



Société Géologique du Nord

Journée « Ressource en eau du bassin Artois-Picardie » (3 décembre 2014)
et Journée « Géoarchéologie » (25 mars 2015)

Alain BLIECK, Francis MEILLIEZ, Patrick AUGUSTE & Laurent DESCHODT eds.

ANNALES

Tome 22 (2^e série)
parution 2015



SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

Extraits des Statuts

La Société Géologique du Nord a pour objet de concourir à l'avancement de la Géologie en général (Sciences de la Terre *s. l.*), et plus particulièrement de la Géologie des régions du nord de la France et de l'Europe. La Société se réunit plusieurs fois dans l'année. Elle publie des *Annales* mises en vente selon un tarif établi par le Conseil d'administration. Les sociétaires bénéficient d'un tarif préférentiel. Le nombre des membres de la Société est illimité. Pour en faire partie, il faut s'être fait présenter dans l'une des séances par deux membres de la Société (« parrains ») et y avoir été proclamé membre.

Extraits du Règlement Intérieur

Les *Annales* et leurs suppléments éventuels constituent le compte rendu des séances. Seuls les membres ayant acquitté leurs cotisation et abonnement depuis trois années consécutives peuvent publier aux *Annales*. L'ensemble des notes présentées au cours d'une même année, par un auteur, ne peut dépasser le total de 8 pages, une planche photo étant comptée pour 2 pages ½ de texte. Le Conseil d'administration peut, par décision spéciale, autoriser la publication de notes plus longues. Les notes originales (texte et illustrations) communiquées à la Société et destinées aux *Annales* doivent être remises au secrétariat le jour même de leur présentation.

Avertissement

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

Diffusion des articles des *Annales*

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

- pour un auteur membre de la SGN : pdf gratuit (sous réserve que l'auteur se sera acquitté des frais de dépassement au cas où l'article ferait plus de 8 ou 10 pages) ;

- pour un 1^{er} auteur non-membre : pdf gratuit (sous réserve que l'auteur se sera acquitté des frais de publication appliqués aux non-membres).

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

Editions de la SGN

La SGN édite des *Annales* (voir ci-dessus), parfois sous forme de fascicule thématique, des *Mémoires* et des *Publications*. Le catalogue complet de ces éditions est disponible en ligne à l'adresse suivante : <http://sgn.univ-lille1.fr/index.php?page=Publications>, il est également imprimé en pages intérieures du présent tome.

Politique et éthique éditoriales

Un code de politique et éthique éditoriales a été adopté par le Conseil d'administration de la SGN le 4 février 2015. Il est disponible en ligne à l'adresse suivante : <http://sgn.univ-lille1.fr/index.php?page=Publications>, il est également imprimé en pages intérieures du présent tome.

Extraits : Les *Annales* sont fondées sur le principe d'évaluation par les pairs (« *peer reviewed* »). Soumettre un article pour publication aux *Annales* implique que celui-ci n'ait pas été simultanément soumis à une autre revue. Les données présentées doivent être des résultats originaux n'ayant pas encore fait l'objet d'une publication dans une autre revue, un autre livre, voire un site du World Wide Web. L'acceptation ou le rejet d'articles soumis pour publication aux *Annales* est du ressort du Conseil scientifique et éditorial (CSE) de la revue. Les Instructions aux auteurs sont publiées dans chaque tome annuel des *Annales* et mises à jour régulièrement. Elles sont également publiées en ligne sur le site Web de la Société. Les *Annales* veillent à ce que soient respectées, dans ses colonnes, les règles généralement admises en matière d'éthique éditoriale scientifique. Ces dispositions sont applicables à toutes les autres éditions de la SGN : *Mémoires*, *Publications*, livres édités ou coédités, et tout autre support de publication.

Cotisations et Abonnements (depuis 2014)

	QUALITÉ	COTISATION	ABONNEMENT aux <i>Annales</i>	TOTAL
France et Union Européenne.	Personnes physiques	12 € T.T.C.	30 € T.T.C.	42 € T.T.C.
Autres Pays	Personnes physiques	12 € T.T.C.	35 € T.T.C.	47 € T.T.C.
Tous Pays	Personnes morales	55 € T.T.C.	55 € T.T.C.	110 € T.T.C.

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

De nouveaux tarifs réduits pour étudiants sont à l'étude et seront soumis à l'A.G. du 17 février 2016 à Cambrai.

Abonnement des non-membres : FRANCE : 55 € T.T.C. — Union Européenne : 55 € H.T. — Autres Pays : 55 € H.T.

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

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 les 143 années de la SGN en relation avec les entreprises industrielles, les associations et les institutions régionales.

Prix / Price : 40 € TTC + 4 € de frais de port et emballage si le volume n'est pas pris au dépôt

Bon de commande imprimé en pages intérieures du présent tome



Société Géologique du Nord

Journée « Ressource en eau du bassin Artois-Picardie » (3 décembre 2014)
et Journée « Géoarchéologie » (25 mars 2015)

Alain BLIECK, Francis MEILLIEZ, Patrick AUGUSTE & Laurent DESCHODT eds.

ANNALES

Tome 22 (2^e série)
parution 2015

*Ce tome 22 des Annales de la SGN bénéficie d'une aide financière de la société
Solétanche-Bachy (Antenne Nord – Pas-de-Calais),
de l'Institut National de Recherches Archéologiques Préventives (INRAP)
et du Conseil de développement de la Métropole Européenne de Lille (MEL)*

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
59655 VILLENEUVE D'ASCQ CEDEX

ISSN 0767-7367

CONSEIL D'ADMINISTRATION

— 2014 - 2016 —

<i>Présidente d'honneur</i>	M ^{elle} Denise BRICE
<i>Président d'honneur</i>	M. Francis ROBASZYNSKI
<i>Président</i>	M. Francis MEILLIEZ
<i>Premier Vice-Président</i>	M. Hervé COULON
<i>Seconds Vice-Présidents</i>	M. Francis AMEDRO M. Jean-Pierre DE BAERE
<i>Secrétaire</i>	M. Fabien GRAVELEAU
<i>Secrétaire-adjoint</i>	M. Jean-Yves REYNAUD
<i>Trésorier</i>	M. Thierry OUDOIRE
<i>Bibliothécaire</i>	M. Olivier AVERBUCH
<i>Directeur de la Publication</i>	M. Alain BLIECK
<i>Conseillers</i>	M. Patrick AUGUSTE M ^{elle} Gaëlle GUYETANT M. Christian LOONES M. Bernard MAITTE M. Joris MAVEL M. Jacques ROUGE
<i>Site Web</i>	
<i>Administrateur</i>	M. Alain BLIECK
<i>Webmestre</i>	M. Claude MONNET

CONSEIL SCIENTIFIQUE et ÉDITORIAL

— 2014 - 2016 —

Le Conseil Scientifique et Editorial est composé des membres du Bureau en exercice de la Société (Président, Premier Vice-président, deux Seconds Vice-présidents, Secrétaire, Secrétaire-adjoint, Trésorier, Bibliothécaire, Directeur de la Publication) et des six Conseillers extérieurs suivants :

Jean-François DECONINCK (Université de Bourgogne, Dijon)
Patrick DE WEVER (Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris)
Christian DUPUIS (Université de Mons, Belgique)
Rémy GOURVENNEC (CNRS, Université de Brest)
Jean SOMME (Université Lille 1, Villeneuve d'Ascq)
Johan YANS (Facultés Universitaires N.-D. de la Paix, Namur, Belgique)

Nouvelle adresse URL du site Web :

<http://sgn.univ-lille1.fr>

LISTE DES RAPPORTEURS DES ARTICLES DU TOME 22

AMEDRO Francis (Calais, Pas-de-Calais ; SGN)
ASTROP Tim (University of Bath, Dept. of Biology and Biochemistry, Bath, Royaume-Uni)
AUGUSTE Patrick (CNRS – UMR 8198 EvoEcoPaléo, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq ; SGN)
DESCHODT Laurent (INRAP et UMR 8591 du CNRS - Laboratoire de Géographie Physique : Environnements Quaternaires et Actuels ; SGN)
DUCHAUSOIS François (Neuville-Saint-Amand, Aisne ; SGN)
DURAND Cyril (Université de Lille – Sciences et technologies, UFR Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq)
GARCIA ALCALDE Jenaro (Universidad de Oviedo, Depto. de Geología, Oviedo, Espagne)
GOURVENNEC Rémy (CNRS – UMR 6538 Domaines océaniques, Université de Bretagne occidentale, Brest ; SGN)
LAUMONIER Bernard (Université de Lorraine, Dépt. de Géométrie, Nancy, Meurthe-et-Moselle)
MANIA Jacky (Université de Lille – Sciences et technologies, Polytech'Lille, Villeneuve d'Ascq ; SGN)
MEILLIEZ Francis (Université de Lille – Sciences et technologies, UFR Sciences de la Terre, Villeneuve d'Ascq ; SGN)
MONFERRAN Mateo (Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas - CONICET, Corrientes, Argentine)
SHEN Yanbin (Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, R. P. de Chine)
SOMME Jean (Université de Lille – Sciences et technologies, UFR Géographie et Aménagement, Villeneuve d'Ascq ; SGN)

A N N A L E S
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 – Sciences et technologies, UFR des Sciences de la Terre, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex

Tél. 03 20 33 70 47 (secrétaire) - C.C.P. Lille 52-47 Y

Site Web : <http://sgn.univ-lille1.fr>

E-mail du président : Francis.Meilliez@univ-lille1.fr

E-mail du secrétaire : Fabien.Graveleau@univ-lille1.fr

E-mail du directeur de la publication : sgn-edition@univ-lille1.fr

AVANT-PROPOS : la Société en 2015 – vers le cent-cinquantième

par Francis MEILLIEZ, président & Alain BLIECK, directeur de la publication

2015 : une nouvelle étape se prépare

L'événement qui a marqué le début d'année est la **parution du *Mémoire XVII***, tant attendu. A sa lecture, chacun peut, maintenant, prendre conscience de la trajectoire de la Société depuis sa fondation en 1870. L'objectif, validé par l'Assemblée Générale 2013, est de **replacer la Société géologique du Nord dans la perspective qui était la sienne à la fondation**, mais en adoptant les moyens d'aujourd'hui et les enjeux de demain. C'est un objectif très ambitieux, pour lequel nous disposons d'une ligne d'horizon : la S.G.N. célébrera ses 150 ans en 2020. Quatre années ne sont pas de trop pour mûrir, tous ensemble, les réflexions qui justifient l'activité d'une société savante régionale dédiée aux sciences de la Terre au XXI^e siècle et les traduire en actions. La S.G.N. fait son travail d'éditeur scientifique – ce tome en atteste, elle s'affirme au service de l'individu et de la collectivité, pour traiter des enjeux de territoire et, par cette entrée, contribuer à développer les sciences de la Terre et en diffuser une culture citoyenne.

Désormais, la S.G.N., comme tout éditeur scientifique responsable, dispose d'un **code de politique et éthique éditoriales** (accessible en français <http://sgn.univ-lille1.fr/sgn/pdf/SGN-Annales-Politique.et.ethique.editoriales-150128.pdf>, et en anglais <http://sgn.univ-lille1.fr/sgn/pdf/SGN-Annales-Publication.policy.and.ethics-150216.pdf>). Les *Annales* devraient donc à nouveau pouvoir être indexées dans les revues internationales ; nous espérons vous l'annoncer l'an prochain. Ce tome des *Annales* est plus volumineux que le précédent, ce qui atteste de la vitalité des auteurs. Entre autres, une rubrique renaît : publier des descriptions d'affleurements éphémères. Les grands éditeurs internationaux l'ont réduite à la portion congrue ; il est naturel qu'une publication scientifique régionale lui redonne place. Les générations à venir lui en sauront gré. Chaque membre a pu être témoin de l'ouverture d'une tranchée, d'un talus routier montrant des observations rares. La curiosité doit alimenter le réflexe : il faut saisir l'observation et en rendre pérenne une description. La S.G.N. accompagnera les membres, et futurs membres, dans cette tâche. La science progresse autant à partir de l'étude de grands espaces découverts que l'analyse de documents ponctuels éphémères. Ce tome est aussi le premier à bénéficier d'une **impression entièrement numérique**. Le gain financier qui en résulte a aussitôt été investi en autorisant l'utilisation de la couleur sur les illustrations. On comprend l'intérêt de la couleur, mais la préparation alourdit le coût. Autrement dit, le choix technique ne s'exprime pas par une économie mais par une extension de possibilité d'expression. Les subventions récurrentes ayant disparu, le financement de chaque tome doit donc s'équilibrer par les ventes (dont abonnements), et par un mécénat à construire. L'introduction d'une publicité payante en page III de couverture s'inscrit dans cette nécessité. Chaque tome est donc un projet à bâtir. Un moyen consiste à organiser une à deux Journées d'étude par an dans des domaines d'activité en lien avec les sciences de la Terre. Que tout ou partie des échanges fasse l'objet de publications conduit à une relation fertile pour les partenaires. La S.G.N. diffuse une information nécessaire au développement de la culture scientifique ; ses partenaires disposent d'un affichage qui ne couvre certes qu'une partie de leurs préoccupations, mais leur permet de faire connaître leur action et les questions auxquelles ils ont à faire face. Chacun peut donc y trouver son compte.

C'est pourquoi ce tome présente des comptes rendus et publications issus de **deux Journées organisées, l'une avec l'Institut National de Recherches en Archéologie Préventive (I.N.R.A.P.), l'autre avec l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (A.E.A.P.) et le conseil de développement de la Métropole Européenne de Lille (M.E.L.)**. L'archéologie avait quasiment disparu des *Annales*, alors que l'occupation du sol, de plus en plus artificialisée, nécessiterait que soient mieux compris les efforts d'adaptation aux exigences naturelles du territoire auxquels les générations antérieures ont été contraintes. Cette Journée s'est passée pour partie sur le terrain, pour partie en salle. Le climat régional, volontiers humide, donne une fausse impression de sécurité sur la ressource

en eau. Mais par le jeu combiné des activités et de la démographie, nos centres urbains polluent les ressources identifiées, ce qui entraîne une dérive vers une situation que G. de MARSILY, académicien, n'hésite pas à qualifier de stress hydrique. L'A.E.A.P. a accueilli de nombreux professionnels, représentants de collectivités et du monde associatif pour faire un point sur la protection de la ressource. On le voit, par ces exemples, la Société géologique du Nord constate que les analyses menées par ses fondateurs sont toujours d'actualité. C'est pourquoi elle assure son rôle d'éditeur scientifique, au service de l'individu comme de la collectivité, au bénéfice du territoire d'une part, de la science de façon plus générale. Ce tome 22 en est l'illustration.

L'année écoulée — Vie de la Société

Nous avons commencé cette année 2015 par un événement festif, un pot de l'amitié offert à l'occasion des vœux de Nouvel An et de la sortie du *Mémoire XVII* (paru en décembre 2014 – voir ci-dessus), organisé à la Maison régionale de l'environnement et des solidarités (M.R.E.S.). Ce fut l'occasion de rencontrer certains de nos sponsors parmi lesquels Mme Marie-Christine Blandin, sénatrice du département du Nord, et Jean-Philippe Cassar, vice-président en charge de la Culture et du Patrimoine, représentant l'Université de Lille – Sciences et technologies. La M.R.E.S. était représentée par son directeur, Xavier Galand, et la Commission Historique du Nord (C.H.N.) par son président, Philippe Marchand.

Administration, vie scientifique, patrimoine géologique

Le Conseil d'administration (C.A.) s'est réuni quatre fois, les 4 février, 22 avril, 9 septembre et 16 décembre. Le Président a continué d'animer les réunions hebdomadaires du Bureau pour traiter des questions courantes et de l'état d'avancement des opérations en cours (conférences, expositions, visites de terrain, patrimoine, grand public, contacts avec les aménageurs, réalisation du budget, etc.). L'**Assemblée générale** (A.G.) de la Société s'est tenue le 4 février à la M.R.E.S., rue Gosselet à Lille. Après lecture des rapports d'activités (bilan moral du président, bilan financier et budget prévisionnel du trésorier, bilan éditorial du directeur de la publication) et élection de nouveaux membres, s'est tenue une séance de communications orales. Dans son rapport moral, le Président a rappelé que la S.G.N. est « une société savante qui diffuse la culture scientifique dans le domaine de la géologie, en particulier sur le territoire du Nord de la France et des régions limitrophes. » Il a également rappelé que « La S.G.N. est une société d'édition spécialisée qui diffuse du contenu ; il faut s'assurer que ce contenu soit compris et modifie le comportement des citoyens vis-à-vis des mécanismes géologiques les plus banals (relations eau / matériaux, raisonnement en 4D). » Il a ensuite redéfini les missions de la S.G.N. : une mission fondamentale - l'édition scientifique, diffuser un savoir compréhensible, apporter une contribution sociale. Le rapport financier du Trésorier (bilan financier et budget prévisionnel) a mis en évidence un exercice 2014 déficitaire à hauteur d'environ 4 000 €, dû en grande partie à la publication du *Mémoire XVII* (coût total impression + envois : 10 876,80 €) et au fait que toutes les subventions obtenues pour ce *Mémoire* n'étaient pas arrivées à la date de l'A.G. Cependant, cette opération « Mémoire XVII » sera finalement quasiment équilibrée, avec un léger déficit de l'ordre de 800 € qui devrait être compensé par les ventes au numéro. [Rappelons ici que ces rapports sont accessibles dans leur intégralité dans le procès-verbal de l'A.G. qui est installé sur notre site Web : <http://sgn.univ-lille1.fr/sgn/pdf/SGN-AG-150204-PV-FIN.pdf>] A été rappelée à ce propos l'importance d'obtenir des aides financières sur opération, ce *Mémoire* ayant bénéficié des aides suivantes : réserve parlementaire de Mme M.-C. Blandin, Université de Lille – Sciences et technologies, Fédération Française des Géosciences, Unité Mixte de Recherche 8217 « Géosystèmes » du C.N.R.S. et de l'Université de Lille. La Société Soléтанche-Bachy soutient elle aussi la S.G.N. par une subvention annuelle actuellement récurrente. Enfin, nous avons obtenu des aides du Conseil de développement de la Métropole Européenne de Lille (MEL) pour la Journée « Eau » et de l'I.N.R.A.P. pour la Journée « Géoarchéologie ». Sans de telles aides, chaque budget annuel de la S.G.N. serait encore plus déficitaire qu'il ne l'est. Le C.A. est d'ailleurs amené à réfléchir au « modèle économique » de la Société qui est son point faible. Comme l'a dit le Président « Il faut innover pour élaborer un modèle adapté qui préserve la priorité donnée à la diffusion. » [voir ci-dessus le paragraphe « 2015 : une nouvelle étape se prépare »]. Depuis la tenue de l'A.G. 2014, la S.G.N. a enregistré huit demandes d'adhésions présentées aux réunions du C.A. et confirmées lors d'un vote informel en A.G. le 4 février dernier. Depuis cette dernière A.G., 11 autres demandes d'adhésion ont été enregistrées (3 au CA d'avril, 8 en septembre). Dans le même temps, la S.G.N. a reçu quatre demandes de radiation si bien qu'à la date de parution du présent tome des *Annales*, la S.G.N. compte 134 membres : 5 personnes morales (4 associations et 1 entreprise) et 129 personnes physiques - 2 membres à vie (présidents d'honneur) et 127 autres membres titulaires. Enfin la Société a été prévenue du décès de trois de ses membres, MM. Paul Huvelin, Paul Sartenaer et André Delmer qui était probablement notre adhérent le plus ancien [cf. tome 21 des *Annales*] ainsi que de celui de M. André Dalinval qui avait été président en 1968. Une notice sur P. Sartenaer a été rédigée par D. Brice pour le présent tome des *Annales* tandis que des notices pour nos trois autres collègues paraîtront dans le tome 23.

