologue, BRGM, St Hilaire St Mesmin (45)

BECKARY Sophie, Service du développement durable, Ville de Lille (59)

BELIN Jean-Jacques, Retraité de la Société Filtres et crépines Johnson, Nomain (59)

BERNARD Renaud, Analyste en Cyber-Sécurité, Lille (59)

BERREHOUC Géraldine, Ingénieure en risques naturels, Ile Tudy (29)

BEUCHERIE Arnaud, Professeur de SVT, Grande Synthe (59)

BEUN Noël, Retraité, Maître de conférences, Université de Picardie Jules Verne, Salouël (80)

BLANDIN Marie-Christine, Retraîtée - Sénatrice honoraire du département du Nord

BLIECK Alain, Retraité, Paléontologue - directeur de recherche émérite CNRS, Haubourdin (59)

BOITEL Laurence, Professeure agrégée de lettres, Villeneuve d'Ascq (59)

BOIVIN Clément, Etudiant, Université de Montpellier, Montpellier (34)

BONAVENTURE Maryse, Retraîtée, Professeure de SVT, Berck-s/Mer (62)

BONAVENTURE Patrick, Retraité, Pharmacien, Berck-s/Mer (62)

BONNIERE Antoine, Etudiant, Master Géosciences, Université de Lille (59)

BOSTYN Dominique, Retraîtée, Professeure de SVT, Gravelines (59)

BOUSSIN Jean-Marie, Technicien Carrière Souterraine, Ville de Lille

BOUTON Pascal, Géologue, gérant d'Oolite SARL, Monnières (44)

† BRETON Gérard, Retraité, conservateur du patrimoine, Le Havre (76)

BROQUET Paul, Retraité, Professeur honoraire, Université de Franche-Comté, Besançon (25)

BUDZIK Edmond, Consultant – ex-Directeur de société, Schistes du Nord et du Pas-de-Calais (SNPC)

BUR Nicolas, Maître de conférences, Polytech Lille, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)

CAPELLE Hervé, Géologue, Genech (59)

CAPETTE Ludovic, Hydrogéologue, Namur (Belgique)

CHARLET Jean-Marie, Retraité, Professeur émérite, Polytech'Mons, Mons (Belgique)

CHELLAI El Hassane, Professeur, Université Cadi Ayyad, Marrakech (Maroc)

COEN-AUBERT Marie, Chercheuse, Institut royal des Sciences naturelles de Belgique (IRSNB), Bruxelles (Belgique)

CORDIER Patrick, Professeur, Université de Lille, Cité scientifique, Département de Physique, Villeneuve d'Ascq (59)

COULON Hervé, Géologue, Département Déplacements Aménagement Territoires et Habitat (DATHa), Cerema Hauts de France, Lille (59)

CREPIN Benoît, Journaliste Scientifique Indépendant, Lille (59)

CUVELIER Jessie, Ingénieure d'étude CNRS, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)

DAMBRINE Jean-Michel, Retraité, Professeur de SVT, Lambres-lez-Douai (59)

DANELIAN Taniel, Professeur de Paléontologie, Université de Lille, Département des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)

DE BAERE Jean-Pierre, Retraité, Géologue, Centre d'Etudes Techniques de l'Équipement (CETE Nord-Picardie), Lambersart (59)

DECROUEZ Danielle, Retraîtée, Géologue, Directrice Honoraire du Muséum Genève (Suisse)