La **séance de communications orales** du 4 février, faisant suite à l'A.G., a porté sur les thèmes suivants :

- *IRIS - Bibliothèque numérique en histoire des sciences et des techniques*, par M.-M. Géroudet (Responsable du Service Bibliothèque Numérique, S.C.D. Lille – Sciences et technologies) & R. Franckowiak (Maître de Conférences en histoire des sciences et épistémologie, et responsable scientifique d'IRIS) ;
- *Les collections de diplostracés (« conchostracés ») du Musée d'Histoire Naturelle et de l'Université de Lille*, par J. Cuvelier (CNRS, UMR 8198 « Evo-Eco-Paléo »), M. Hennion, O. Gallego, D. Vachard & T. Oudoire [deux articles publiés dans le présent tome des *Annales*] ;
- *Vers une modélisation 3-D de la structure géologique du dôme du Mélantois à partir de forages* par F. Graveleau (Maître de Conférences, Univ. Lille, UMR 8187 LOG), J. Mavel, Y. Amraoui, F. Meilliez & H. Coulon ;
- *Paléoaérations et paléomorphologie, des observations volatiles ; exemples près de Fourmies (59)*, par F. Meilliez (professeur émérite, Univ. Lille, UMR 8187 LOG) [article publié dans le présent tome des *Annales*].

Cette séance de communications a été suivie d'un pot de l'amitié pris sur place à la M.R.E.S.

Le projet de fusion entre le C.E.N. (Conservatoire d'espaces naturels du Nord – Pas-de-Calais — dont la S.G.N. est membre fondateur), le G.O.N. (Groupe ornithologique et naturaliste du Nord – Pas-de-Calais) et le C.B.N.B. (Conservatoire botanique national de Bailleul) qui a été évoqué dans l'avant-propos du Tome 21 des *Annales*, ne se fera finalement pas, essentiellement pour

deux ensembles de raisons : des raisons économiques, un cabinet extérieur spécialisé dans le management, consulté, ayant dit que la fusion coûterait 300 k€ (seuils sociaux, alignement possible des salaires sur les mieux payés des salariés des trois structures, etc.), et des raisons liées à la fusion des régions qui a engendré un contexte différent de réflexion [voir plus loin à propos du colloque sur les inventaires du patrimoine géologique]. Ce sont désormais nos collègues Christian LOONES et Jacques ROUGE qui siègent au C.A. du C.E.N. Le 29 janvier, A. BLIECK, P. AUGUSTE et F. MEILLIEZ ont reçu Jean-Jacques JARRIGE, président de la Société géologique de France (S.G.F.). Dans le cadre de nouvelles relations que la S.G.F. souhaite développer avec ses homologues en régions, il a été décidé notamment de co-organiser une session extraordinaire sur le terrain, du 4 au 7 avril 2016, « *Sur les traces de Jules GOSSELET* ». Ce sera l'une des manifestations célébrant le centenaire de la mort de notre fondateur, sous la coordination de P. AUGUSTE. Le 16 avril, F. MEILLIEZ, accompagné de Frédéric LACQUEMENT, est allé rencontrer Xavier LARMAUDIE et Corinne SANSON à la Communauté de Communes de Givet pour préparer cette visite de terrain. Le 4 avril, A. BLIECK et F. MEILLIEZ ont rencontré J. DUBOIS, maire-adjoint de Lille, en charge du Patrimoine, ses collaborateurs et Xavier GALAND, directeur de la M.R.E.S. Il y a été question de la **préservation des peintures murales de l'ancien Institut de Géologie**. Le 29 avril, F. MEILLIEZ est allé rencontrer Virginie DEBRABANT, directrice intérimaire du Centre Historique Minier (C.H.M.) de Lewarde. Divers projets ont été évoqués, au moins jusqu'en 2020. T. OUDOIRE et F. MEILLIEZ ont participé le 26 septembre au conseil scientifique du C.H.M. Le 30 avril, puis après report au 15 septembre, F. MEILLIEZ a participé à l'Assemblée Générale du Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement du Nord (CAUE-59), dirigé par Benoît PONCELET. Enfin, parmi les relations et partenariats, la S.G.N. a signé avec l'Université de Lille – Sciences et technologies une **convention** régissant sa présence sur le campus de l'université (siège social, salle de réunions, local de stockage de sa réserve de publications, alimentation continue du fonds documentaire par échanges de publications périodiques) et, surtout, permettant de « *définir le cadre général de coopération que [la SGN et l'université] entendent instaurer entre elles en vue de contribuer ensemble aux missions de développement de la connaissance, de diffusion de la culture scientifique et de valorisation du patrimoine scientifique dans le domaine de la Géologie.* »

Le mercredi 25 mars 2015 a été organisée une **Journée Géoarchéologie**, en partenariat avec l'Institut National de Recherches en Archéologie Préventive (I.N.R.A.P.), par MM. Patrick AUGUSTE (C.N.R.S., S.G.N.) et Laurent DESCHODT (I.N.R.A.P., S.G.N.) : le matin sur le terrain dans « *la plaine de la Scarpe : héritages morpho-stratigraphiques pléistocènes* », et l'après-midi à la M.R.E.S. où furent présentées treize communications orales dont la conférence d'ouverture (par L. Deschodt) et les résumés étendus de 9 des 12 autres communications sont publiés dans le présent tome des *Annales*. Avec plusieurs dizaines de participants, dont des étudiants pas encore familiarisés avec les actions de la S.G.N., cette journée fut un vrai succès ; elle a permis, entre autres, de rappeler l'engagement ancien de la Société dans des études sur le Quaternaire. La S.G.N. était également présente au **colloque « Les inventaires du patrimoine géologique – Enjeux, bilans et perspectives »** qu'elle a parrainé et qui s'est tenu au Muséum de Toulouse du 22 au 26 septembre 2015 (organis. P. De Wever, membre S.G.N., F. Duranthon & A. Lalanne). Y a été présentée en particulier la communication suivante « *Geological heritage of Northern France : overview and perspectives* » par J. Avoine (Univ. Caen et Association Patrimoine Géologique de Normandie - APGN), L. Baillet (APGN), Y. Battiau-Queney (Univ. Lille), J.-P. Colbeaux (Conseil Scientifique de l'Environnement du Nord – Pas-de-Calais), P. Dron (C.E.N. de Picardie), F. Duchaussois (C.E.N. de Picardie et S.G.N.), O. Dugué (Univ. Caen), C.-B. Duhaut (C.E.N. de Haute-Normandie), G. Guyétant (C.E.N. du Nord – Pas-de-Calais et S.G.N.), P. Jégouzo (Société Géologique et Minéralogique de Bretagne - SGMB), M. Jonin (SGMB), A. Noraz (C.E.N. de Haute-Normandie) & J. Tabouelle (La Fabrique des Savoirs, Elbeuf). Cette opération se situe en particulier dans le cadre du rapprochement en vue d'une fusion entre le C.E.N. du Nord – Pas-de-Calais et le C.E.N. de Picardie, dans le contexte national de formation de la future grande région Nord – Pas-de-Calais – Picardie. Le 6 novembre, la **remise officielle des derniers exemplaires du livre « Des roches aux paysages »** (coord. F. Robaszynski & G. Guyétant, co-édit. C.E.N. & S.G.N.) au rectorat de l'Académie de Lille, en vue d'une diffusion dans les collèges et lycées de la région, était organisée dans un collège de Saint-André-lez-Lille. Étaient présents le Recteur de l'Académie, le chef d'établissement et les représentants du C.E.N. et de la S.G.N. Les élèves de 5^e du collège ont ensuite présenté le travail qu'ils ont mené dans l'année à partir du livre. Rappelons également que la S.G.N. est engagée dans un projet de **commémoration du centenaire de la mort de Jules Gosselet** en 2016, dans le contexte des commémorations de la Première Guerre Mondiale, coordonné par P. AUGUSTE (CNRS, UMR 8198 « Evo-Eco-Paléo » et S.G.N.).

Grand public

A la demande des responsables de la bibliothèque numérique en histoire des sciences (IRIS) de l'Université de Lille – Sciences et technologies (ici abrégée en « Lille 1 »), et dans le cadre de son partenariat avec le Service Commun de Documentation (S.C.D.) de Lille 1, la S.G.N. a contribué à une **exposition virtuelle** sur sa propre histoire, dont les données et documents sont extraits de ses éditions en ligne, *Annales* et *Mémoires*, et s'inspirent fortement du *Mémoire XVII* récemment paru. Sous la responsabilité de Mme Marie-Madeleine GEROUDET (S.C.D. et IRIS), A. BLIECK, P. AUGUSTE & F. MEILLIEZ avec la collaboration de F. AMEDRO, B. MAITTE & J.-Y. REYNAUD y évoquent les phases successives des activités de notre Société : ses dix premières années, sa période « quaternaire », sa période « houillère », sa période « dinaro-hellénique », et enfin le changement de millénaire (avec un retour aux applications de la géologie et le développement des activités liées au patrimoine géologique) (<http://iris.univ-lille1.fr/expo/sgn>). F. MEILLIEZ a conduit une visite commentée des **peintures géologiques murales** du grand escalier de la M.R.E.S. (anciennement l'Institut de Géologie de la Faculté des Sciences de Lille), le 10 mars 2015, pour les membres de la Société des Sciences, des Arts et de l'Agriculture de Lille (S.S.A.A.L. : <http://societe-sciences-agriculture-arts-lille.fr>). J. SCHIETTECATTE a représenté la S.G.N. pour l'organisation de la **Semaine Européenne du Développement Durable** de Lille (30 mai – 5 juin 2015). Cependant, cette année, toutes les activités proposées consistaient en des programmes d'animation de quartier visant particulièrement les jeunes scolaires. Dans un tel cadre la S.G.N. n'avait pas de contribution adéquate à proposer. Aux **Journées Européennes du Patrimoine**, les 19 et 20 septembre 2015, F. MEILLIEZ et T. OUDOIRE ont présenté les peintures géologiques murales de la M.R.E.S. à un public restreint mais intéressé et interactif. Enfin, le week-end des 31 octobre et 1^{er} novembre, dans la salle des fêtes de Gondcourt (59), la S.G.N. a tenu un stand dans le cadre de **Second Salon du livre régional** dans le but de présenter au public la Société et son histoire (promotion du *Mémoire XVII* et des autres publications) et, plus généralement, les géosciences. J. CUVELIER, A. BLIECK, C. LOONES et B. MISTIAEN s'y sont relayés. Cette première participation à un salon de ce type a permis, entre autres, de constituer un réseau de nouveaux contacts avec des associations régionales de généalogie (Flandre-Hainaut, Douaisis, Wallonie picarde, Geniwal, etc. - les

plus nombreux sur ce salon), des associations d'histoire locale ou régionale (Gondecourt, Phalempin, Pévèle, Don, Mérignies, etc.), des éditeurs régionaux, une biographe, un atelier de reliure indépendant, des bouquinistes, des auteur(e)s de romans historiques régionaux, d'histoire des Pays-Bas, d'heroic fantasy régional, de romans policiers noirs régionaux (nous avons même suggéré aux auteurs des deux dernières catégories des scénarios centrés sur la S.G.N. pour leurs prochains romans...), l'association Proscitec (réseau de structures sur le patrimoine industriel et la mémoire des métiers du nord de la France), le nouveau musée Arkéos (Douai), les Archives du Nord, le Comité Flamand de France, etc. Nous ferons « poster » par Claude Monnet, notre Web-maître, une nouvelle sous-rubrique sur le site de la S.G.N. dans la rubrique « Liens » avec des renvois aux sites Web de ces exposants.

Conférences

La « conférence de printemps » de la S.G.N. a été donnée le 20 mai par Arnaud HEQUETTE (professeur de géologie à l'Université du Littoral – Côte d'Opale – ULCO, UMR 8187 « LOG » du CNRS) sur « *L'évolution récente du littoral du Nord – Pas-de-Calais – Quelles leçons pour la gestion de l'évolution du trait de côte ?* ». Plus de trente participants y étaient, en particulier des étudiants de l'ULCO qui entendaient peut-être parler de la S.G.N. pour la 1^{ère} fois ... Cette excellente conférence a rappelé les enjeux nombreux et très importants de la zone littorale, en particulier dans le contexte des événements climatiques récents et des aménagements anthropiques, et le rôle primordial du géoscientifique, capable de dédramatiser certains débats publics en apportant des informations scientifiques raisonnées, loin des effets d'annonce médiatiques ... Elle s'est déroulée dans les locaux de l'ULCO, au Centre universitaire des Darses à Dunkerque, ce qui constitue un 1^{er} essai de « décentralisation » des conférences S.G.N. (pour les années récentes), hors de ses murs lillois. La « conférence d'automne » a eu lieu le 9 décembre à la M.R.E.S. Donnée par Thierry PIRRION, Directeur régional Nord-Est du Groupe Antea à Lezennes, elle a porté sur « l'évolution de la question des risques géologiques dans la région Nord – Pas-de-Calais ». cette conférence est venue en complément de la précédente et confirme le retour de la S.G.N. dans le champ de la géologie appliquée, en partenariat avec des entreprises et structures régionales.

Sorties de terrain

Comme pour les années passées, la S.G.N. était partenaire du Musée d'Histoire Naturelle de Lille pour l'organisation des Rendez-vous Nature du Conseil départemental du Nord (CG59) : circuit de l'eau au Mont Noir (le dimanche 22 mars, dirigé par F. MEILLIEZ), et découverte géologique des terrils les dimanches 29 mars, 12 et 19 avril, 17 mai, 26 juillet, 13 et 27 septembre, et 11 octobre. Le samedi 11 avril était organisée la 1^{ère} sortie S.G.N. de l'année sur « *Sédimentologie et paléogéographie des sables « diestiens » de Belgique* » (Miocène supérieur). Dirigée par Rik HOUTHUYS, géologue consultant, et Noël VANDENBERGHE, professeur de géologie à l'Université de Louvain, membre S.G.N., cette sortie a emmené les participants dans les anciennes sablières de Kessel-Lo et de Muziekberg (Sables de Diest et des Collines de Flandre) et sur la coupe de Pottelberg (Sables des Collines de Flandre). Elle a été l'occasion de discussions animées et a ouvert des perspectives en matière de collaborations futures entre les deux côtés de la frontière franco-belge (ou belgo-française, comme on veut). La seconde sortie S.G.N. de l'année a eu lieu le samedi 3 octobre dans le Boulonnais, sur la coupe des falaises entre Audresselles et le Cran aux Œufs. Dirigée par Olivier AVERBUCH, Fabien GRAVELEAU et François GUILLOT (Univ. Lille 1 et S.G.N.), cette sortie a permis de présenter à une quarantaine de participants et de discuter les nouvelles observations sur les phénomènes tectoniques contemporains du dépôt des unités sédimentaires du Jurassique supérieur (failles synsédimentaires, filons associés, figures d'injections sableuses, petits récifs à huîtres associés aux suintements de fluides syntectoniques). Ces structures témoignent de l'instabilité tectonique du bassin boulonnais à la fin du Jurassique, période majeure de propagation du rifting de l'Océan Atlantique vers le nord. Elles illustrent, par ailleurs, le contrôle qu'ont exercé les déformations extensives sur la géométrie des aires de sédimentation et les variations de faciès dans le bassin ainsi que l'impact des fluides syn-déformation sur la dynamique d'un système pétrolier potentiel, le système des dépôts mixtes silico-clastiques et carbonatés du Kimméridgien-Tithonien de Manche-Mer du Nord. Rappelons que les comptes rendus ou livrets-guides des sorties S.G.N. sont accessibles sur le site Web de la Société : <http://sgn.univ-lille1.fr/index.php?page=excursions>.

Editions

Le tome 22 des *Annales* (2^e série) est particulièrement plus épais que le précédent, entre autres parce qu'il comprend des articles correspondant à des communications données au cours de la Journée « Eau » de décembre 2014 et de la Journée « **Géoarchéologie** » du mois de mars 2015 (voir ci-dessus). On y trouve donc les articles suivants :

- Meilliez F., Prygiel J. & Coulon H., Etat des eaux et protection de la ressource dans le Bassin Artois-Picardie ;
- Meilliez F. & Georget A., Le citoyen consomm'acteur de l'eau ;
- de Marsily G., L'eau, une ressource renouvelable convoitée et inégalement répartie ;
- Delay F. & Ackerer P., La réduction des modèles hydrologiques pour des applications pratiques moins fastidieuses ;
- Deschodt L., L'apport des opérations archéologiques à la connaissance du Pléistocène régional : exemple des fonds de vallées du bassin français de l'Escaut ;
- suivis des neuf résumés étendus des autres communications de géoarchéologie.