- DELFOLIE Gérard, Médiateur des Sciences, Responsable CSTI, Médiathèque d'Agglomération de Cambrai (59)
- DELVAL Thierry, Enseignant de SVT, Lycée Jean Monnet, Crépy en Valois (60)
- DESCHODT Laurent, G oarch ologue, INRAP, Mons-en Bar eul (59)
- DEVAERE L a, Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche, Université de Lille, Cité scientifique, Département des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- DE WEVER Patrick, Retraité, Professeur  m rite, Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN), Paris
- DOFFE Michel, Retraité, Enseignant, Seclin (59)
- DRON Pierre, Professeur de SVT retraité, Rumigny (80)
- DUCHAUSOIS François, Retraité, Professeur de SVT, Neuville-Saint-Amand (02)
- DUCHEMIN Renée, Retrait e, Inspectrice d'Académie - Inspectrice Pédagogique Régionale honoraire, Académie de Lille, Lille (59)
- DUCROS Maxence, Master de paléontologie des vertébrés, Université Poitiers-Montpellier.
- DUPUIS Christian, Retraité, Professeur Emérite, Polytech'Mons, Mons (Belgique)
- EL KHATTABI Jamal, Maître de conférences, Hydrogéologue, Université de Lille, Cité scientifique, Polytech'Lille, Villeneuve d'Ascq (59)
- ESSAMOUD Rachid, Professeur de Géologie, Université Hassan II, Casablanca (Maroc)
- FERRANDON Alain, Retraité, Paris (75)
- FERRIERE Jacky, Retraité, Professeur  m rite, Université de Lille, Cité scientifique, Département Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- FORESTIER-ROUGET Marie-Nathalie, Professeure Agrégée de SVT, Ecques (62)
- GADEN Jean-Luc, Retraité, Hydrogéologue du Centre d'Etudes et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement (CEREMA), Marcq-en-Bar eul (59)
- GAULLIER Virginie, Professeure, Géologie marine, Université de Lille, Cité scientifique, Département des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- GIGAUX Alain, Retraité, Professeur de SVT, vice-président APBG, Sibiville (62)
- GIROUX Françoise, Retrait e, Professeur de SVT, Lompret (59)
- GOEMAERE Éric, Géologue, Service Géologique de Belgique, Bruxelles (Belgique)
- GOMEZ Gustave, Retraité, Calonne-sur-la-Lys (62)
- GRAVELEAU Fabien, Maître de conférences, Géologie structurale, Université de Lille, Cité scientifique, Département des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- GREVET Nicolas, Inspecteur d'Académie, Inspecteur Pédagogique Régional, Wanquetin (62)
- GUILLOT François, Retraité, Chercheur associé, Université de Lille, Cité scientifique, Département Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- GUYETANT Gaëlle, Chargée de mission patrimoine géologique, Conservatoire d'Espaces Naturels du Nord et du Pas-de-Calais, Lillers (62)
- HAMELIN Arnaud, Géologue, Groupe Carrières du Boulonnais, Boulogne-s/Mer (62)