Vient ensuite la notice biographique de Paul Sartenaer (1925-2015) rédigée par D. Brice. Rendons ici hommage à M. Sartenaer, qui fut directeur de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique et spécialiste de renommée mondiale des brachiopodes dévoniens. Cette notice est suivie des articles courants de géologie et de paléontologie :

- Charlet J.-M. & El Haji A., Evolution polyphasée du massif granitique de la Maladeta (Pyrénées centrales espagnoles) - synthèse des données pétrographiques ;
- Brice D. & Mottequin B., Un nucinulide (Brachiopoda, Rhynchonellida) nouveau de l'Emsien (Dévonien) du Massif Armoricaire (France) ;
- Meilliez F., Paléoaltérations et paléomorphologies, des observations éphémères ; exemples autour de Fourmies (Nord) ;
- Hennion M., Cuvelier J., Gallego O.F., Oudoire T. & Vachard D., Collections of the Natural History Museum of Lille. VIII. — Diplostraca (types and figured specimens) ;
- Cuvelier J., Hennion M., Gallego O. & Vachard D., Palaeontological collections of Lille 1 University. II — Diplostraca (types and figured specimens).

A ces articles s'ajoutent les rubriques désormais habituelles des *Annales* : avant-propos, la S.G.N. il y a 50 ans, liste des membres, instructions aux auteurs, mais aussi notre tout récent code de « Politique et éthique éditoriales ». Dans ce tome 22, comme c'est expliqué ci-dessus, a été ajouté en pages intérieures le catalogue de nos éditions pour faire de la place en page III de couverture pour une publicité payante. En somme, un tome plutôt volumineux et éclectique, dans l'esprit de la mission de diffusion du savoir de la Société.

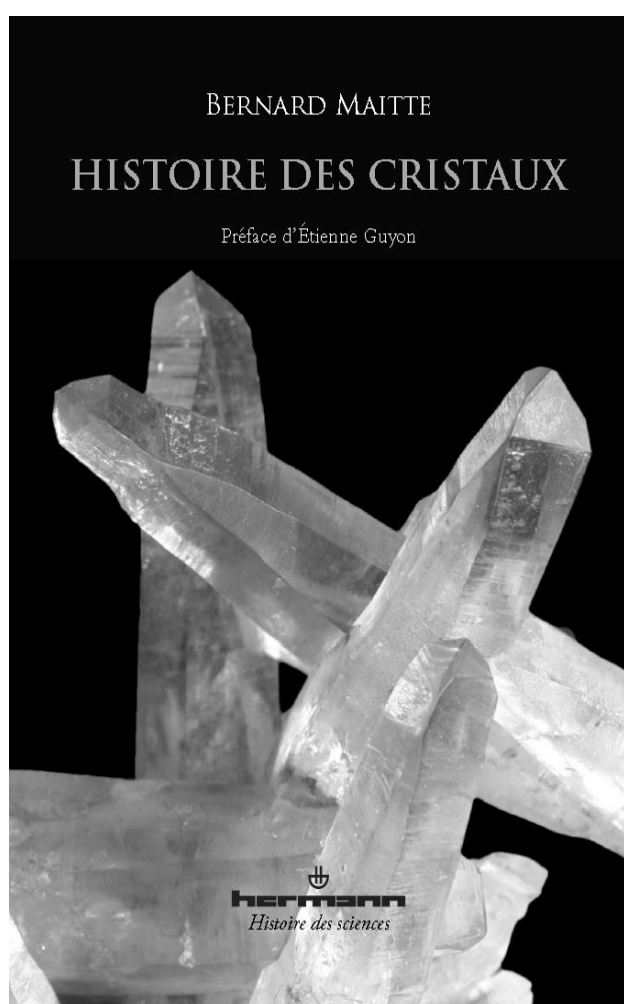
Enfin, la Société a mis sur pied un **groupe de travail sur l'évolution de la communication** (édition, site Web, etc.) de la S.G.N. Ce groupe est chargé de réfléchir aux mesures à prendre pour les *Annales* et les autres publications de la Société dans le cadre des modifications qui vont intervenir en particulier dans le régime de TVA appliqué à la presse (générale et scientifique). Il devra également repenser le mode de publication (papier et/ou électronique en ligne sur la Toile), modifier le cahier des charges du site Web (qu'il faudra donc reformater) et définir un nouveau modèle économique pour la Société, sachant qu'une part majeure de son budget annuel est consommée par les frais de publication (PAO, impression, diffusion). Ce groupe de travail fera des propositions concrètes au Conseil d'administration qui soumettra ses conclusions à l'Assemblée générale quand le moment sera venu. Les membres vont être informés directement par le Président avant la fin de l'année 2015, afin qu'ils puissent commencer à se faire une opinion avant la tenue de l'A.G. en février 2016. Nous nous donnons un maximum de deux ans pour arriver à une nouvelle solution.

Toutes les informations, actualités et nouveautés sont sur le site Web de la S.G.N. : <http://sgn.univ-lille1.fr>

Histoire des cristaux

Bernard Maitte

Préface d'Étienne Guyon



Pourquoi les cristaux ont-ils des faces naturelles planes et lisses ? Pourquoi présentent-ils cette symétrie qui fait leur beauté ?

Pour répondre à ces questions, l'ouvrage nous entraîne dans l'histoire de la pensée scientifique, de Pythagore à nos jours. On y voit la science faite de labeurs quotidiens, d'accumulations, d'infinis déplacements, d'emprunts, d'hésitations, d'avancées, de reculs, de controverses, de généralisations hâtives, de fulgurances, de retours à d'anciennes conceptions, revisités avec des yeux neufs. Elle est aussi une histoire de femmes et d'hommes, avec leurs affects, leurs préventions, leurs haines parfois, leur culture et leur environnement toujours.

Cette histoire, mineurs, forgerons, joailliers, techniciens, philosophes, descripteurs, chimistes, naturalistes, physiciens, mathématiciens, de diverses époques et civilisations ont contribué à l'écrire, à égalité de dignité. Elle nous montre une science en constante construction, qui a toujours à apprendre aux yeux de l'autre.

Coédition Hermann/Adapt, février 2004, 330 pages, 26 euros
ISBN : 978-2-7056-8808-0

Bernard Maitte est professeur émérite d'histoire et d'épistémologie des sciences à l'université de Lille I, membre de la Société géologique du Nord. Il a fondé et dirigé le « Forum des sciences », Centre de culture scientifique et technique. Il a obtenu les prix Jean Rostand pour son livre La lumière (Paris, Seuil, 1981) et Jean Perrin pour sa popularisation de la physique.

La Société géologique du Nord il y a 50 ans

Tome LXXXV des *Annales* (1965)

par Alain BLIECK & Francis MEILLIEZ

En 1965, la S.G.N. comptait 328 membres (Blieck *et al.*, 2014). Son conseil d'administration était composé comme suit :

Président d'honneur :	M. Pierre PRUVOST
Président :	M. Paul CELET
Premier Vice-Président	M. Pierre DOLLE
Vice-présidents :	M. Paul CORSIN et Mgr Georges DEPAPE
Secrétaire :	M. Jean PROUVOST
Secrétaire-adjoint :	M. Jacques PAQUET
Trésorier :	M. l'Abbé Gilbert TIEGHEM
Déléguée aux publications :	Mme Paule DANZE-CORSIN
Archiviste-bibliothécaire :	M. Emile MERIAUX
Conseillers :	MM. Jacques CHALARD, Gérard WATERLOT, Charles DELATTRE, Alphonse BEUGNIES, René MARLIERE et Alexis BOUROZ

La Société s'est réunie neuf fois en 1965 : en Assemblée générale le 6 janvier (élection de nouveaux membres, renouvellement du Conseil d'administration, communications orales), 7 fois en séance ordinaire les 3 février, 3 mars, 7 avril, 5 mai, 16 juin, 3 novembre et 1^{er} décembre (élection de nouveaux membres, communications orales et écrites, présentation d'ouvrages) et en réunion extraordinaire le 30 mai pour une excursion géologique dans les environs de Péronne sous la direction du président P. Celet. C'est au cours de la séance du 16 juin que fut présenté, « au nom de diverses sociétés pétrolières, un travail intitulé "Contribution à la connaissance de Bassin Paléozoïque du Nord de la France" » par MM. Villemin et Maurin (*Ann. S.G.N.*, LXXXV (3), p. 188) et c'est dans le fascicule 3 du tome LXXXV que fut publié l'article correspondant avec, entre autres, la carte qu'il est convenu d'appeler l'« écorché géologique infra-mésozoïque » (C.F.P. (M.) *et al.*, 1965). Cette synthèse géologique de subsurface de la région située entre la frontière belge et la Somme était fondée sur l'ensemble des données géologiques, en particulier souterraines, issues des recherches de houille et de pétrole. Elle reste inégalée et a grandement contribué à la publication de synthèses plus récentes. Elle correspond de fait à la fin de ce qu'on peut appeler la « période houillère » de la S.G.N. (Blieck *et al.*, 2014 ; Blieck & Meilliez, 2014) dans la suite de la parution du « plan Jeanneney » (1960) de réduction des objectifs de production des bassins miniers français. Au cours de la séance du 1^{er} décembre, G. Waterlot a donné une conférence sur les « Problèmes de captage d'eau en relation avec la géologie du Nord de la France », un sujet qui est encore largement d'actualité (Blieck *et al.*, 2015).

Ces travaux ont donné lieu à la publication de 33 articles dans le tome LXXXV des *Annales* (dont 3 résumés ; et non 32 articles décomptés par erreur dans le tableau 4 et la figure 9 de Blieck *et al.*, 2014) :

- Etude et révision de Phylloporodes Conchostracés en provenance d'U.R.S.S., par Mme S. DEFRETIN-LEFRANC,
- L'évolution des molaires chez les Rongeurs. Interprétation des dents jugales des Castoridae d'Europe, par le Dr. M. FRIANT,
- Contribution à l'étude pétrographique du poudingue du « Caillou-qui-bique » et des formations connexes (Roisin, Belgique), par Jean-Claude FOUCHER,
- Résultats obtenus à la suite de l'exécution d'un nouveau forage dit « forage du jardin d'enfants » à l'établissement thermal de Saint-Amand-les-Eaux (Nord), par G. DASSONVILLE,
- Chenal quaternaire dans le loess de la Briqueterie de Vimy (P.-de-C.), par P. DOLLE,
- Utilisation de la thermoluminescence naturelle des quartz et des feldspaths détritiques dans l'étude de quelques formations sédimentaires siciliennes, par P. BROQUET & J.-M. CHARLET,
- A propos d'un échantillon de pyrite trouvé dans un forage au lieu-dit « Les Fouées », commune de Ferrière-la-Grande (Nord), par Daniel LIMACHER & Jean PROUVOST,
- A propos de l'âge de la série de Saïghan et du charbon en Afghanistan, par Albert F. DE LAPPARENT & Jacques DE LAVIGNE,
- La flore oligocène de Cervera (Catalogne). Données complémentaires, par Georges DEPAPE & Denise BRICE,
- Platanes actuels et Platanes fossiles [résumé], par G. DEPAPE & D. BRICE,
- Essai de reproduction de formations gréseuses minéralisées, par Jean PROUVOST,
- Corrélations palynologiques entre les groupes d'Auchel-Bruay et de Douai (Puits du Midi) des H.B.N.P.C., par B. DECLERCQ-LEFEBVRE,
- Contribution à l'étude des microspores de différents niveaux du Westphalien C inférieur. Corrélations palynologiques entre les groupes d'Auchel-Bruay et de Béthune-Nœux, par Jean-Pierre LAVEINE,
- Description d'un nouveau genre de forme : *Corsinipollenites*, par E. NAKOMAN,
- Découverte d'une faune graptolitique géante dans le Llandovérien et le Tarannonien inférieur des environs de Porto (Portugal), par Bernard WATERLOT,
- Nouvelles formes de spores et pollens provenant de charbons primaires et tertiaires de divers gisements turcs, par B. AGRALI, E. AKYOL, Y. KONYALI, Paule M. CORSIN & J.-P. LAVEINE,
- Recherches sur la flore mio-pliocène de la Montagne d'Andance (Coiron – Ardèche), par Denise BRICE,
- Observations récentes sur la partie ouest de l'Anticlinal du Mélantois, par Bertrand FENET,
- Sur quelques caractères du Dévonien de la région de Benasque (Province de Huesca, Espagne), par Michel WATERLOT,
- Identification et corrélations, par les mégaspores, des couches de la base du Westphalien C dans le groupe d'Auchel-Bruay des H.B.N.P.C., par Stanislas LOBOZIAK,

- Le décrochement de Barbençon-Erquelines [Ardenne belge], par Alphonse BEUGNIES,
- Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France, par les sociétés pétrolières suivantes : Compagnie Française des Pétroles [C.F.P. (M.)], Compagnie des Pétroles du Sud-Est parisien (COPESEP), Régie Autonome des Pétroles [R.A.P.] & Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine [S.N.P.A.], ces deux dernières ayant donné naissance avec le Bureau de recherche de pétrole (B.R.P.) à la Société Nationale Elf Aquitaine (S.N.E.A.) absorbée ultérieurement par le groupe Total (voir https://fr.wikipedia.org/wiki/Elf_Aquitaine),
- Microflore infraliasique du Cotentin, par M. RIOULT (stratigraphie) & J. LEVET-CARETTE (palynologie),
- Technique d'étude des limbes fossiles, par P. DOLLE & J.-P. LAVEINE,
- Répartition stratigraphique des mégaspores des faisceaux de Six-Sillons et d'Ernestine (Westphalien C) dans la partie occidentale du Bassin Houiller du Nord de la France, par S. LOBOZIAK,
- *Cyrtinopsis foucauldi* Le Maître [un brachiopode spiriféridé], par Dorothee LE MAITRE,
- 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, par Paule M. CORSIN, J.-P. LAVEINE, J. LEVET-CARETTE & S. LOBOZIAK,
- Chitinozoaires du Siluro-Dévonien dans le nord du Massif Armoricaïn, par Maurice-Jacques GRAINDOR, Michel ROBARDET & Philippe TAUGOURDEAU,
- Influence de la tectonique tangentielle régionale sur la structure des Coëvrons [Mayenne], par M.-J. GRAINDOR & Marie-Madeleine ROBLLOT,
- Le sous-sol de la Cité Scientifique d'Annappes, par Antoine BONTE,
- Sur un *Dadoxylon* [genre de forme de bois fossile] de la région de Saint-Etienne (Loire), par Yves LEMOIGNE,
- La succession des zones de faciès dans la partie occidentale de la chaîne bordière des monts Péloritains (Sicile nord-orientale) [résumé], par Patrick ANDREIEFF & Gérard DUEE,
- Caractères des houilles de Dara-e-Souf (Turkestan afghan), par Emile MERIAUX.

Les sujets traités relèvent de paléontologie (animale et végétale : 20 articles), de pétrographie (3 articles), de minéralogie (2), d'hydrogéologie (1), de science du Quaternaire (1 article sur des loess), de stratigraphie – cartographie (4) et de tectonique (3) [total de 34 parce que l'un des articles concerne deux de ces thèmes]. C'est donc la paléontologie qui domine avec, en particulier, 9 articles de paléobotanique et palynologie du Carbonifère, dans la droite ligne de la période 1960-1979 des *Annales* (Table générale 5, Blicek *et al.*, 2014, fig. 11C et tabl. 8). Si l'année 1965, comme dit ci-dessus, peut être considérée comme correspondant à la « fin de ce qu'on peut appeler la "période houillère" de la S.G.N. », il n'en reste pas moins qu'elle s'inscrit dans une période où les publications issues des travaux de l'école lilloise de paléobotanique sont abondantes et variées. En matière de paléozoologie, l'article de S. Defretin-Lefranc sur les "conchostracés", un groupe paraphylétique d'arthropodes phyllopoïdes est remis à l'honneur dans les colonnes du tome 22 des *Annales* avec les articles d'Hennion *et al.* (2015) et Cuvelier *et al.* (2015) qui dressent les catalogues raisonnés des collections lilloises (Université et Musée d'histoire naturelle) de diplostracés, un ordre d'arthropodes contenant les anciens « conchostracés » (Arthropoda : Crustacea : Branchiopoda : Diplostraca). La tectonique est assez bien présente dans ce tome LXXXV (3 articles) comme pour la période 1960-1979 (Blicek *et al.*, 2014, fig. 11D). A noter qu'en dehors du Carbonifère du sous-sol du bassin minier, les autres parties de la géologie régionale (*s.l.*) sont également traitées : le poudingue dévonien du « Caillou-qui-bique » à l'est de l'Avesnois, un forage à St Amand-les-Eaux, le loess de la Briqueterie de Vimy, une pyrite de Ferrière-la-Grande, l'Anticlinal du Mélançois (un sujet de nouveau d'actualité sous la forme de modélisations en cours), le sous-sol de la Cité Scientifique d'Annappes et bien entendu l'écorché géologique infra-mésozoïque entre la frontière belge et la Somme, qui couvre l'ensemble de

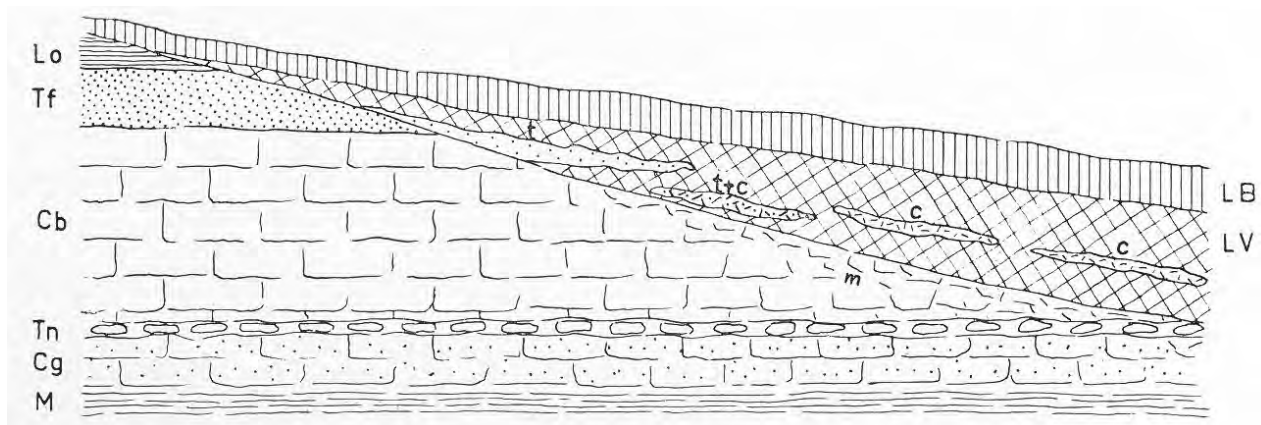


Fig. 1. — Fac-similé de la figure 1 de l'article de Bonte (1965) : coupe schématique du sous-sol de la Cité Scientifique d'Annappes. Légendes : LB, limon brun ; LV, limon vert à granules de craie ; lentilles irrégulières de granules de tuffeau (t), de tuffeau et de craie (t+c), de craie (c) ; m, marnettes ; Lo, Argile de Louvil ; Tf, tuffeau landénien ; Cb, craie blanche ; Tn, tun ; Cg, craie glaucouneuse ; M, marnes.

Fig. 1. — Facsimile of figure 1 of Bonte's (1965) paper : schematic section of the substratum of the Annappes scientific campus. Captions : LB, brown silt ; LV, green silt with chalk pebbles ; irregular lenses of Tuffeau stone (t), of Tuffeau and chalk (t+c), of chalk (c) ; m, 'marnettes' (weathered chalk) ; Lo, Louvil Clay ; Tf, Landenian (Thanetian) Tuffeau stone ; Cb, white chalk ; Tn, 'tun' (hardground – nodular chalk) ; Cg, glaucouitic chalk ; M, marls.

la région. Notons en particulier l'article d'A. Bonte sur le sous-sol de la Cité Scientifique d'Annappes qui s'attache à la « nature du sous-sol » (lithostratigraphie : craie « sénonienne », « tuffeau » landénien et limons quaternaires), à ses incidences géotechniques (taux de travail, tenue des fouilles) et à quelques « anomalies » géologiques (poches de dissolution, failles). A. Bonte dénonçait, dans cet article, l'absence d'étude géologique, laquelle n'était pas encore obligatoire. Sous une apparente simplicité de composition et de structure, les très nombreux travaux réalisés depuis 50 ans ont démontré que le détail révèle souvent des surprises désagréables comme des poches de dissolution, ou des fissures plus ou moins élargies par karstification.

Nous terminerons cette revue du tome LXXXV des *Annales* en nous tournant de nouveau vers Alphonse Beugnies que les présents signataires ont fréquenté comme guide sur le terrain et, pour l'un de nous, comme directeur de thèse de doctorat. M. Beugnies, président sortant de la S.G.N. en janvier 1965 (au cours de l'A.G.), passait le flambeau de la Société à son successeur Paul Celet en ces termes au cours de la séance du 3 février : « *Aussi est-ce avec beaucoup de modestie que je m'adresserai à présent à notre nouveau président. Eh ! oui, mon cher Celet, je ressemble davantage à la cigale de la fable et aujourd'hui la Société, lassée de ma musique, fait appel à ta compétence pour la mener un peu plus loin et un peu plus haut. Tu seras certainement l'un de ses meilleurs guides. Mais avant que tu ne me dises : "Vas danser maintenant !" , laisse-moi te souhaiter une fructueuse et brillante présidence à l'égal de tes mérites.* » Ce à quoi répondait M. Celet de la façon suivante : « *Mon cher prédécesseur, il ne m'appartient pas de faire ici votre éloge, mais tous nos confrères ont pu admirer avec quel zèle empreint d'une certaine pointe d'humour, vous avez dirigé nos débats, reprenant en main la Société momentanément délaissée par un Président défaillant, assistant fidèlement à toutes nos réunions et assumant les charges de la présidence avec une remarquable autorité.* » Concluons simplement en faisant remarquer que cet échange courtois définit pleinement la fonction du Président de la Société qui se doit d'être compétent, zélé et fidèle pour la mener « *un peu plus loin et un peu plus haut* » avec humour et autorité ...

Remerciements. — Francis Amédéo (Calais) nous a aidés dans la traduction en anglais des termes régionaux de 'tun' et 'marnettes' de la figure 1.

REFERENCES CITEES

- BLIECK, A., AUGUSTE, P., MEILLIEZ, F. avec la collaboration de AMEDRO, F., MAITTE, B., REYNAUD, J.-Y., VERMAUT, O. & GEROUDET, M.-M. (2015). — La Société Géologique du Nord – 150 ans d'histoire. Exposition virtuelle IRIS – Bibliothèque numérique en histoire des sciences ; World Wide Web address : <http://iris.univ-lille1.fr/expo/sgn> ; licence Creative Commons Attribution.
- BLIECK, A. avec la collaboration de 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. & MEILLIEZ, F. (2014). — *La Société Géologique du Nord – Grandeur, décadence et renaissance d'une société savante*. Société des Sciences, de l'Agriculture et des Arts de Lille, conférence du vendredi 19 décembre 2014 ; World Wide Web address : <http://sgn.univ-lille1.fr/sgn/pdf/SSAAL-141219-CONF-Blieck.Meilliez-SGN-v4b-reduit.pdf>; fichier pdf 7 Mo.
- BONTE, A. (1965). — Le sous-sol de la Cité Scientifique d'Annappes. *Annales de la Société géologique du Nord*, **LXXXV** (3) : 357-367.
- C.F.P. (M.), COPESEP, R.A.P. & S.N.P.A. (1965). — Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France. *Annales de la Société géologique du Nord*, **LXXXV** (3) : 273-281 (avec trois cartes en dépliants hors texte : isobathes du toit du Paléozoïque, anomalie de Bouguer, écorché géologique infra-mésozoïque).
- CUVELIER, J., HENNION, M., GALLEGRO, O. & VACHARD, D. (2015). — Palaeontological collections of Lille 1 University. 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.F., 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.



BUILD ON US

www.soletanche-bachy.com

→ Intervenant partout dans le monde pour le compte de clients publics ou privés, Soletanche Bachy s'attache à proposer les meilleures solutions techniques et contractuelles : elle apporte aussi bien des compétences polyvalentes d'ensemblier dans le cadre de grands projets d'infrastructures, que celles de spécialiste maîtrisant l'ensemble des procédés de géotechnique, de fondations spéciales, de travaux souterrains, d'amélioration et de dépollution des sols.



I ZAC Concorde I VIRTY- SUR-SEINE, FRANCE I
Comblement de carrière



SOLETANCHE BACHY

ETAT DES EAUX ET PROTECTION DE LA RESSOURCE DANS LE BASSIN ARTOIS-PICARDIE

Water state and protection through the Artois-Picardie water district

par Francis MEILLIEZ (*), Jean PRYGIEL (**) & Hervé COULON (***)

Résumé. – La situation régionale de la ressource en eau atteint un stade critique, ce qui peut paraître surprenant sur un territoire réputé pluvieux. Un examen attentif de l'hydrosystème dans sa globalité est nécessaire. La ressource est-elle suffisante ? Ou bien les usages ne sont-ils pas adaptés au fonctionnement hydrogéologique de ce territoire ? Ce colloque essaye de cerner et hiérarchiser les questions.

Abstract. – *Water resources reach a critical point in the region. This is surprising since that region is said to be rainy. Attention has to be paid to the hydrogeological position. Is the resource abundant enough ? Or are the uses unsuitable to the hydrogeological working of that territory ? This colloquium tries to encircle and order questions.*

Mots clés. – Ressource en eau, hydrogéologie, Nord – Pas-de-Calais, agence de bassin, aquifère de la craie.
Keywords. – *Water resource, hydrogeology, Nord – Pas-de-Calais, water basin agency, chalk aquifer.*

I. — INTRODUCTION

Le 3 décembre 2014, l'Agence de l'Eau Artois-Picardie (AEAP) a accueilli à Douai une Journée d'Étude impulsée par la Société Géologique du Nord. La salle de conférences était comble, ce qui souligne l'intérêt du sujet, son actualité et sa prégnance. Quelques jours plus tard paraissait la revue semestrielle *Géologues*, consacrée aux ressources en eau à l'échelle régionale. Bernard & Vallée (2014) y ont présenté la situation du bassin Artois-Picardie que l'on peut résumer à deux caractéristiques. D'une part un réseau hydrographique insuffisant fait que 85% de l'eau potable produite dans ce bassin est d'origine souterraine, depuis la nappe de la craie pour l'essentiel. D'autre part le débit moyen de l'ensemble du réseau est de l'ordre de 120 m³s⁻¹ alors que celui du seul Rhône est de 1700 m³s⁻¹. Et les auteurs d'insister : « Au nord des collines d'Artois, plus de 3,8 millions d'habitants diluent leurs rejets après traitement dans un débit de 65 m³s⁻¹ en situation moyenne ». On comprend donc les enjeux, tant en alimentation qu'en assainissement, qui pèsent sur la ressource. Un climat trop souvent pluvieux ne facilite pas la perception par la population du stress hydrique – l'expression est de G. de Marsily, de l'Académie des Sciences - qui commence à marquer le territoire de l'aire métropolitaine (de Béthune à Tournai ; de Lens à Courtrai). Cette situation résulte de nos modes de vie et de nos conceptions successives de l'aménagement du territoire.

Ses conséquences sont plus urgentes à anticiper que les effets du réchauffement climatique qu'elles risquent d'amplifier.

La matinée de notre Journée d'Étude était le temps du constat sur l'état de la ressource, qualitatif et quantitatif, sur la stratégie de surveillance. Elle a été ponctuée par un débat au cours duquel la société civile a pu exprimer ses questionnements (Conseil de Développement de la Métropole Européenne de Lille, groupe Prospective du Conseil Régional Nord – Pas-de-Calais, divers participants). L'après-midi a été plus diversifiée avec l'avis d'un météorologiste sur l'évolution du climat et son incidence sur la ressource, suivi d'exposés techniques sur l'amélioration de la qualité de l'alimentation en eau potable par la mise en œuvre de la protection des captages. Un élu a pu faire état d'une opération territoriale de protection de la ressource en eau. Amorcée par l'accueil du directeur de l'AEAP, Olivier THIBAUT, puis d'une conférence invitée de Ghislain de MARSILY, académicien, la Journée a été clôturée par Jacques VERNIER, ancien maire de Douai, ancien directeur de l'AEAP et conseiller régional. La présente communication écrite résume les interventions techniques, dont les présentations sont par ailleurs consultables en ligne (lien en bibliographie). Sont présentées ensuite la démarche du conseil de développement (Meilliez & Georget, ce volume) et deux communications écrites sollicitées par la SGN auprès de leurs auteurs (de Marsily, ce volume ; Delay & Ackerer, ce volume).

(*) Université de Lille - Sciences et technologies, UMR 8187 LOG du CNRS, UFR Sciences de la Terre, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex ; francis.meilliez@univ-lille1.fr

(**) Agence de l'Eau Artois-Picardie, 200 rue Marceline, Centre Tertiaire de l'Arsenal, BP 818, 59508 Douai cedex ; j.prygiel@eau-artois-picardie.fr

(***) Département Risques et Développement des Territoires - CEREMA - Direction Territoriale Nord Picardie, 2 rue de Bruxelles, CS 20275, 59019 Lille cedex ; hervé.coulon@developpement-durable.gouv.fr

II. — LES EXPOSÉS

Olivier PREVOST, chef du service Milieux et Ressources naturelles, à la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL), a présenté un état quantitatif de la ressource régionale, réalisé par l'intermédiaire du suivi de l'évolution de la ressource souterraine et du débit des cours d'eau. Depuis 2002, les prélèvements ont tendance à baisser tant en surface ($\approx 110 \text{ Mm}^3$ en 2013) qu'en sous-sol ($\approx 300 \text{ Mm}^3$ en 2013) ; cette baisse est particulièrement marquée dans l'industrie, tandis que les « ménages » diminuent leur consommation d'eau potable, d'origine souterraine. Est-ce un effet de l'augmentation du coût unitaire du mètre cube qui inclut les coûts d'assainissement ? Le suivi des niveaux piézométriques est assuré par un réseau de 65 stations qui télétransmettent chaque jour une information. Les séries historiques de données, accessibles en ligne (www.adeseaufrance.fr), sont publiées avec parfois près de cent ans de recul. Les prélèvements souterrains assurent plus de 92% de l'alimentation en eau potable du bassin Artois-Picardie, ce qui est spécifique par rapport aux autres bassins hydrographiques français. Cette consommation pose localement un problème difficile de reconstitution naturelle de la ressource : dans le versant-NE de la métropole lilloise, la nappe du Calcaire Carbonifère, partagée avec la Belgique, a baissé de 60 m en 60 ans, depuis 1945.

Cédric HALKETT, expert en qualité des eaux pour l'AEAP, a précisé l'état qualitatif des eaux continentales. Connaître le fonctionnement des milieux aquatiques est une nécessité pour orienter la prise de décisions sur les actions à mener et rendre compte de l'efficacité des politiques de gestion. Le contexte général est celui de la Directive Cadre Eau du Conseil de l'Europe (2000/60/CE) qui a fixé un objectif de « bon état de la ressource » et invité les Etats à se donner les moyens de progresser vers cet objectif. Un point d'étape est en préparation et sera rendu public fin 2015 ; lui succèdera une autre étape de programmation jusqu'en 2021. Un cours d'eau est un système complexe dans lequel le climat conditionne les précipitations, la nature du sol et de son recouvrement conditionne le ruissellement et l'infiltration, la composition et la structure du sous-sol conditionnent la circulation dans les aquifères et la localisation de leurs émergences. L'ensemble des êtres vivants et de leurs activités participe au recouvrement du sol. En plan, un cours d'eau est un drain majeur collectant les apports de ses affluents et d'un ruissellement de proximité. Sur ce principe sont définis 66 masses d'eau de surface dont la surveillance est organisée. Un Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SDAGE) met en cohérence l'ensemble. Mis en place en 2007, il est révisé en 2015. La surveillance est bâtie sur plusieurs indicateurs physiques, chimiques, biologiques. Ce suivi coûte environ 1,5 M€/an. La notion de « bon état » est très délicate à manier. C'est une approche normative, reposant sur la connaissance d'une situation de référence et les écarts constatés avec la situation réelle. Les résultats sont encourageants mais insuffisants : l'amélioration est lente. Une des raisons est que la technologie évolue, devient plus précise et exigeante. Il s'ensuit qu'un état qui aurait été jugé bon il y a trois ans peut ne plus s'avérer suffisant aujourd'hui. Il faut donc réfléchir à l'évolution technique, voire penser à mobiliser aussi d'autres modes d'action. Par exemple, une revalorisation des zones humides dont les fonctions tampons sont bien connues vis-à-vis de la filtration des eaux ainsi que de l'écrêtement des crues, pourrait contribuer à améliorer naturellement certaines ressources.

Frédéric HOTTIN, chargé d'études sur les milieux naturels aquatiques à l'Agence, a complété l'analyse quantitative par une analyse qualitative. Il a souligné la nécessité de mieux connaître le fonctionnement des milieux souterrains. Notamment les

phénomènes qui accompagnent le transfert de l'eau depuis la surface jusqu'à la nappe sont très complexes et difficiles à percevoir directement de la surface. Un exemple classique est le fait qu'une pluie importante venant après une période de sécheresse relative entraîne deux effets : d'une part un lessivage des polluants de surface emportés vers les cours d'eau, d'autre part une remontée de la nappe qui vient se contaminer par solubilisation de polluants retenus dans le sous-sol. Les précipitations sur le Nord – Pas-de-Calais sont de l'ordre de $16\,000 \text{ Mm}^3/\text{an}$: 5% ruissellent ($900 \text{ Mm}^3/\text{an}$), 22% s'infiltrent ($3\,500 \text{ Mm}^3/\text{an}$), moins de 3% sont prélevés ($470 \text{ Mm}^3/\text{an}$), et donc environ 70% sont repris par l'évapotranspiration de la végétation. Il est commode d'examiner les impacts d'origine humaine selon qu'ils sont urbains, agricoles ou industriels. Et il est impératif de ne pas oublier que toute dégradation qualitative induit une diminution quantitative. De façon analogue à la surface, on a défini 18 masses d'eau souterraine, surveillées par 193 stations, au travers de deux campagnes annuelles. A chaque fois de nombreux paramètres physiques, chimiques et biologiques sont mesurés. Mais une norme peut être adaptée à une région et non à une autre, notamment pour des raisons géologiques (composition du sous-sol). La mise en œuvre de la Directive Cadre Eau (DCE) en tient compte en différenciant les protocoles selon le contexte local et selon les produits. L'évaluation du « bon état » est faite sur des moyennes annuelles glissantes sur 6 ans. La réflexion engagée quant à l'état de la situation en 2021 a conduit à définir un « risque de non-atteinte des objectifs environnementaux en 2021 », et donc pour l'évaluer élaborer des scénarios d'évolution des polluants. Il faut espérer que cette réflexion conduira à réfléchir à des solutions alternatives permettant d'éliminer une telle production. Il est clair que progresser sur la qualité des eaux souterraines demande une connaissance accrue des conditions de gisement, de transfert, et d'échange entre l'eau et les milieux qu'elle traverse.

Delphine MARTIN, directrice de la Planification et de l'Evaluation à l'Agence a présenté l'état des lieux du SDAGE et le programme de mesures, appelant à passer « d'une approche sectorielle à une approche intégrée ». Notre bassin Nord – Picardie, pour l'essentiel, constitue l'amont du bassin versant de l'Escaut qui se poursuit en Belgique, situation qui justifie de s'inscrire dans la référence européenne qu'est la DCE. Sa mise en œuvre passe par le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion de l'Eau (SDAGE) qui met en cohérence les données de surface et du sous-sol. Ses recommandations visent à améliorer les pratiques agricoles, à décliner des directives régionales adaptées aux besoins, à encourager le redéveloppement de la biodiversité notamment en revalorisant les zones humides. On peut espérer que cette logique incite à limiter l'emprise de l'habitat léger de loisir. Le SDAGE met en avant aussi des actions curatives : développer les interconnexions pour éviter les situations de rupture d'approvisionnement, traiter l'eau pour la rendre potable, lutter contre les fuites de réseaux, protéger les captages.