- HAUTIER Blandine, Etudiante, Master Géosciences, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)
- HENNION Marie, Technicienne, Biogéosciences, Université de Bourgogne, Dijon (21)
- HENNION Marina, Etudiante, Master Géosciences, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)
- HOFMANN Annette, Maître de conférences, Hydrochimie, Université de Lille, Cité scientifique, Département des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- HOUSEN Pierre, Retraité, Industrie Cimentiere - HOCLIN, Casteau-Soignies (Belgique)
- IMBENOTTE Christine, Professeure de SVT, Directrice adjointe Institution de la Croix Blanche, Bondues (59)
- JABER Maysa, Etudiante, Master Géosciences, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)
- LACQUEMENT Frédéric, Géologue, BRGM, Viglain (45)
- LASSERRE Emilie, jardinière et animatrice, Association la Maison du Jardin   Roubaix (59)
- LAURENT Aurore, Doctorante, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)
- LAUWERS Alain, Géologue, Société Lhoist, Bouge (Belgique)
- † LAVEINE Jean-Pierre, Retraité, Professeur de paléobotanique, Université de Lille, Conservateur universitaire au Musée d'histoire naturelle de Lille (59)
- LECOMTE Justin, Chargé d'études en Hydrogéologie, CEREMA, Sequedin (59)
- LEGRAND Jean-Marc, Retraité, Cappelle-Brouck (59)
- LEGRAND Marie France, Retrait e, Cappelle-Brouck (59)
- LEGRAND Philippe, Ingénieur, Lempdes (63)
- LEGRAND Philippe, Retraité, Ingénieur géologue, Exploration pétrolière, Gradignan (33)
- LEGRAND Victor, Etudiant, Calais (62)
- LEGRAND-BLAIN Marie, Retraité, Paléontologue, Gradignan (33)
- LEMOINE Guillaume, Géologue, Ecologue, Etablissement Public Foncier du Nord – Pas-de-Calais, Euralille (59)
- LEPLAT José, Retraité, Géologue, BRGM, Linselles (59)
- LESAGE Francis, Retraité, Instituteur, membre de la FFAMP, Steenwerck (59)
- LIMOGES Chloé, Etudiante, Master Géosciences, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)
- LLORET Emily, Maître de conférences, Géochimie, Université de Lille, Cité scientifique, Département des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- LOONES Christian, Retraité, Secteur hospitalier, Loos (59)
- LOUCHE Barbara, hydrogéologue, Maître de conférences, Hydrogéologie, Université d'Artois, Lens (62)
- MAITTE Bernard, Retraité, Professeur  m rite, Historien des sciences et cristallographe, Université de Lille, Cité scientifique, Département de Physique, Villeneuve d'Ascq (59)
- MANIA Jacky, Retraité, Professeur honoraire, Polytech'Lille , Université Lille, Pouilley-les-Vignes (25)
- MARECHAL Christine, Professeure des écoles, Coudekerque-Branche (59)
- MATRION Bertrand, Paléontologue, Br viandes (10)
- MAVEL Joris, Hydrogéologue, Chef de Projet Sciences Environnement, Besançon (25)

- MEILLIEZ Francis, Retraité, Professeur émérite, Université de Lille, Cité scientifique, Département des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- MOKHTARI Mokhtar, Etudiant, Licence de SVT, Université de Lille (59)
- MONGIN Pierre, Retraité, Marcq-en-Barœul (59)
- MONNET Claude, Ingénieur de recherche, paléontologue, Université de Lille, Cité scientifique, Département des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- MOREELS Christine, Professeure de SVT, Willems (59)
- MORTIER Thierry, Chercheur associé, Polytech'Mons à Mons (Belgique)
- MOUFLIH Mustapha, Professeur de Géologie, Université Hassan II, Casablanca (Maroc)
- MOULLET Jean-Marc, Inspecteur pédagogique national, La Madeleine (59)
- MOZIN Corentin, Etudiant, Master 3G, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)
- NICOLLIN Jean-Pierre, Professeur de Géologie, Paléontologie, Université Catholique de Lille – FLST & ISA, Lille (59)
- NICOLLIN Sylvie, Professeure de SVT, La Madeleine (59)
- NOBLE Caroline, Etudiante, DEUST, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)
- NOLF Dirk, Retraité, IRSNB, Bruxelles (Belgique)
- NUTTEN Claire, Spycker (59)
- NUTTEN Jean-Marc, Instituteur spécialisé, Spycker (59)
- NUTTEN Jean-Bernard, Etudiant, Master, Université de Bretagne occidentale (UBO), Quimper (29)
- OUALI MEHADJI Abdelkader, Enseignant-chercheur, Université d'Oran (Algérie)
- OUDOIRE Thierry, Conservateur du patrimoine, Musée d'Histoire Naturelle de Lille, Lille (59)
- PAGNIER Grégoire, Professeur de SVT, Charleville-Mézières (08)
- PENISSON Jean-Pierre, Président de la Société d'Histoire Naturelle des Ardennes, Bogny-s/Meuse (08)
- PICHARD Olivier, Directeur d'étude Biodiversité, CEREMA, Saint-André-lez-Lille (59)
- PICKAERT Ludivine, Responsable Service ressource en Eau - NOREADE, Bourghelles (59)
- PINTE Pierre, Géologue, Responsable Q.S.E. Industries, Eiffage Travaux Publics Est, Noyelles-Godault (62)
- PLOUVIN Valérie, Responsable Administrative de l'UMR 8187 LOG, Escalles (62)
- PONCELET Mathieu, Etudiant Master, Université de Lille, Cité scientifique, Villeneuve d'Ascq (59)
- POTY Edouard, Professeur de Géologie, Université de Liège, au Sart Tilman, Liège (Belgique)
- PRUD'HOMME Agnès, Professeure agrégée (PRAG), Université de Lille, Cité scientifique, Département des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- PRUVOST Luc, Retraité, Enseignant SVT, Bouvigny-Boyeffles (62)
- † QUESNEL Bernard, Retraité, Enseignement technique, Audruicq (62)
- REYNAUD Jean-Yves, Professeur, Sédimentologie-Stratigraphie, Université de Lille, Cité scientifique, Département des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- ROBITAILLE Yves, Retraité, Groupe Carrières du Boulonnais, Ferques (62)
- ROHART Jean-Claude, Retraité, Professeur de SVT, Dunkerque (59)
- ROUGE Jacques, Retraité, Ingénieur ENSG, Lompref (59)
- SARRAZIN MICHAUX Nadine, Retraîtée, Enseignante SVT, Mouvaux (59)
- SCHIETTECATTE Jean, Retraité, Géologue pétrolier du Groupe Shell, Mouvaux (59)
- STYZA André, Ingénieur automaticien, Formateur au Campus Véolia Nord Europe, Lomme (59)
- SWIALKOWSKI Mickaël, Professeur de SVT, Leforest (62)
- SYLVAIN Romain, Etudiant, Licence Géosciences, Université de Lille, (59)
- THONON Marc, PDG OKENITE Animation, Villacerf (10)
- TORZ Didier, retraité, Directeur technique, Wasquehal (59)
- TRENTESAUX Alain, Professeur, Université de Lille, Cité scientifique, Département des Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq (59)
- VACHARD Daniel, retraité, Paléontologue, CNRS, Gruson (59)
- VANDENBERGHE Noël, Retraité, Professeur émérite, Katholieke Universiteit Leuven (Belgique)
- VANDYCKE Sara, Chercheuse, Géologue, FNRS, Polytech'Mons, Mons (Belgique)
- VAN WELDEN Aurélien, Senior Geologist CGG Multiclient & New Ventures Scandinavia, Oslo (Norvège)
- VENISSE Nolwenn, Etudiante, ENS Paris, Paris (75).
- VERGNE Virginie, Maître de conférences, Université de Lille, Cité scientifique, Département de Géographie & Aménagement, Villeneuve d'Ascq (59)
- VERNIERS Jacques, Retraité, Paléontologue, Professeur, Universiteit Gent, Gand (Belgique)
- VILAPLANA José, Retraité, Hoymille (59)
- VREULX Michel, Professeur de SVT, Lille (59)
- YANS Johan, Professeur de Géologie, Département de géologie, Université de Namur (Belgique)
- ZERHOUNI Youssef, Professeur de Géologie, Université Hassan II, Casablanca (Maroc)