Jean-Michel GOLYNSKI, météorologiste à Météo-France et Radio-France, a présenté quelques réflexions sur l'influence éventuelle du réchauffement climatique sur la ressource en eau. Les paramètres mesurables sont l'insolation, la température, la hauteur de précipitations et la teneur en eau de l'atmosphère, le vent et la pression atmosphérique pour les plus importants. Les données statistiques climatiques ont une valeur globale, évaluées sur des moyennes, ce qui demande quelques précautions d'interprétation. La série des températures mesurées de 1951 à octobre 2014 montre une répartition globale inhomogène, qui ne correspond pas à un modèle latitudinal que

l'on pourrait imaginer variant de façon continue des hautes aux basses latitudes. D'ailleurs, sur la même période, la répartition des températures mesurées paraît également très aléatoire et difficilement interprétable. Rappelons que, à l'échelle de quelques 400 000 ans, les températures que nous connaissons actuellement ont déjà été enregistrées par les isotopes qui servent de paléothermomètres. Sur la période 1951-2000, la tendance à l'augmentation des précipitations sur la moitié nord de la France n'est statistiquement pas significative. A l'échelle globale, une simulation du taux de précipitations sur la période 2080-2099, comparée à la période 1980-1999 suggère un accroissement de l'aridité dans les ceintures tropicales dont le bassin méditerranéen. Mais il faut être conscient que les modèles numériques globaux n'indiquent que des tendances générales ; leur maillage est trop lâche pour qu'ils puissent être interprétés en tendances régionales. Les impacts invoqués par le GIEC (Groupement Intergouvernemental pour l'Etude du Climat) annoncent un adoucissement des températures avec des extrêmes plus prononcés, une réduction possible de la ressource en eau disponible, une augmentation des événements climatiques extrêmes, dont les inondations. Dans le Nord – Pas-de-Calais la moyenne annuelle de précipitation est de 840 l/m² ; elle pourrait augmenter en hiver de 10 à 40% et diminuer en été de 20 à 40%. Le bilan est quasi nul. C'est la répartition des pluies qui pourrait le plus changer. A titre d'exemple, l'automne 2014 a été marqué par un nombre élevé d'épisodes cévenols, mais cela ne suffit pas à y reconnaître la marque du réchauffement climatique. De tels épisodes caractérisent le climat méditerranéen. En octobre 1940, dans les Pyrénées-Orientales il est tombé 1000 mm d'eau en 24 h, soit quatre fois plus que le plus fort événement de cet automne.

Alain GUILLARD, adjoint au directeur de la Santé publique et environnementale (Agence Régionale de la Santé Nord – Pas-de-Calais), a ensuite exposé les enjeux et bilan autour de la protection des captages d'eau destinée à la consommation humaine. Depuis le 1er avril 2010, l'ARS est le service instructeur pour mener la procédure administrative de la Déclaration d'Utilité Publique (DUP) en lien avec les services de l'Etat concernés. Le contexte législatif de la procédure est rappelé. L'arrêté préfectoral de DUP est une protection « sanitaire » des captages d'eau destinée à la consommation humaine et non de la ressource dans sa globalité. La responsabilité (sanctions pénales et administratives) de la collectivité peut être mise en cause en l'absence d'instauration des périmètres de protection réglementaires. L'avis de l'hydrogéologue agréé ne sera favorable que si l'environnement du captage, la quantité et la qualité de l'eau permettent de pérenniser le captage dans le temps par la mise en place des périmètres de protection et des mesures de protection adaptées. La région Nord – Pas-de-Calais compte 741 captages actifs d'eau destinée à la consommation humaine, gérés par 225 structures différentes ; 90% bénéficient d'une DUP. Le bilan régional est plutôt positif vis-à-vis de la moyenne nationale (70%), mais il y a quand même une centaine de procédures en cours, tous types confondus. Pour progresser, plusieurs mesures sont à considérer : améliorer la maîtrise du foncier, actualiser les DUP anciennes, mettre aux normes les assainissements à risques, mettre en place un comité de suivi des champs captants, favoriser la fusion des syndicats dans le cadre des intercommunalités, améliorer les pratiques agricoles. L'objectif de 100% de mise en place des captages n'est pas suffisant. Cet objectif doit être accompagné par des politiques publiques avec les partenaires et les services de l'Etat.

Présentant le point de vue national, Denis DELCOUR, ingénieur général des Ponts, des Eaux et des Forêts, s'est fait l'écho du rapport de mission « pour une simplification et une

meilleure efficacité des dispositifs relatifs à la protection des captages d'eau potable », daté de juillet 2014. Jugeant les résultats français insuffisants au regard de la DCE, ce rapport recommande de simplifier les procédures, de les coordonner, voire de les fusionner, et enfin de doter les collectivités de moyens accrus, tant juridiques que techniques et financiers. Notamment il est souhaitable d'étendre la compétence de la commune et de transférer de plein droit aux communautés d'agglomération et aux communautés de communes la surveillance et la prévention des pollutions diffuses. Ce qui entraînera une révision et une harmonisation des périmètres de protection des captages existants. Il est également recommandé d'intégrer les informations relatives à la prévention des pollutions diffuses dans le rapport annuel sur le prix et la qualité du service public de l'eau potable, et d'informer le consommateur d'eau sur la qualité de l'eau brute et sur les moyens engagés pour la préserver. La maîtrise foncière des parcelles concernées par un captage doit aussi être améliorée en mobilisant tous les acteurs au bénéfice de la commune. La lutte contre les pollutions diffuses doit être une priorité.

Philippe CHEVAL, président du Syndicat Intercommunal d'Eau Potable du Santerre a ensuite exposé comment toutes ces questions et problématiques liées à la protection de la ressource se concrétisent au quotidien sur un territoire majoritairement agricole couvrant 83 communes et alimentant 18 574 abonnés pour une consommation d'eau d'un peu plus de 2,5 Mm³ en 2013. Il a insisté sur le nécessaire engagement des élus et sur la concertation entre acteurs du territoire pour mener des actions de réduction des pollutions diffuses.

Pour conclure la journée, Jacques VERNIER, ancien directeur de l'Agence de l'Eau, ancien député-maire de Douai, a rappelé les principales idées à retenir des interventions. Quels que soient les progrès technologiques disponibles, il est essentiel de ne pas oublier l'objectif des mesures que requiert la surveillance de l'état de la ressource. Techniquement, le gain de performance est toujours possible. Mais justifie-t-il le coût marginal et le surcoût qu'exige une précision accrue ? Justifie-t-il la généralisation de la mesure d'un composant chimique rare supplémentaire ? Concernant la protection de la ressource, les mesures préventives seront toujours préférables aux mesures curatives. Dans cet esprit, il faudra passer par une protection des points de captage au niveau de l'aire d'alimentation pour intégrer la lutte contre les pollutions diffuses de toutes origines (agricoles, urbaines, industrielles), la responsabilité étant collective. Il est intéressant de noter la convergence entre certaines recommandations de la Commission Générale de l'Environnement et du Développement Durable (voir le site internet) et les présentations faites durant ce colloque : étendre la compétence de la commune et la mission de service public de l'eau à la qualité des eaux brutes des captages, et donc à la lutte contre les pollutions diffuses dans les périmètres de protection ; unifier les deux procédures actuelles de protection des captages (code de la santé publique et code de l'environnement) en une seule, au sein du code de la santé publique, et mieux définir l'objet des périmètres de protection et les outils juridiques qui s'y rattachent ; compléter le contenu du plan d'action et y intégrer les modalités de suivi et d'évaluation des résultats sur la qualité des eaux brutes et en matière de lutte contre les pollutions diffuses.

Remerciements. — Les porteurs de ce projet remercient très vivement l'Agence de l'Eau et son directeur, Olivier THIBAUT pour l'organisation logistique de cette journée. Ils remercient aussi les différents intervenants de leur participation, et les auteurs des contributions écrites : G. de MARSILY, académicien, et F. DELAY, professeur des universités.

BIBLIOGRAPHIE

- BERNARD D. & VALLEE K. (2014). — Problématique des eaux souterraines au travers de l'état des lieux des districts hydrographiques Escaut, Somme et Côtiers Manche, Mer du Nord – Meuse (partie Sambre). *Géologues*, **183** : 18-23.
- DE MARSILY G. (ce volume). — L'eau, une ressource renouvelable convoitée et inégalement répartie. *Annales de la Société géologique du Nord*, 2e série, **22** : 17-28.
- DELAY F. & ACKERER P. (ce volume). — La réduction des modèles hydrologiques pour des applications pratiques moins fastidieuses. *Annales de la Société géologique du Nord*, 2e série, **22** : 29-40.
- MEILLIEZ F. & GEORGET A. (ce volume). — Le citoyen consomm'acteur de l'eau. *Annales de la Société géologique du Nord*, 2e série, **22** : 15-16.

WEBOGRAPHIE

<http://www.eau-artois-picardie.fr/Colloque-du-3-decembre-2014-Etat.html>

<http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr>

LE CITOYEN CONSOMM'ACTEUR DE L'EAU

The citizen is both a customer and an actor of water flow

par Francis MEILLIEZ (*) & Annick GEORGET (*)

Résumé. – L'apparente abondance de l'eau en région masque une situation à limite de rupture si l'on ne change pas le comportement individuel et collectif du citoyen. La prise de conscience actuelle précède, on l'espère, une capacité à agir réfléchie et responsable.

Abstract. – *In spite of an apparent excessive rainwater the region is facing a breaking risk. The citizen has to modify his individual and collective behaviour to avoid that break. Present increasing consciousness leads to ability to think about and to be responsible, as expected.*

Mots clés. – Ressource en eau, qualité de l'eau, Métropole Européenne de Lille, Conseil de développement, démocratie participative.

Keywords. – *Water resource, water quality, Lille European Metropole, Development Council, participative democracy.*

I. — INTRODUCTION

L'arrivée à échéance du contrat de distribution de l'eau potable dans la communauté urbaine de Lille a été l'opportunité pour ouvrir un débat public sur les modalités de gestion de la production et de la distribution. De nombreuses structures, associatives surtout, s'y sont investies, illustrant ainsi le besoin croissant qu'a le citoyen de participer aux décisions qui le concernent. Le débat a aussi été instauré, conformément aux incitations légales, dans des organismes publics. Le Conseil de Développement de la Communauté Urbaine de Lille a ainsi été saisi d'une demande d'avis de la part de la présidente (septembre 2012). Après avoir rendu un avis en janvier 2013, le groupe de travail a estimé que le sujet méritait d'être approfondi, et a décidé de prolonger par une auto-saisine, engageant une nouvelle phase (auditions, visites de sites) jusqu'à l'été 2015. Le Conseil Régional, déjà engagé dans une démarche sur la société de la connaissance dans le cadre de sa Direction de la Prospective, a aussi saisi l'occasion de la mise en place d'un groupe de travail sur l'eau pour tenter d'en analyser les diverses approches par le citoyen. L'initiative de la présente Journée d'Etude, prise par la Société Géologique du Nord en partenariat avec l'Agence de l'Eau Artois-Picardie, est l'occasion de montrer comment le citoyen peut en même temps être très amplement informé sur les différentes questions que pose la maîtrise de ce bien essentiel et vital qu'est l'eau au quotidien, et en même temps être désarçonné par la multitude de structures techniques qui donnent l'impression de travailler côte à côte, sans cohérence apparente sur tous les niveaux (local, régional, national). Ce court article formule des interrogations et réflexions du citoyen devant cet état de fait.

II. — LA METROPOLE DANS SON CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

Les régions du Nord de la France sont réputées pluvieuses et donc, dans l'esprit de la plupart des citoyens, ne pas être menacées de pénurie d'eau. Et pourtant les techniciens en charge de l'approvisionnement et les hydrogéologues répètent que les

fortes concentrations urbaines sont très sérieusement menacées de ruptures temporaires d'approvisionnement. Où est le problème ? En partie dans l'inégalité de la disponibilité naturelle de l'eau, en partie dans le comportement individuel et collectif des usagers. On peut admettre que la répartition des pluies est à peu près homogène sur la région, un peu plus dense dans le Haut Boulonnais et l'Avesnois qu'ailleurs. En revanche, dès qu'elle atteint le sol l'eau se comporte différemment (Fig. 1) : sur les territoires du sud, pentus et perméables, elle s'infiltré dans le sous-sol ; sur les territoires du nord, plats et imperméables, elle ruisselle. Au sud, elle contribue à renouveler la ressource souterraine régionale ; au nord, elle contribue à une situation favorable aux inondations fréquentes, peu intenses, mais pouvant durer. Le problème est que les territoires du nord sont les plus urbanisés. Le citoyen est en droit de comprendre cette disposition naturelle et de contribuer, par ses choix individuels et collectifs, à ne pas aggraver une situation préjudiciable à toute la collectivité. Cela concerne les décisions d'urbanisme, d'aménagement du territoire, les pratiques agricoles de certains territoires, etc. De plus, là où la densité de population est la plus forte, là sont les prélèvements les plus intenses dans la ressource souterraine, là aussi sont les rejets les plus abondants d'eaux grises, plus ou moins polluées. Le citoyen est aussi en droit de comprendre qu'un rejet individuel polluant n'est pas inoffensif et qu'il diffuse vers l'aval. Le raisonnement doit être le même au niveau collectif. Il faut donc une volonté politique très forte et très cohérente de la part de tous les acteurs pour faire en sorte que les rejets individuels et collectifs soient les plus faibles possibles, que le traitement des polluants au plus près de leur source doit être privilégié, qu'il s'agisse d'une maison individuelle, d'une entreprise ou d'une collectivité. Il faut aussi une volonté politique très forte pour organiser la récupération de l'eau de pluie en site urbain et l'utiliser pour des activités qui ne mettent pas en péril la santé des usagers, et ainsi diminuer la pression sur les prélèvements dans la ressource souterraine. Il faut enfin une volonté politique très forte pour optimiser les circuits de l'eau sur le territoire, éviter les doublons géographiques dans la distribution de l'eau potable, la collecte ou le traitement des eaux usées, et éviter d'exporter les insuffisances locales dans les territoires voisins, de part et d'autre de la frontière nationale.

(*) Conseil de Développement de la Métropole Européenne de Lille ; Agence de développement et d'urbanisme de Lille Métropole ; Centre Europe Azur - 323, Ave du Président Hoover, 59000 Lille ; conseildeveloppement@lillemetropole.fr

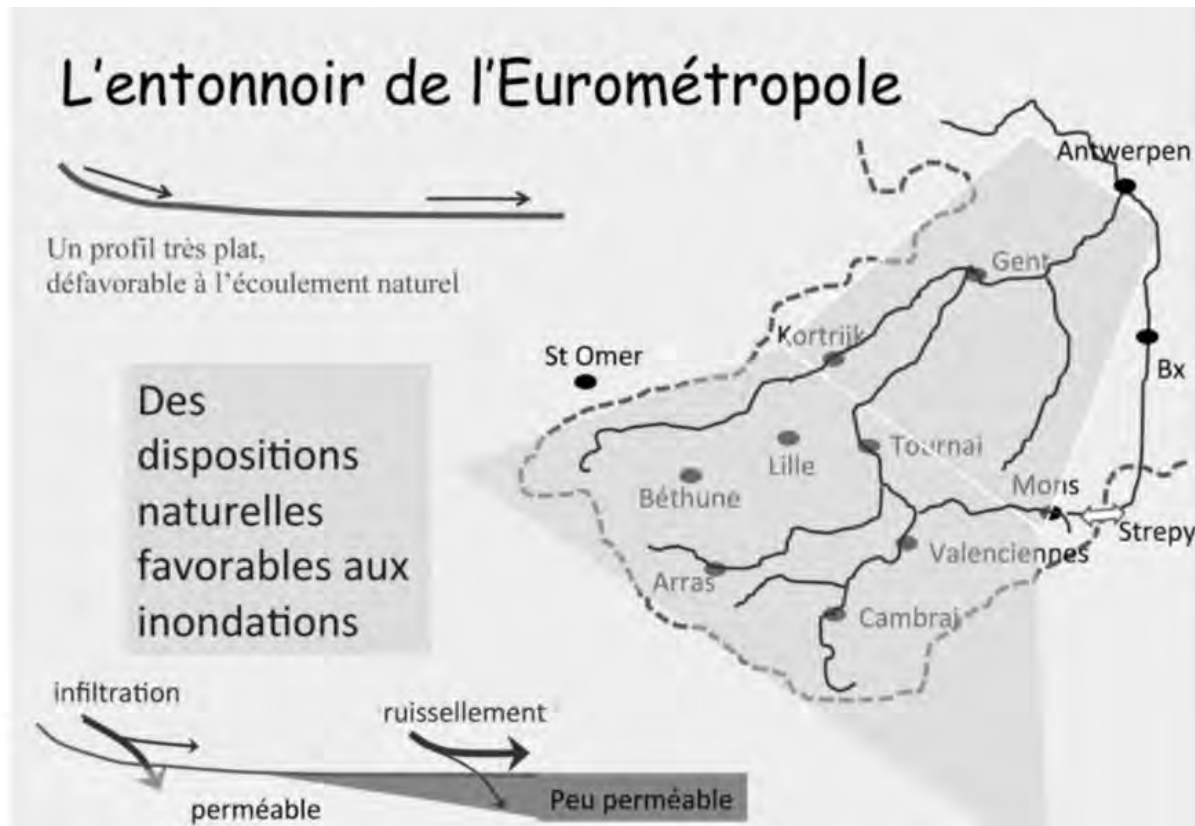


Fig. 1. – Représentation schématique de l'hydrogéologie de l'Eurométropole (Lille-Courtrai – Tournai). La plus grande densité urbaine est située à la base d'un entonnoir, sur des terrains très plats et peu perméables. Cette configuration favorise l'inondabilité. Vers le sud, les rebords du bassin versant sont plus pentus et perméables : l'eau de pluie s'y infiltre et alimente la nappe souterraine de la craie, sous une couverture de sables et d'argiles.

Fig. 1. – Sketch of the hydrogeological behavior of the Eurometropole (Lille-Courtrai – Tournai). The highest population density lies at the exit of a funnel-shaped territory, upon very flat and rather waterproof terranes. Such a feature favours flooding. Southwards, water drainage edges are sloping and pervious : rainwater is seeping downwards and feeds an underground water reservoir within the chalk, below a sandy and clayey cover.

Le Conseil de Développement a constaté la haute technicité des moyens mobilisés pour assurer la distribution d'eau consommable et le traitement des eaux consommées. Mais il a été consterné par la complexité des relations entre les différents acteurs, laissant une impression de « sur-gestion », de compétition entre certains services, voire de méfiance. L'eau est un bien partagé, qu'on le veuille ou non. C'est un produit que le citoyen consomme lorsqu'il passe à sa portée. Il peut maîtriser sa distribution mais non son approvisionnement. L'usage dégrade nécessairement la qualité du produit. Le regain de qualité se fait naturellement, mais pas assez vite par rapport au rythme de nos besoins. Faut-il adopter des mesures qui limitent les rejets et favorisent le retraitement local avec le risque de laisser passer des erreurs préjudiciables à la santé ? Alors les règlements dressent des normes pour protéger la santé. Mais ces normes créent des obligations, des contraintes logistiques et financières qui contribuent à gripper le fonctionnement de ce grand système qui peine à trouver son autorégulation. Le Conseil de Développement s'est aussi interrogé sur l'équilibre à trouver entre mesures techniques et mesures politiques pour encourager les comportements vertueux. Et le groupe de travail du Conseil

Régional s'est interrogé sur les représentations que les citoyens se construisent sur le thème de l'eau. La perception varie selon que l'individu est en situation de loisir, de travail ou simplement de vie domestique. Les mesures techniques n'auront d'effet que si elles sont encadrées de mesures politiques incitatives.

Des choix collectifs courageux et volontaires sont nécessaires, mais ils ne sauront suffire tant que le citoyen individuel n'aura pas intégré à son niveau comment ses propres décisions contribuent à la préservation d'une eau qui continue à transiter. Devenue Métropole Européenne de Lille, la communauté urbaine va accéder à davantage de compétences qui demanderont davantage de coordination entre les acteurs et davantage de vision transversale de la part des décideurs.

Remerciements. – Les auteurs remercient tous les membres du groupe de travail du Conseil de Développement de la Métropole Européenne de Lille, ainsi que le bureau du conseil pour avoir soutenu de nombreuses discussions en salle aussi bien que sur le terrain.

WEBOGRAPHIE

<http://www.eau-arts-picardie.fr>

<http://www.conseildeveloppement-lillemetropole.fr/home.html>

L'EAU, UNE RESSOURCE RENOUVELABLE CONVOITEE ET INEGALEMENT REPARTIE

Water, a renewable and desirable resource, unequally distributed

par Ghislain de MARSILY (*)

Résumé. – Le « problème de l'eau » est de grande actualité, on parle parfois de « l'or bleu », de la pénurie actuelle supposée ou annoncée, de l'effet des changements climatiques, de l'augmentation des besoins du fait de la croissance démographique. Cet article tente de réunir quelques éléments de réponse à ces questions, en donnant d'abord un ordre de grandeur des ressources, principalement en flux mais également en stock, puis des besoins, en distinguant les principaux usages de l'eau (domestique, agricole, industriel, besoins des écosystèmes...), et enfin en examinant l'adéquation besoins-ressources, aux échelles globales mais aussi locales. On définit à cette occasion les notions d'eau bleue, d'eau verte, d'eau grise et d'eau virtuelle, que l'on applique au bilan en eau de la France pour définir « l'empreinte eau ». L'effet des changements climatiques est brièvement abordé, suivi des risques de sécheresse extrêmes, des problèmes de grande pénurie et de conflits.

Abstract. – *Potential water scarcity is currently considered a common threat to mankind. In this article, we provide some answers to this question, starting with an evaluation of the resources, mostly as the annual meteoric flux, but also freshwater stocks, then of the water needs for domestic, agricultural and industrial use, and ecosystem needs; the balance between needs and resources is examined at the global and local scales. The concepts of blue water, green water, grey water and virtual water are introduced, and used to present the French water balance and its "water footprint". The expected effects of climate change are summarized, followed by the risks of severe droughts, major water scarcity, and conflicts.*

Mots clés. – Ressources en eau, besoins, changement climatique, pénuries, conflits.
Keywords. – *Water resources, water needs, climate change, water scarcity, conflicts.*

I. — INTRODUCTION

Des planètes dites telluriques (Mercure, Vénus, la Terre (et la Lune) et enfin Mars), la Terre est celle qui contient de loin la plus grande quantité d'eau, soit qu'elle en ait reçu plus que les autres à la formation du système solaire, ou qu'elle en ait perdu le moins au cours du temps. Si on aplanissait tous les continents et le fond des océans, il y aurait sur Terre un océan uniforme d'une profondeur de près de 3 000 m, alors qu'elle serait pratiquement nulle pour Mercure et la Lune, de 300 m pour Vénus et de 0,20 m pour Mars. La quantité d'eau perdue par la Terre depuis sa formation il y a 4,6 milliards d'années est estimée à environ 3 m de hauteur d'eau par rapport aux 3 000 m d'épaisseur de cet océan fictif uniforme, par dissociation de l'eau sous l'effet du rayonnement solaire dans la haute atmosphère et départ dans l'espace de l'hydrogène (insuffisamment retenu par la gravité) : c'est-à-dire presque rien. L'origine de l'eau sur Terre est débattue ; on cite l'hydrogène initial contenu dans les planétésimaux ayant formé la Terre, ou amené par le vent solaire, qui aurait réagi avec le monoxyde de carbone ; le bombardement ultérieur de la Terre par des météorites ferreuses contenant un peu d'eau. L'hypothèse du bombardement de la Terre par des comètes riches en eau a maintenant du plomb dans l'aile, depuis que la mission Rosetta et sa sonde Phylae posée le 12 novembre

2014 sur la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko ont montré que la signature en Deutérium de la glace de la comète est très différente de celle de l'eau sur Terre, comme cela avait déjà été dit à propos du Deutérium de la comète de Halley, qui avait été mesuré par la sonde Giotto en 1986 dans les gaz de la queue de la comète. A moins que les comètes ayant autrefois bombardé la Terre aient été d'une origine différente ?

La Terre est donc riche en eau, pour l'essentiel salée, et heureusement, car c'est l'évaporation de cette eau salée sur les océans qui alimente pour partie le « grand cycle de l'eau », par évaporation, condensation, et précipitation, dont le moteur thermique est le rayonnement solaire. Ce cycle alimente en eau les continents au rythme moyen de 113 000 km³/an et y maintient toute la vie et les écosystèmes que nous connaissons, pour lesquels l'eau douce est indispensable : ces flux sont, depuis toujours, presque entièrement utilisés par les écosystèmes continentaux et même côtiers, la vie s'étant partout développée jusqu'aux limites des ressources disponibles. Sur ce volume, nous en consommons actuellement de l'ordre de 2 500 km³/an. Nous prélevons davantage, mais la partie consommée est celle qui s'évapore et retourne à l'atmosphère (principalement l'eau d'irrigation), le reste s'infiltré dans les nappes et les rivières et peut être réutilisé. Mais prélevons-nous aussi de l'eau sur les

(*) Sorbonne Universités, UPMC - Université Paris 6 ; CNRS ; EPHE ; UMR 7619 Metis ; 4 place Jussieu, 75005 PARIS, et Académie des Sciences ; gdemarsily@aol.com

stocks d'eau douce contenus dans les aquifères ? La réponse est oui, mais cela ne concerne que quelques pays (dans l'ordre décroissant, l'Inde, les USA, la Chine, le Pakistan, l'Iran et le Mexique, puis de « petits » préleveurs) pour un montant de soutirages dans les stocks estimé entre 100 et 200 km³/an, c'est-à-dire peu de choses par rapport aux prélèvements sur les flux. Mais, pour les pays concernés, cette situation n'est pas durable car les stocks disponibles seront bientôt épuisés, particulièrement en Inde et en Chine, nécessitant de remplacer les prélèvements dans les stocks par des transferts d'eau depuis l'Himalaya, à partir des grands fleuves (Yang Tsé, Ganges...). Nous prélevons aussi sur les stocks d'eau douce en aval des glaciers de montagne, en train de fondre comme en Amérique du Sud, dans les Alpes ou l'Himalaya, du fait du réchauffement. Cette question est critique en Amérique du Sud, où d'ici 20 à 30 ans tous les glaciers andins auront disparu, laissant par exemple la côte Pacifique du Pérou ou la ville de La Paz en Bolivie avec des ressources en eau très fortement réduites. Depuis son apparition sur Terre, l'homme a donc utilisé à son profit et dérobé peu à peu aux écosystèmes naturels une partie sans cesse croissante des ressources issues du cycle hydrologique naturel, essentiellement pour faire fonctionner à son avantage des écosystèmes agricoles artificiels. Insignifiant au début, ce détournement de la ressource est devenu de plus en plus grand, et la part laissée aujourd'hui aux écosystèmes naturels, quand la Terre comporte déjà 7 milliards d'habitants, est déjà bien congrue. Qu'en sera-t-il en 2050 quand la Terre comptera peut-être 9,5 milliards d'habitants ? Ce problème va être examiné en comparant besoins et ressources, en climat actuel et en climat perturbé par les gaz à effets de serre, puis les risques de pénurie ou de conflits.

II. — LES BESOINS EN EAU

La quantité d'eau de boisson minimale recommandée par les médecins est de 2 l/j, qui peut être doublée ou triplée en cas de chaleur et de sécheresse. Si on y ajoute les besoins de la vie quotidienne, ce chiffre atteint, au minimum, 20 l/j par habitant pour les pays les plus pauvres en eau (comme par exemple la zone côtière dépourvue d'eau douce de la Mauritanie) à plus de 500 l/j dans les pays richement dotés ou peu économes (États-Unis, certaines villes d'Argentine, Afrique du Sud, Royaume Uni, etc.). En France, la consommation moyenne est de l'ordre de 250 l/j par habitant en ville (chiffre qui inclut l'eau des installations artisanales, commerces, etc..., les fuites des réseaux et l'eau de lavage des rues et de lutte contre l'incendie) et de moins de 150 l/j par habitant à la campagne. La moyenne mondiale est estimée à 300 l/j, soit 110 m³/an et par habitant. En 2050, les démographes estiment que la population mondiale devrait passer à 9,5 milliards d'individus, la fourchette donnée évoluant entre 8 et 12 milliards (Gerland *et al.*, 2014). Ensuite, la population devrait encore croître, principalement en Afrique sub-saharienne, pour atteindre 11 milliards en 2100, et continuer à croître en Afrique, sauf changement radical ou catastrophe. L'Afrique passerait ainsi de 1 milliard d'habitants en 2000 à 4,2 milliards en 2100, ce qui semble difficilement concevable, vu les difficultés que connaît déjà actuellement ce continent. En prenant comme hypothèse 9,5 milliards d'individus en 2050 consommant chacun 250 l/j, la quantité totale d'eau nécessaire pour satisfaire les besoins domestiques représenterait 867 km³ d'eau par an, soit 0,8% de la pluie qui tombe chaque année sur les continents ou 2,4% de la fraction de l'eau qui s'écoule dans les rivières et dans les nappes souterraines. On voit tout de suite que l'eau domestique n'est pas un problème de quantité, celle-ci existe, il faut cependant la transporter parfois sur de longues distances. Mais cette eau ainsi « utilisée » ne disparaît pas puisqu'elle est, pour l'essentiel, rejetée dans le milieu naturel,

et peut éventuellement être réutilisée plus en aval, si nécessaire après traitement. Clairement, la planète ne manquera jamais d'eau « domestique », comme il est convenu de l'appeler.

Qu'en est-il de l'eau nécessaire pour produire les aliments dont l'homme a besoin ? Cette eau agricole est le terme majeur de notre consommation d'eau, au moins dix fois plus que l'eau domestique. Aujourd'hui, quelques 10 000 km³ d'eau par an sont nécessaires pour nourrir 7 milliards d'habitants, dont 6 500 km³ d'eau de pluie entièrement évaporée tombant sur 1,4 milliards d'hectares d'agriculture dite pluviale, et 3,2 milliards d'hectares de terres en pâtures (prairies, savanes arbustives...) et 3 500 km³ d'eau prélevée dans le milieu naturel (rivières, nappes) pour arroser 270 millions d'hectares d'agriculture irriguée. Sur ces 3 500 km³/an d'eau prélevée pour l'irrigation, 1 800 km³/an seulement sont utilement évaporés par les plantes, le reste s'infiltré dans les nappes ou est drainé et participe aux écoulements sur les continents, ou encore est gaspillé par évaporation dans l'air. Ainsi, quelque 8 000 km³ d'eau par an sont réellement consommés pour nourrir les hommes, soit environ 1 150 m³ d'eau par an et par habitant. Ceci représente environ 7% de la pluie sur les continents. Il faut savoir cependant qu'aujourd'hui, environ 1 milliard d'habitants sont sous-alimentés du fait de leur pauvreté. En 2050, si chacun mangeait à sa faim et si les habitudes alimentaires ne changeaient pas, il faudrait donc utiliser réellement de l'ordre de 11 000 km³ par an, soit 10% de la pluie sur les continents, ce qui n'apparaît pas globalement très préoccupant, mais pourrait en revanche devenir localement très difficile, compte tenu de l'inégale répartition spatiale et temporelle de la pluie. La répartition de ces 11 000 km³/an consommés entre agriculture pluviale et irriguée et l'efficacité de l'utilisation de l'eau d'irrigation sont les deux premières variables d'ajustement de l'offre de nourriture (voir infra). Si on prend en compte les évolutions probables des habitudes alimentaires et la quantité d'eau nécessaire pour produire les aliments (Tableau 1), on peut penser que la consommation accrue de viande dans le monde, et particulièrement en Asie, continent traditionnellement plus végétarien, pourrait porter les besoins réels en 2050 à 12 000 ou 13 000 km³/an au lieu de 11 000 km³, car il faut par exemple 13 000 m³ d'eau pour produire une tonne de viande de bœuf, soit 13 fois plus que pour une tonne de blé... La raison en est que les animaux d'élevage sont nourris aujourd'hui aux grains (orge, maïs...) ou au soja, et que la production de ces aliments nécessite déjà pas mal d'eau ; ensuite une tonne de grain donné à un bœuf d'embouche ne « fabrique » au plus que 75 kg de viande. Mais cette consommation de produits d'origine animale est peut-être la variable d'ajustement la plus importante, sur laquelle il est urgent d'agir : elle est, dans les pays développés, en moyenne deux fois trop élevée par rapport aux besoins nutritionnels et

Produits végétaux	m ³ /t	Produits animaux	m ³ /t
Huiles	5 000	Bœuf	13 000
Riz, blé, céréales C3	2 000 à 1 000	Volailles	4 100
Maïs, céréales C4	700	Œufs	2 700
Agrumes	400	Lait	800
Maraichage	200-400		
Pommes de terre	100		

Tableau 1. — Quantités d'eau requises en m³/t pour produire les bases alimentaires. Partie consommée brute (non en matière sèche) des différents produits. D'après Marsily (2006).

Table 1. — Water needs (m³/t) to produce basic food. Raw consumption (not in dry matter) of various products. From Marsily (2006).

	Population millions	Eau domestique prélevée km³/an	Eau Agricole pluviale utilisée km³/an	Eau Agricole d'irrigation prélevée km³/ an	Eau d'irrigation consommée km³/an	Eau Industrielle Prélevée km³/an
Europe	512	520	80	225	100	285
Asie	3 612	290	2 900	1 800	830	330
Afrique	853	40	700	200	90	32
Amérique du Nord	489	130	400	400	185	390
Amérique du Sud	367	50	300	100	45	105
Australie, Iles du Pacifique	30	8	30	25	20	3
Russie et ex URSS	310	62	250	500	230	145
TOTAL	6 200	660	5 000	3 250	1 500	1 290
Eau consommée		40	5 000		1 500	130

Tableau 2. — Estimation des quantités d'eau prélevée et consommée dans le monde en 2000, adaptée de Marsily (2005, 2006), avec des hypothèses de proportionnalité faites sur le nombre d'habitants pour les chiffres mal connus. Ces estimations sont très approximatives.

Table 2. — Estimates of water withdrawal and use in the world in 2000 (adapted from Marsily, 2005, 2006), assuming proportionality with the population for the poorly-known data. These estimates are very approximate.

ne couvre en moyenne que 70% de ces besoins dans les pays en développement, les pays en transition étant à peu près équilibrés de ce point de vue, mais avec d'énormes disparités internes.

Enfin, combien d'eau est-elle prélevée pour satisfaire les besoins industriels ? On estime aujourd'hui ce chiffre à environ 1 300 m³/an et par habitant. Mais cette fois-ci l'eau industrielle n'est que très peu « consommée », environ 10% ; elle est utilisée puis rejetée à 90% dans le milieu, parfois réchauffée (eau de refroidissement des centrales thermiques) ou plus ou moins dégradée (processus de fabrication industriels polluants), ou seulement turbinée ou utilisée pour la navigation. Ce chiffre peut varier beaucoup en fonction des procédés techniques utilisés, des recyclages réalisés, du prix, des économies d'eau, etc... L'eau industrielle ne représente en tout état de cause que de l'ordre de 1% de l'eau de pluie sur les continents.