CATALOGUE DES ÉDITIONS DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD (*)

En vente au siège de la Société ou expédiées par courrier

Annales de la Société Géologique du Nord

La vente s'effectue par tomes entiers aux prix suivants, jusqu'à épuisement du stock. Seuls les fascicules thématiques sont en vente séparément (voir ci-dessous).

<u>Chaque Tome ordinaire des Annales</u> (dans la limite de disponibilité des anciens numéros)	10 €
<u>La série complète des Annales</u> (dans la limite de disponibilité des anciens numéros)	120 €

Tables générales des Annales, des Mémoires et des Publications de la SGN

Table 1 (Tomes I à XX), Table 2 (Tomes XXI à XXX), Table 3 (Tomes XXXI à XL), Table 4 (Tomes XLI à LXXIX), Table 5 (Tomes LXXX à XCIX) *gratuit*

Les Tables générales n° 5 et 6 des *Annales*, des *Mémoires* et des *Publications* sont accessibles sur le site Web de la SGN en version numérique : <http://sgn.univ-lille.fr/index.php?page=Publications> ; la Table 6 a été imprimée dans le Tome 20 (2013) des *Annales* (2^e série).

Fascicules thématiques des Annales de la Société Géologique du Nord

Ces fascicules sont tous à 10 € TTC sauf indication contraire

Constant Prévost – Coup d'œil rétrospectif sur la géologie en France pendant la première moitié du XIX^e siècle, par GOSSELET J. (Ann. SGN, XXV : 346 p., 1896)

Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France (avec l'Ecorché géologique infra-mésozoïque), par C.F.P.(M.), COPESEP & S.N.P.A. (Ann. SGN, LXXXV (3), 1965)

Géologie du Nord de la France (Ann. SGN, LXXXIX (1), 1969)

Rapport des Travaux du Centenaire 1870-1970 (Ann. SGN, XC (4), 1970, publié 1971)

Rupture des roches et massifs rocheux (Ann. SGN, XCV (3), 1975)

Données nouvelles sur le Paléozoïque de l'Europe occidentale (Ann. SGN, XCVI (4) et XCVII (1), publié 1977)

Apports récents à la géologie du Gondwana (Ann. SGN, XCVII (4), 1977, publié 1978)

Géologie de l'Europe, du Précambrien aux bassins sédimentaires post-hercyniens (Ann. SGN, XCIX (1), 1979, publié 1980)

Géologie appliquée aux problèmes d'énergie et de matières premières (Ann. SGN, CII (2), 1982)

Tectonique cassante en distension et coulissement (Ann. SGN, CIII (2-3), 1983, publié 1984)

Aspects de la géologie de l'Ardenne, hommage au Professeur Beugnies (Ann. SGN, CV (2), 1985, publié 1986)

Paléozoïque supérieur continental (Ann. SGN, CVI (2), 1986, publié 1987)

Actualisation de quelques thèmes géologiques – Conférences (Ann. SGN, CVI (4), 1986, publié 1988)

Aspects de la géologie du Gondwana (Ann. SGN, CVII (1), 1987, publié 1988)

Géologie et aménagement régional (Ann. SGN, CIX (1-2), 1989, publié 1990)

Le Nord et son environnement géologique (Ann. SGN, 2^e série, 2 (1), publié 1993)

Le Jurassique du Boulonnais (Ann. SGN, 2^e série, 4 (4), 1996)

Séance spécialisée - bassins houillers du nord de la France et du sud de la Belgique (Ann. SGN, 2e série, 5 (1), 1997)

Dossier consacré au Dévonien de l'Ougarta (Sahara occidental, Algérie) (Ann. SGN, 2e série, 5 (2), 1997)

La craie : objet géologique, réservoir, matériau et paysage (Ann. SGN, 2e série, 5 (3) et 5 (4), 1997)

Colloque Artois-Brabant (Ann. SGN, 2^e série, 6 (2), 1998)

North Gondwana Mid-Palaeozoic Bioevent / Biogeography patterns ... (IGCP 421, Isfahan) (Ann. SGN, 2^e série, 7 (1) et 7 (2), 1999)

2^e Journées Nationales du Patrimoine Géologique (Ann. SGN, 2e série, 7 (4), 2000)

New systematic and palaeobiogeographic data from the Palaeozoic of Central Iran (Ann. SGN, 2e série, 8 (2), 2000)

The Cambrian and Lower Ordovician of the southern Montagne Noire (Languedoc, France) ... (Ann. SGN, 2^e série, 8 (4), 2001)

La nouvelle carte géologique de Marquise (Ed. 2000) (Ann. SGN, 2e série, 9 (1-2), 2002)

Centenaire du Musée Gosselet (Ann. SGN, 2e série, 10 (2-3), 2003)

Dossier spécial : Stratigraphie du Paléozoïque (Ann. SGN, 2e série, 11 (4), 2005)

GeoReg – Géosciences des régions de France et des pays environnants (Ann. SGN, 2e série, 19, 2012)

Les enjeux « naturels » du développement urbain (séance A. Bonte) & *6e Table générale* (Ann. SGN, 2e série, 20, 2013)

Ressource en eau du bassin Artois-Picardie et Journée géoarchéologie (Ann. SGN, 2e série, 22, 2015)

Bassin Minier du Nord - Pas-de-Calais (Ann. SGN, 2e série, 24, 2017)