Les besoins estimés en 2000 en eau domestique, agricole (pluviale et irrigation), et industrielle (Tableau 2) montrent que la totalité des prélèvements d'eau par l'homme a été de 5 200 km³/an auxquels il faut ajouter 5 000 km³/an d'eau de pluie utilisée directement par l'agriculture pluviale, soit 10 200 km³/an, ce qui reste inférieur à 10% des précipitations sur les continents. Comme il a été dit plus haut, le reste des ressources en eau non utilisé par l'homme entretient le fonctionnement des écosystèmes naturels (forêts, zones humides, espaces

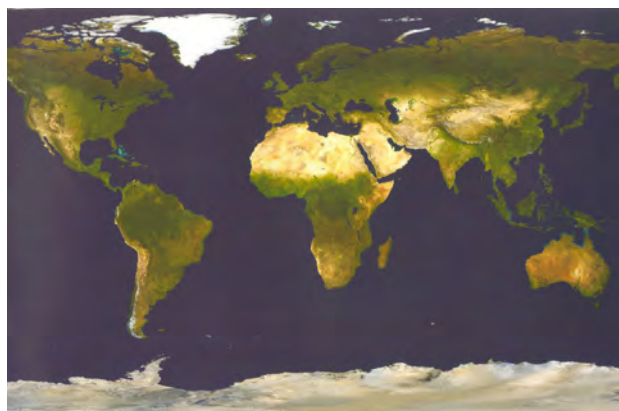


Fig. 1. — Répartition des zones sèches ou arides. 21,5% de l'humanité se concentre dans les steppes et les zones arides avec seulement 2% des ressources en eau de la planète. D'après UNESCO et Viviroli et al. (2007).

Fig. 1. — Dry zones on earth. 21.5% of mankind is concentrated in the dry zones and steppes with only 2% of the global water resources. From UNESCO and Viviroli et al. (2007).

Classe climatique	Zones de végétation	A %	POP %	Q %	q mm a ⁻¹
Polaire et Froid	Toundra et polaire, Parcs froids	14.8	3.2	11.9	245
Fraîche	Toundra forestière, Forêt boréale	11.3	4.0	11.6	313
Tempérée	Forêt tempérée, forêt tempérée chaude	9.9	23.3	15.2	465
Steppe	Steppe, Chaparral	9.7	13.6	1.9	59
Aride	Déserts froids, Déserts chauds	18.5	7.9	0.3	5
Subtropicale	Tropicale semi-aride, Forêt tropicale sèche	18.3	24.8	8.8	147
Tropicale Humide	Forêt tropicale saisonnière, forêt tropicale pluvieuse	17.5	23.2	50.3	872

naturels...), alimente les fleuves et les nappes, qui permettent également l'existence d'autres écosystèmes aquatiques particuliers le long de leur cours ou en zone côtière. L'ensemble de ces systèmes étant en équilibre avec les ressources, tout prélèvement supplémentaire par l'homme se fait nécessairement à leurs dépens ; voyant leurs ressources diminuer, ils doivent soit s'y adapter soit disparaître, si les changements dépassent leurs seuils de « résilience ».

Tableau 3. — Classification des climats et des zones de végétation, adaptée de Viviroli *et al.* (2007). L'Antarctique et la partie englacée du Groenland sont exclus. **A** : proportions de la surface totale des continents (total : 133,6 millions km²) ; **POP** : proportions de la population globale (total : ~7 milliards d'habitants) ; **Q** : proportions du débit d'écoulement total (total : 36 000 km³/an) ; **q** : ruissellement direct.

Table 3. — Climate and vegetation zoning, adapted from Viviroli *et al.* (2007). Antarctica and Greenland are excluded. **A** : proportions of continental total surfaces (total : 133,6 millions km²) ; **POP** : proportions of global population (total : ~7 billion inhabitants) ; **Q** : proportions of total flow (total : 36.000 km³/year) ; **q** : direct water runoff.

III. — UNE RESSOURCE EN EAU PLUVIALE TRES INEGALEMENT REPARTIE

La ressource en eau renouvelable de la planète est donc quasi-uniquement fournie par les précipitations annuelles

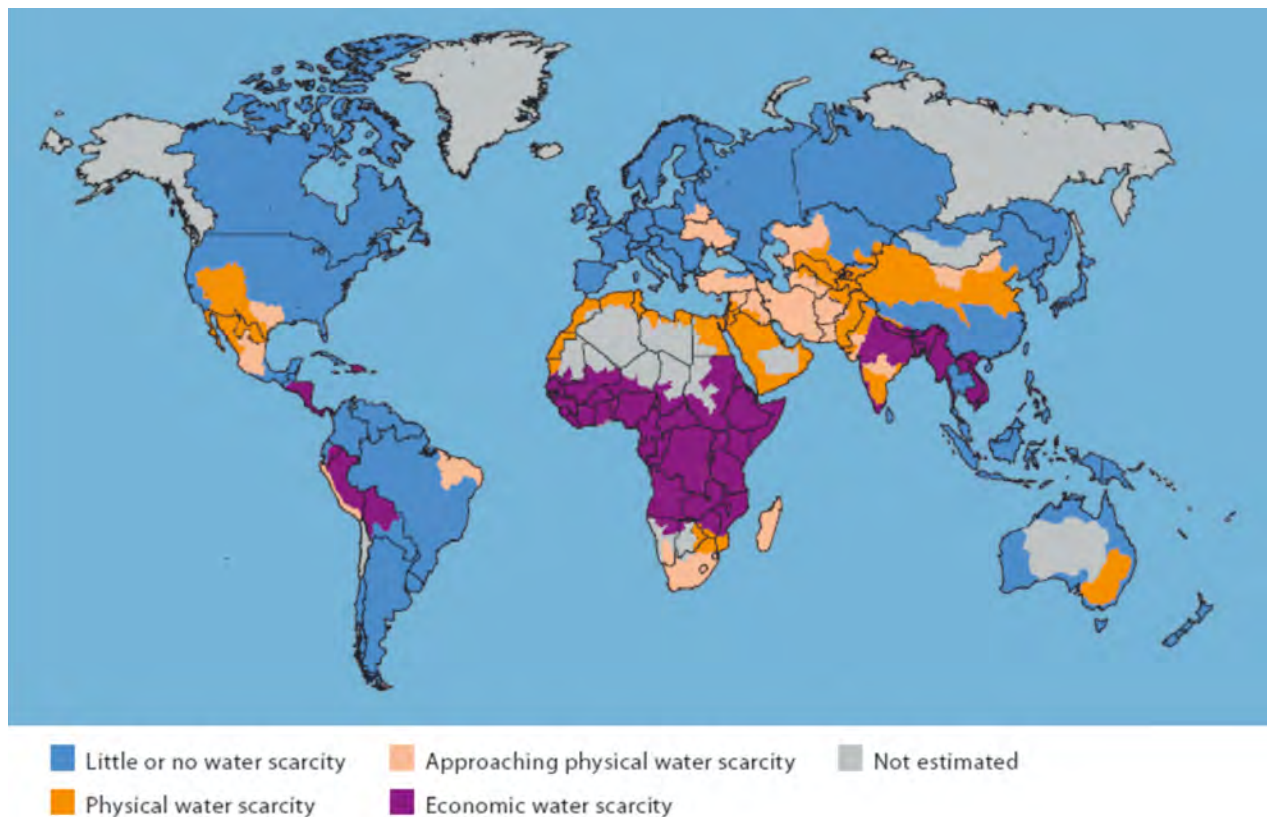


Fig. 2. — Zones où sévit en 2000 un manque chronique de ressources en eau, du point de vue physique ou économique. **Rouge** : Déficit physique ; plus de 75% du débit des rivières est prélevé pour les besoins de l'homme, en tenant compte des recyclages. **Rose** : Plus de 60% du débit des rivières est prélevé. Ces bassins vont bientôt devenir rouge. **Orange** : Déficit économique en eau. Les ressources sont abondantes par rapport aux usages, avec moins de 25% de prélèvements du débit des rivières, mais la sous-alimentation sévit. La capacité financière en moyens d'équipement fait défaut. **Bleu** : Ressources en eau abondantes. Prélèvements inférieurs à 25% du débit des rivières. D'après IWMI (2007) et WWAP (2012).

Fig. 2. — Areas where physical and economic water scarcity occur. **Red** : physical water scarcity ; more than 75% of the river flows are withdrawn for human uses, taking recycling into account. **Pink** : more than 60% of the river flows are withdrawn ; these areas will soon shift to red. **Orange** : economical water scarcity ; water resources are abundant relative to water use, with less than 25% of river flows withdrawn, however malnutrition exists ; lack of human, institutional and financial capital limits access to water. **Blue** : water resources are abundant ; river flows withdrawn are less than 25%. From IWMI (2007) and WWAP (2012).

sur les continents, qui sont estimées à 113 000 km³/an. Ceci correspond en moyenne à une lame d'eau de pluie de l'ordre de 720 mm/an. Le devenir moyen de cette ressource est alors le suivant (Shiklomanov & Rodda, 2004 ; Trenberth *et al.*, 2007) :

- 73 000 km³/an repartent vers l'atmosphère, par évaporation directe et surtout par transpiration de la végétation. Cette quantité d'eau alimente à la fois l'agriculture pluviale (6 500 km³/an actuellement) et le fonctionnement des écosystèmes. Ce n'est donc en rien une « perte ». On l'appelle maintenant « l'eau verte ».

- 3 400 km³/an sont constitués de la fusion des glaciers continentaux arctiques et antarctiques (icebergs), qui fondent en mer et participent au fonctionnement de la circulation générale océanique. La glace de mer, par exemple au pôle Nord, n'en fait pas partie, elle n'est pas alimentée par la pluie sur les continents.

- 36 000 km³/an constituent l'écoulement total sur les continents, tant dans les rivières que dans les nappes souterraines, que l'on appelle « l'eau bleue ». On distingue :

- 26 000 km³/an s'écoulent dans les rivières par ruissellement direct lorsqu'il pleut ; une fraction peut en être récupérée par des barrages et utilisée par l'homme pour ses prélèvements ; ce flux sert aussi aux écosystèmes aquatiques lacustres, fluviaux et côtiers.

- 10 000 km³/an s'infiltrent dans les sols et s'écoulent dans les nappes souterraines, qui alimentent à leur tour les rivières lorsqu'il ne pleut pas (7 800 km³/an), ou vont directement en mer (2 200 km³/an).

Le bilan est ainsi bouclé. Il faut noter que l'eau des précipitations sur les continents provient globalement pour 62% de l'évaporation sur ces mêmes continents, et pour 38% seulement de l'évaporation sur les océans. Localement bien sûr, ces pourcentages peuvent varier. Le temps moyen de résidence de l'eau dans chacun des réservoirs du cycle de l'eau est de 8 jours dans l'atmosphère, 16 jours dans les rivières, 17 ans dans les lacs, 1 400 ans dans les eaux souterraines, 2 500 ans dans les océans et 10 000 ans dans les glaces. En moyenne, une goutte d'eau évaporée parcourt avec le vent environ 1000 km dans l'atmosphère avant de retomber en pluie. La répartition de cette ressource est très inégale sur terre (Fig. 1). Aux latitudes polaires, il pleut très peu, de l'ordre de moins de 200 mm/an, c'est ce qu'on appelle les déserts froids. Les précipitations augmentent ensuite jusqu'aux zones tempérées (pratiquement jusqu'au centre de la France), pour atteindre environ 700 à 1 000 mm/an, puis décroissent (zone méditerranéenne) pour pratiquement s'annuler dans la « ceinture des déserts chauds », ici le Sahara. Au sud de cette zone, les précipitations augmentent à nouveau, dans la zone tropicale et équatoriale, pour y culminer vers 2 300 mm/an. Ce type de répartition est à peu près le même pour tous les méridiens et pour l'hémisphère Sud. Il est dû à la circulation générale de l'atmosphère autour du globe. De plus, les précipitations augmentent en général avec l'altitude (elles doublent tous les 2 000 m) et avec l'exposition au vent ; il pleut par exemple près de 10 m d'eau par an au sommet du volcan du Piton de la Fournaise dans l'île de la Réunion, sur la côte « au vent ».

En associant à chaque zone climatique le pourcentage de la population mondiale qui y vit, l'écoulement total et le ruissellement direct s'écoulant dans les rivières, on peut constater que la répartition de la population ne suit pas du tout la disponibilité de la ressource en eau (Tableau 3). Aux régions présentant un déficit en eau pour des raisons physiques (prélèvements supérieurs à 75% des ressources), s'ajoutent

celles qui présentent un déficit pour des raisons économiques par manque de moyens pour exploiter la ressource (Fig. 2).

IV. — LA « COULEUR » DE L'EAU ET « L'EMPREINTE EAU » DE LA FRANCE

À l'échelle de la France, les chiffres du bilan hydrologique, en km³/an ou milliards de m³/an, sont les suivants (Tableau 4).

Total des précipitations	479 km ³ /an
Total de l'évapotranspiration	297 km ³ /an
Total des écoulements	182 km ³ /an
Total des écoulements exportés aux frontières (par les fleuves tels que la Meuse...)	18 km ³ /an
Total des écoulements importés aux frontières (par les fleuves tels que le Rhône...)	11 km ³ /an
Total des ressources en eau disponibles	175 km ³ /an
Eaux de surface	100 km ³ /an
Eaux souterraines	75 km ³ /an

Tableau 4. — Bilan hydrologique de la France. D'après Marsily (2009).

Table 4. — France hydrological balance. From Marsily (2009).

Les besoins en eau actuels des Français en km³/an sont les suivants (Tableau 5).

Prélèvements	Eau domestique	Industrie	Irrigation	Production d'énergie	Total
Eaux de surface	2,6	2,3	3,8	19	8,7 + 19
Eaux souterraines	3,7	1,5	1,1	0,019	6,3
Total	6,3	3,8	4,9	19	34
Eau consommée	14%	11%	75%	2%	16%
	0,880	0,420	3,675	0,380	5,355

Tableau 5. — Consommation en eau en 2005 en France. D'après Marsily (2009).

Table 5. — France : 2005 water consumption. From Marsily (2009).

L'indication « eau consommée » (ligne 5 du Tableau 5) correspond au fait que lors d'un prélèvement d'eau (lignes 2 et 3 du Tableau 5), cette eau ne « disparaît » pas ! Elle est, pour l'essentiel, rejetée au milieu naturel, éventuellement après avoir été traitée. La « consommation », c'est-à-dire ce qui fait disparaître l'eau du cycle des eaux continentales par évaporation, ne représente que de faibles fractions de l'eau prélevée, sauf en irrigation pour laquelle elle sert justement à être évaporée par les plantes. L'eau restituée au milieu naturel peut être réutilisée par d'autres en aval. Par exemple, les villes en amont de Paris, comme Troyes ou Auxerre, prélèvent de l'eau dans les nappes

ou les rivières, et en rejettent la majeure partie dans la Seine ou dans l'Yonne, après l'avoir traitée. Quand cette eau est prélevée dans la Seine à Paris, elle est retraitée pour être purifiée, mais elle a déjà servi en amont plusieurs fois, au moins en partie ! Elle sera elle aussi rejetée dans la Seine et sera réutilisée encore en aval. Le recyclage des eaux usées est donc dès aujourd'hui une réalité. En France, environ 60% de l'eau du robinet provient des eaux souterraines (par sources captées, forages, puits artésiens, etc.) et 40% de prises d'eau en rivières (Tableau 5).

Depuis quelques années, une « couleur » a été donnée à l'eau (Hoekstra & Mekonnen, 2012 ; WWF, 2012) : l'eau « verte » est ainsi celle provenant de la pluie, stockée provisoirement dans les sols, puis qui repart ensuite directement à l'atmosphère par évapotranspiration, utilisée en agriculture pluviale, ou par la végétation naturelle. Elle représente 65% de l'eau de pluie à l'échelle du monde, soit 73 000 km³/an, et 297 km³/an en France. « L'eau bleue » correspond à celle qui s'écoule dans les rivières et les nappes. Il s'agit de celle que nous voyons s'écouler devant nous, principalement dans les rivières. Pour la planète, elle représente 32% de la pluie, soit 36 000 km³/an, et 182 km³/an pour la France. L'eau « grise » correspond à une mesure très approximative de la pollution des eaux : elle est définie comme la quantité virtuelle d'eau qu'il aurait fallu ajouter au rejet d'une eau polluée pour le diluer aux normes de rejet en vigueur. L'« empreinte eau » représente alors la quantité totale d'eau nécessaire (verte + bleue + grise) pour produire un objet donné [1] ou pour la consommation annuelle d'eau d'un individu, d'une collectivité ou même d'un pays. Celle de la France (Tableau 6) ne se limite pas aux quantités d'eau utilisées sur le territoire présentées (Tableau 5). La France importe aussi de façon virtuelle près de la moitié de l'eau qu'elle utilise, il s'agit de la quantité d'eau qu'il a fallu utiliser dans les pays exportateurs pour cultiver les produits agricoles exportés [2], ou les textiles, ou encore les produits industriels que nous achetons sur le marché international. Il s'agit alors de l'eau dite « virtuelle ». Aujourd'hui, les Français « consomment » 106 km³ d'eau (verte + bleue + grise) par an, soit 1750 m³ par habitant : 75 % d'eau verte, 8 % d'eau bleue et 17 % d'eau grise. L'eau domestique représente 3% de cette consommation, l'eau industrielle 10 %, et la production de la nourriture 87 %. Par ailleurs, 47% de l'eau que nous consommons est importée, présente dans les produits agricoles ou industriels achetés à l'étranger, contenant l'eau dite « virtuelle » utilisée pour les fabriquer.

Type d'eau	Verte, km ³ /an	Bleue, km ³ /an	Grise, km ³ /an
Produits agricoles nationaux	43,7	1,4	3,8
Produits agricoles importés	36,7	4,6	2,1
Produits industriels nationaux		0,9	3,3
Produits industriels importés		0,6	6,3
Eau domestique		0,6	2,2
Total	80,4	8,1	17,7
Total Général	106,2 km³/an 47 % d'eau importée 76 % d'eau verte 87 % d'eau agricole		

Tableau 6. — Empreinte eau de consommation de la France. D'après WWF (2012).

Table 6. — France : water consumption footprint. From WWF (2012).

La part des principaux produits consommés en France a été calculée (WWF, 2012) selon son empreinte eau (Fig. 3A) et selon le pourcentage du total d'eau (virtuelle) arrivant en France dans les produits importés (Fig. 3B). Il apparaît que la majeure partie de l'eau virtuelle importée provient du coton et dérivés. Il faut en effet beaucoup d'eau d'irrigation pour faire pousser du coton, illustré par le désastre de l'assèchement de la Mer d'Aral, due au détournement de l'eau de l'Amou Daria et du Syr Daria, qui viennent de l'Himalaya, pour irriguer le coton en Ouzbékistan. Or la France importe beaucoup de son coton de cette région d'Asie : indirectement, nous sommes donc responsables de cet assèchement !