Transition énergétique (Ann. SGN, 2e série, 25, 2018) 30 €

Mémoires de la Société Géologique du Nord : derniers tomes disponibles

Tome I	n° 1. — Ch. BARROIS, Recherches sur le terrain crétacé de l'Angleterre et de l'Irlande, 1876, 232 p.....	30,00 €
	n° 2. — P. FRAZER, Géologie de la partie Sud-Est de la Pennsylvanie, 1882, 178 p.....	25,00 €
	n° 3. — R. ZEILLER, Mémoire sur la flore houillère des Asturies, 1882, 24 p.	2,50 €
Tome VI	n° 1. — P. BERTRAND, Etude du stipe de l' <i>Adelophyton jutieri</i> , B. Renault, 1907, 38 p., 4 pl.	7,00 €

Tome VIII	n° 2. — Ed. LEROUX, Le tunnel de l'Ave Maria, 1929, 50 p., 5 pl.	10,00 €
Tome IX	n°1. — G. DUBAR, Etude sur le Lias des Pyrénées françaises, 1925, 332 p., 7 pl.	30,00 €
Tome X	n° 2. — J. LAVERDIERE, Terrains paléozoïques des Pyrénées occidentales, 1931, 132 p., 8 pl.	14,00 €
Tome XII	D. LE MAITRE, Faune des calcaires dévoniens du Bassin d'Ancenis, 1934, 268 p., 18 pl.	30,00 €
Tome XIII	P. BRICHE <i>et al.</i> , Flore infraliasique du Boulonnais, 1963, 145 p., 11 pl.	25,00 €
Tome XIV	G. WATERLOT, Les Gigantostacés du Siluro-Dévonien de Liévin, 1966, 23 p., 5 pl.	7,00 €
Tome XV	J. MANIA, Gestion des Systèmes aquifères. Application au Nord de la France, 1978, 228 p.	15,00 €
Tome XVI	A. BOUROZ <i>et al.</i> , Essai de synthèse des données acquises sur la genèse et l'évolution des marqueurs pétrographiques dans les bassins houillers [<i>en Français et en Anglais</i>], 1983, 74 p., 10 pl.	20,00 €
Tome XVII	A. BLIECK & J.-P. DE BAERE eds, La Société géologique du Nord et l'histoire des sciences de la Terre dans le nord de la France, 2014, 183 p., illustré.....	40,00 €

Tables, Annales et Mémoires en accès libre et gratuit en ligne

Les Tables générales 1 à 5 des *Annales* et des *Mémoires* (1870 à 1979), les tomes I à CIX (1^{ère} série, 1875-1989) et 1 à 20 (2^e série, 1991-2013) des *Annales*, et les Tomes I (1876) à XVI (1983) des *Mémoires* sont numérisés et accessibles gratuitement en ligne sur le site IRIS de l'Université de Lille aux adresses suivantes : <https://iris.univ-lille.fr/handle/1908/32/browse> et <https://iris.univ-lille.fr/handle/1908/75/browse>. Les *Annales* sont également accessibles en ligne, en partie, sur le site de Gallica (bibliothèque numérique de la BNF) : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/cb343964078/date>.

Publications de la Société Géologique du Nord : tomes disponibles

Publication N° 1.	J. CHOROWICZ (1977) Etude géologique des Dinarides le long de la transversale Split-Karlovac (Yougoslavie), 331 p., 10 pl., 1 carte hors texte.	10,00 €
Publication N° 2.	J. CHARVET (1978) Essai sur un orogène alpin : Géologie des Dinarides au niveau de la transversale de Sarajevo (Yougoslavie), 554 p., 21 pl., 1 carte hors texte. [<i>Volume de texte épuisé ; carte disponible</i>] 5,00 €	5,00 €
Publication N° 3.	J. ANGELIER (1979) Néotectonique de l'arc égéen, 417 p., 29 pl.	11,00 €
Publication N° 4.	J.-J. FLEURY (1980) 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 ; 2 vol., 651 p., 10 pl., cartes hors texte.	12,00 €
Publication N° 5.	M. COUSIN (1981) Les rapports Alpes-Dinarides. Les confins de l'Italie et de la Yougoslavie ; 2 vol., 521 + 521 p.	12,00 €
Publication N° 6.	F. THIEBAULT (1982) L'évolution géodynamique des Héliénides externes en Péloponnèse méridional (Grèce) ; 2 vol., 574 p., cartes hors texte.	14,00 €
Publication N° 7.	P. DE WEVER (1982) Radiolaires du Trias et du Lias de la Téthys (Systématique, Stratigraphie) ; 2 vol., 599 p., 58 pl.	13,00 €
Publication N° 8.	J. FERRIERE (1982) Paléogéographie et tectoniques superposées dans les Héliénides internes : les massifs de l'Othrys et du Pélion (Grèce continentale) ; 2 vol., 970 p.	14,00 €
Publication N° 9.	H. MAILLOT (1983) Les Paléoenvironnements de l'Atlantique Sud : Apport de la géochimie sédimentaire, 316 p.	9,00 €
Publication N° 10.	Cl. BROUSMICHE (1983) Les Fougères sphénoptériennes du Bassin Houiller Sarro-Lorrain (Systématique – Stratigraphie) ; 2 vol., 480 p., 100 pl.	15,00 €
Publication N° 11.	B. MISTIAEN (1985) Phénomènes récifaux dans le Dévonien d'Afghanistan (Montagnes Centrales). Analyse et systématique des Stromatopores ; 2 vol., 381 p. + 5 pl., 245 p. + 20 pl.	15,00 €
Publication N° 12.	T. HOLTZAPFFEL (1986) Les minéraux argileux. Préparation, analyses diffractométriques et détermination ; 136 p.	6,00 €
Publication N° 13.	J.-L. MANSY (1986) Géologie de la Chaîne d'Omineca des Rocheuses aux Plateaux intérieurs (Cordillère Canadienne). Evolution depuis le Précambrien ; 2 vol., 718 p., 387 fig., 49 tabl., cartes hors texte.	15,00 €
Publication N° 14.	C. BECK (1986) Géologie de la Chaîne Caraïbe au méridien de Caracas (Venezuela) ; 462 p., 4 pl., 1 carte hors texte.	10,00 €
Publication N° 15.	J.-M. DEGARDIN (1988) Le Silurien des Pyrénées : Biostratigraphie, Paléogéographie ; 506 p., 16 pl.	10,00 €
Publication N° 16.	J. SIGAL (1989) Les recherches sur les Foraminifères fossiles en France des environs de 1930 à l'immédiat après-guerre ou : « avant l'oubli », 107 p.	7,00 €
Publication N° 17.	F. DELAY (1990) Le massif nord-pyrénéen de l'Agly (Pyrénées Orientales) : Fasc. 1 : Evolution tectono-métamorphique – Exemple d'un amincissement crustal polyphasé ; Fasc. 2 : Etude conceptuelle, fonctionnelle et organique d'un système de traitement informatique des microanalyses chimiques ; Fasc. 3 : Notice et carte géologiques en couleurs au 1/25 000 ; 3 vol., 393 + 152 + 34 p., carte hors texte sur CD.....	27,00 €
Publication N° 18.	A. KHATIR (1990) Structuration et déformation progressive au front de l'allochtone ardennais (Nord de la France) ; 293 p., cartes et coupes hors texte.	11,00 €

- Publication N° 19.** C. LAMOUREUX (1991) Les mylonites des Pyrénées. Classification. Mode de formation. Evolution ; 371 p., 9 pl.11,00 €
- Publication N° 20.** G. MAVRIKAS (1993) Evolution Crétacée-Eocène d'une plate-forme carbonatée des Héliénides externes. La plate-forme des Ori Valtou (« massif du Gavrovo »), Zone de Gavrovo-Tripolitza (Grèce continentale) ; 240 p., 10 pl.11,00 €
- Publication N° 21.** P. BRACQ (1994) L'effet d'échelle sur le comportement hydrodynamique et hydrodispersif de l'aquifère crayeux, apport de l'analyse morphostructurale ; 244 p.11,00 €
- Publication N° 22.** N. FAGEL (1994) Flux argileux du Néogène au Quaternaire dans l'Océan Indien Nord, mise en évidence et interprétation ; 265 p. 11,00 €
- Publication N° 24.** B. LOUCHE (1997) Limites littorales de la nappe de la craie dans la région Nord Pas-de Calais. Relations eaux souterraines-eaux superficielles-mer ; 286 p. 11,00 €
- Publication N° 25.** J.-G. BREHERET (1997) L'Aptien et l'Albien de la Fosse vocontienne (des bordures au bassin). Évolution de la sédimentation et enseignements sur les événements anoxiques ; 614 p., 18 pl. 22,00 €
- Publication N° 26.** T. PLETSCHE (1997) Clay minerals in Cretaceous deep-water formations of the Rif and the Betic Cordillera (northern Morocco & southern Spain), 118 p., 7 pl. 10,00 €
- Publication N° 27.** E. VENNIN (1997) Architecture sédimentaire des bioconstructions permo-carbonifères de l'Oural méridional (Russie) ; 350 p.13,00 €
- Publication N° 28.** D. BRICE coord. (1998) Actes des 1ères journées régionales Nord/Pas-de-Calais du Patrimoine Géologique (Lille, 20-23 Novembre 1997), 109 p. 5,00 €
- Publication N° 30.** R. PLATEVOET (2001) Diversité des formations pyroclastiques *s.l.* du strato-volcan du Cantal au Miocène (Massif central français). Elaboration d'une méthodologie de corrélation ; 271 p. 12,00 €
- Publication N° 31.** P. PELLENARD (2003) Message terrigène et influences volcaniques au Callovien-Oxfordien dans les bassins de Paris et du sud-est de la France ; 362 p., 19 pl.14,00 €
- Publication N° 32.** S. LALLAHEM (2003) Structure et modélisation hydrodynamique des eaux souterraines. Application à l'aquifère crayeux de la bordure nord du bassin de Paris ; 217 p.14,00 €
- Publication N° 33.** C. DERYCKE-KHATIR (2005) Microrestes de vertébrés du Paléozoïque supérieur de la Manche au Rhin ; 261 p., 35 pl.14,00 €

Autres éditions

Esquisse géologique du Nord de la France, Fascicule IV : *Terrains quaternaires*, par J. Gosselet (1903) ; texte imprimé + planches sur CD [ou en fac-similé] 10 €

Toutes les publications de la SGN sont accessibles dans de nombreuses bibliothèques : bibliothèque de l'Université de Lille – Faculté des Sciences et Technologies, de l'UMR 8198 du CNRS, bibliothèque de la Ville de Lille, au Conservatoire d'Espaces Naturels, à l'APBG, à la BNF, aux Archives départementales du Nord & dans de nombreuses bibliothèques publiques universitaires ou associatives, françaises ou étrangères (USA, RU, Union Européenne, Chine, Japon, Russie, etc.)

(*) Veuillez noter que les prix ci-dessus sont TTC (TVA 20 % incluse) mais hors frais de port et d'emballage.

Un tarif réduit de 20% est accordé aux membres de la SGN.

Les prix sont augmentés des frais de port et d'emballage quand les volumes ne sont pas pris directement au dépôt.

Les chèques, tirés sur une banque française uniquement, sont à adresser à la Société Géologique du Nord. Pour tout autre moyen de paiement, veuillez consulter la Trésorière, Mme Renée DUCHEMIN : ducheminrenee@yahoo.fr

Les commandes sont à envoyer à : Société Géologique du Nord, Mme la Trésorière,
c/o Université de Lille – Campus Cité Scientifique, bâtiment SN5 (Sciences de la Terre),
59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France).

Le catalogue avec son bon de commande est téléchargeable sur le site Web :

<http://sgn.univ-lille.fr/index.php?page=Publications>

Imprimé en France (Printed in France)
Achevé d'imprimer à l'Université de Lille
Domaine universitaire
du Pont-de-Bois - BP 60149
59653 Villeneuve d'Ascq Cedex

Dépôt légal : 4^e trimestre 2020
ISSN : 0767-7367
ISBN : 978-2-9575216-0-9