V. — LES RESSOURCES DISPONIBLES POURRONT-ELLES SUBVENIR AUX BESOINS AU XXI^e SIECLE ?

Le problème essentiel de l'eau du XXI^e siècle est de nourrir la planète, comme le dit Michel Griffon (2006), économiste au CIRAD (Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement), ou Agrimonde (2010), Leridon & Marsily (2011), ou encore Guillou et Matheron (2011). Les besoins augmentent avec la croissance démographique, encore beaucoup trop forte. Aujourd'hui, trois céréales, le blé, le maïs et le riz, chacune à raison de 700 millions de tonnes par an, fournissent 60% de la nourriture mondiale. La première chose à faire est d'augmenter les rendements, de mieux utiliser l'eau (selon le slogan des Nations Unies « *more crop per drop* »), c'est-à-dire d'éviter les pertes, ou de choisir des cultures plus productives à quantité d'eau égale (voir Tableau 1). On espère ainsi, au mieux d'ici 2050, des économies d'eau de l'ordre de 20 à 30%, notoirement insuffisantes par rapport aux besoins. On pourrait penser tout d'abord que la solution est ensuite d'augmenter les surfaces d'agriculture irriguée, qui produisent par hectare en général trois fois plus que celles en agriculture pluviale. Au rythme actuel d'augmentation de ces surfaces irriguées, qui n'est que de 1,34 million d'hectares par an, on passerait de 264 millions d'hectares irrigués aujourd'hui à 331 millions d'hectares en 2050, ce qui est aussi notoirement insuffisant. Il faudrait décupler le rythme actuel d'aménagement pour répondre aux besoins croissants, ce qui est peu envisageable. En effet, au prix actuel des céréales, la rentabilité des investissements n'est pas assurée et les financeurs institutionnels (Banque Mondiale, FMI...) se sont détournés depuis 20 ans de ces grands aménagements de retenues d'eau et périmètres irrigués, qui ont également eu pour certains d'entre eux des conséquences environnementales désastreuses et une efficacité économique douteuse. Ces institutions n'y reviennent que lentement. Les opinions publiques occidentales sont aussi extrêmement opposées à la construction de barrages, aux motifs de la protection des populations qu'il faut souvent déplacer, à l'ennoisement des écosystèmes des vallées, et à la modification du régime hydrologique des cours d'eau en aval, aux conséquences écologiques néfastes et certaines. Il faut avoir en tête les protestations des opinions publiques occidentales contre le barrage des Trois Gorges en Chine, ou antérieurement le barrage d'Assouan. Il est exact que la construction de barrages a de graves conséquences environnementales, mais, si la population de la planète ne cesse d'augmenter, ne faut-il pas quand même chercher à la nourrir ? Et de la façon la moins néfaste ? Les occidentaux ont beau jeu de s'opposer à la construction de barrages dans les pays en développement, sachant que les leurs ont été déjà construits depuis belle lurette : chaque Américain dispose en effet de plusieurs milliers de m³ d'eau stockée dans un barrage, un Français un peu moins de 1000 m³, et un Africain... 3 m³ !

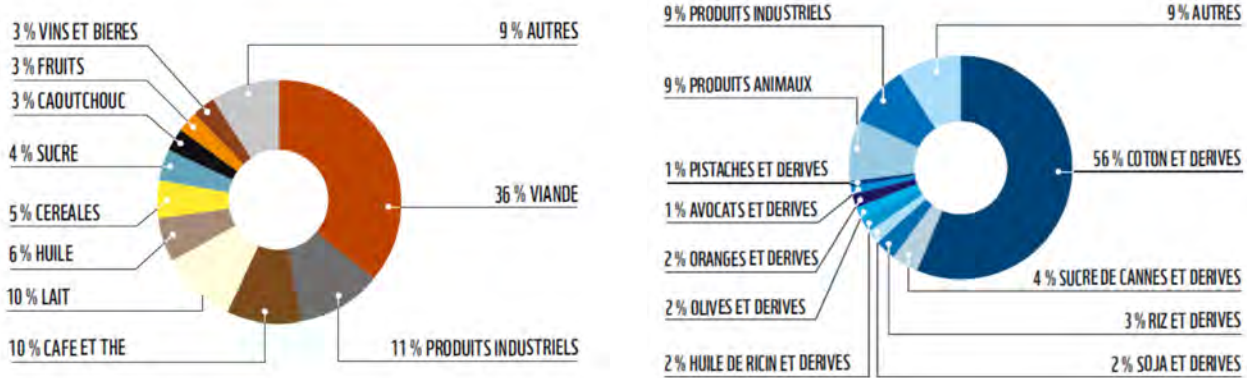


Fig. 3. — Empreinte eau de consommation de la France : **A** – selon les produits consommés ; **B** – selon la quantité d'eau virtuelle contenue dans les produits importés. D'après WWF (2012).

Fig. 3. — France : water consumption footprint : **A** – according to the consumed products ; **B** – according to the amount of virtual water included in the imported products. From WWF (2012).

Puisque l'irrigation n'est pas significativement développée, la solution vers laquelle on se dirige est donc une très forte augmentation de l'agriculture pluviale, occupant actuellement 1,34 milliard d'hectares, devant probablement croître d'ici 2050 de 500 millions à 1 milliard d'hectares. Il s'agit de mettre en culture des terres où il pleut suffisamment, où le climat est favorable, et où les sols sont bons et pas trop en pente ; sur de telles surfaces s'étendent actuellement des écosystèmes naturels. De telles surfaces cultivables en agriculture pluviale sont disponibles, mais pas partout (Tableau 7) : l'Asie et le Moyen Orient/Afrique du Nord sont très proches des limites d'utilisation de leurs sols alors que ces deux zones sont encore en expansion démographique. Ces régions ne seront donc pas capables, en 2050, de se nourrir sans importer massivement. En revanche, l'Afrique sub-saharienne, qui elle est en très forte expansion démographique, a largement les sols nécessaires pour produire la nourriture dont elle aura besoin, si elle s'équipe des moyens pour le faire. L'Amérique latine puis les pays de l'OCDE et la Russie, auraient les moyens de produire bien plus que la nourriture qui leur est nécessaire. On sait que le Brésil et l'Argentine s'y préparent, et que les Etats-Unis sont déjà les premiers exportateurs de denrées alimentaires du monde, la France étant aussi exportatrice de céréales. Selon ce scénario, on se dirigerait vers un dramatique défrichement des zones actuellement non cultivées mais cultivables, qui sont aujourd'hui occupées par la végétation naturelle (forêt, steppe, pampa...). Ceci s'accompagnerait nécessairement de fortes atteintes aux écosystèmes naturels et d'une réduction massive de la biodiversité : mais que faire ? Laisser les nouveaux habitants supplémentaires mourir de faim ? Avons-nous le choix ? Une autre conséquence sera que de nombreux pays perdront tout espoir d'autosuffisance alimentaire et seront dépendants d'autres pays pour leur alimentation, avec les risques de pressions politiques que cela implique et les tensions qui pourront en résulter sur les prix des denrées agricoles en cas de pénuries.

Il faut ajouter à cela que l'agriculture sera aussi sollicitée pour la production de biomasse à des fins énergétiques, ce qui engendrera une tension supplémentaire sur la production alimentaire, mais fait dire aussi que la contribution des

bioénergies aux besoins énergétiques mondiaux sera, en tout état de cause, petite. On parle par exemple de 500 millions d'hectares défrichés en plus, qui ne produiraient cependant en 2050 que des biocarburants couvrant de l'ordre de 10% des besoins en énergie de la planète. Quant aux pays « riches » en eau, comme la France, il peut ici ou là, en fonction des saisons, des aléas climatiques, des effets dus aux changements climatiques (cf. infra), y avoir des contraintes de restriction d'usage de la ressource en eau, certes très gênantes pour les consommateurs, mais somme toute non génératrices de catastrophes. Il s'agira pour la puissance publique de gérer les conflits d'usages et de donner la priorité en cas de pénurie à ceux considérés comme les plus importants : eau domestique, bien sûr, mais aussi eau nécessaire aux écosystèmes fragiles, qui sont des usagers également prioritaires pour le maintien de l'environnement et de la biodiversité, tout aussi, sinon plus importants, que les activités économiques (agriculture, industrie). Il est aussi possible de prendre des mesures pour consommer moins d'eau (appareils domestiques économes, douches mélangeant de l'air et de l'eau ...), de recycler les eaux usées ou de construire des aménagements permettant d'augmenter la disponibilité de

	Monde	Asie	Amérique Latine	Moyen-Orient et Afrique du Nord	Afrique sub-Saharienne	Pays de l'OCDE (Europe, Amérique du Nord, Japon...)	Russie
Surface cultivée en 2000 (a)	1 600	439	203	86	228	387	265
Surface cultivable (b)	4 400	586	1 066	99	1 031	874	497
a/b	39%	75%	19%	87%	22%	44%	53%

Tableau 7. — Superficies cultivées et cultivables dans le monde, en millions d'hectares (Griffon, 2006).

Table 7. — Global cultivated and cultivable areas, million hectares (Griffon, 2006).

l'eau en période de pénurie, comme des retenues de stockage remplies en hiver, ou même des stockages d'eau dans les nappes souterraines par recharge artificielle, ou des transferts d'eau des régions plus riches vers les régions plus pauvres. Ainsi en Europe, les Alpes constituent un énorme « château d'eau », qui alimente en eau en été, par fusion des glaces, tant l'Italie (le Pô), la France (le Rhône), l'Europe du Nord (le Rhin), que l'Europe de l'Est (le Danube). Napoléon par exemple, au début du XIX^e siècle, avait prévu d'alimenter Paris par l'eau du Lac Léman, puis avait abandonné cette idée pour des raisons militaires, craignant qu'un ennemi ne puisse facilement couper le canal amenant l'eau à Paris ! Une autre solution, étudiée au XIX^e siècle également, était de faire passer l'eau du Rhône à la Loire, les deux fleuves n'étant pas très distants au niveau de Lyon, puis de la Loire à la Seine, par le canal du Loing. Mais la chimie naturelle des eaux de ces fleuves étant différente, cela aurait pu conduire à des dommages importants aux écosystèmes. Dans la France du Sud-Est, ce type d'aménagement a déjà été construit avec la retenue de Serre-Ponçon sur la Durance, qui constitue le plus grand lac d'eau douce d'Europe, après le Lac Léman. Cette retenue, utilisée surtout en aménagement hydro-électrique, peut satisfaire si besoin est la majorité des demandes estivales de la région, il suffit de construire les adductions.

VI. — YA-T-IL UNE ALTERNATIVE ?

Ce scénario de production alimentaire est catastrophique pour l'environnement de la planète et ne fait pas l'unanimité. Une première alternative est de réduire les pertes et le gaspillage de nourriture. En effet à l'heure actuelle, environ 30% de la nourriture produite est gaspillée en pure perte. Dans les pays développés, il s'agit de nourriture achetée, conservée trop longtemps, ayant atteint sa limite de consommation (ou de vente), et qui est jetée sans même avoir été ouverte, un vrai scandale quand un milliard d'habitants de la planète ne peuvent pas manger à leur faim ! Des produits sont également jetés dès la production, par non-conformité à un standard excessif de forme, couleur ou de goût... Dans les pays en développement, l'essentiel des pertes se produit lors de la récolte, par mauvais ramassage, ou par stockages défectueux. Réduire ces pertes, et réduire également l'excès de consommation de produits animaux dans les pays développés, pourraient réduire de façon très importante la demande en nourriture, et réduire les besoins d'augmenter la production. L'augmentation des rendements agricoles par fertilisation accrue et protection des cultures et meilleure utilisation de l'eau, est indispensable mais ne semble pas suffisante. L'amélioration génétique des plantes pour les faire produire plus en consommant moins d'eau est apparemment un faux espoir, selon Tardieu (2005), car il est établi que si une plante consomme moins d'eau, alors elle produit moins de matière sèche : l'ouverture des stomates règle non seulement la transpiration mais aussi l'entrée de CO₂ et la photosynthèse ; réduire l'une réduit aussi l'autre. Mais il faut évidemment poursuivre les recherches pour tenter néanmoins d'améliorer les rendements à quantité d'eau consommée égale, par sélection végétale, génomique par exemple. Reste les cultures hors sol, dites hydroponiques ; la production par unité de surface est très élevée et l'efficacité hydrique également, mais les coûts de production sont aussi très importants. Seuls les pays riches pourront s'y engager. Le défrichement, plus ou moins étendu, semble donc inéluctable si la croissance démographique se poursuit. Le dessalement de l'eau de mer par osmose inverse est en forte croissance (environ 17% par an pour l'eau domestique), à un coût de l'ordre de 0,7 €/m³, et une consommation énergétique de l'ordre de 2 à 4 kWh/m³, mais cela est environ dix fois trop cher et énergivore pour de l'eau d'irrigation, sauf pour certaines cultures à forte valeur (fruits ou légumes primeurs).

VII. — EFFETS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ANNONCÉS

Le réchauffement climatique engendré par l'émission des gaz à effet de serre va-t-il modifier fortement la donne ? En première approximation, si l'on arrive à ne pas dépasser la barre des 2°C d'augmentation des températures moyennes en 2100 (ce qui demande un très gros effort de réduction des émissions de CO₂), la réponse semble être non du seul point de vue de la production agricole, bien que les effets hydrologiques du changement climatique soient beaucoup plus incertains et bien moins connus que les effets thermiques. Il apparaît que globalement, l'élévation de température augmente l'évaporation et les précipitations, avec cependant une grosse incertitude sur l'effet de l'augmentation de l'enneigement. Mais localement, les précipitations vont diminuer dans certaines zones et augmenter dans d'autres ; sur le méridien de Paris par exemple, il pleuvrait plus dans l'Europe du Nord, moins dans l'Europe du Sud et l'Afrique du Nord et plus au Sud du Sahara et dans les tropiques. Globalement, la succession des zones climatiques décrite plus haut se déplacerait vers le Nord dans l'hémisphère Nord, et vers le Sud dans l'hémisphère Sud, mais ceci est encore bien incertain. On estime que le réchauffement climatique risque de faire perdre environ 110 millions d'hectares de terres cultivables, par assèchement, dans les latitudes méditerranéennes, mais en faire gagner 160 millions dans les latitudes nordiques, par réchauffement et déplacement de la limite du permafrost. Enfin, il semble vraisemblable que la fréquence des événements extrêmes (crues, sécheresses) puisse également augmenter, mais cette question demande encore des efforts de recherche soutenus en modélisation du climat et en paléoclimatologie grâce aux archives naturelles. Enfin, l'augmentation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère devrait augmenter un peu les rendements agricoles, sauf en zone tropicale où ils devraient être réduits. En ce qui concerne la France, on peut s'attendre à une baisse des précipitations, principalement en été, pouvant atteindre 10 à 20%, au cours du XXI^e siècle. Dans le bassin de Paris, le débit d'étiage des rivières pourrait être divisé par deux, et l'étiage se prolonger jusqu'à octobre-novembre, contre septembre actuellement. Ceci ne sera pas sans poser des problèmes sérieux d'alimentation en eau de la région parisienne, qui dépend en été des réserves en eau stockées dans les Grands Lacs de Seine (barrages Aube, Marne et Seine), qui risquent d'être insuffisants, la capacité de stockage devra être augmentée, ou encore des transferts à plus longue distance mis en place, comme déjà envisagé au XIX^e siècle.

VIII. — SECHERESSES ET FAMINES

Y aura-t-il bientôt des risques de famines à l'échelle mondiale ? Il semble que la réponse soit malheureusement oui. Déjà, en 1998, des mauvaises récoltes en Asie du Sud-Est, dues à une sécheresse déclenchée par un événement El Niño intense cette année-là, ayant affecté la mousson, avaient entraîné des achats de céréales massifs sur les marchés mondiaux, avec une réduction importante des stocks, rendant périlleuse la situation si la sécheresse s'était prolongée. Or chaque année, la situation devient de plus en plus tendue, du fait de la croissance démographique. Il faut savoir qu'en 1876-1878, par exemple, une sécheresse catastrophique a sévi simultanément en Inde, en Chine, au Brésil et en Ethiopie, pour ne citer que quelques-uns des pays où l'on dispose de données. Il y aurait eu à cette époque coloniale près de 30 millions de morts (Davis, 2006). Une même sécheresse se serait également reproduite en 1896-1900, avec un même ordre de grandeur du nombre des victimes. Ces sécheresses simultanées à l'échelle du globe seraient la conséquence d'événements El Niño d'ampleur exceptionnelle,

affectant les zones de mousson, comme il semble s'en produire en moyenne deux fois par siècle (Ortlieb, 2000). Quoiqu'il en soit, et compte tenu en particulier de l'augmentation probable de la fréquence des événements extrêmes due aux changements climatiques et de la croissance continue de la démographie, il semble certain que ce type de catastrophe va se reproduire, avec ses conséquences macabres, dans un avenir plus ou moins proche mais imprévisible. Les stocks mondiaux risquent de ne pas être suffisants pour satisfaire la demande. Mais de plus, comme l'a montré le Prix Nobel d'économie Amartya Sen (Sen & Drèze, 1999), la cause la plus fréquente des pertes en vie humaine, en cas de réduction des récoltes, est la perte instantanée du pouvoir d'achat des paysans les plus pauvres, dont les récoltes ont disparu, et d'autres catégories sociales défavorisées qui n'ont plus les moyens d'acheter la nourriture, quand bien même elle serait disponible. Avec la mondialisation croissante des échanges de nourriture dont nous avons parlé, il est probable que les lois du marché vont entraîner, en cas de pénurie, une augmentation vertigineuse des prix mondiaux agricoles et que la famine touchera alors les plus pauvres, même si des stocks existent encore et que les moyens de transport soient disponibles, ce qui était plus difficile au XIX^e siècle. Hélas les stocks mondiaux de nourriture sont actuellement très bas : ils étaient traditionnellement, il y a plus de 10 ans, de l'ordre de 6 mois de consommation mondiale, alors qu'aujourd'hui ils sont tombés à moins de 2 mois. Amartya Sen montre que dans le milieu des années 1970, une famine a frappé l'Éthiopie et que des gens sont morts de faim au voisinage de voies de communication faciles, alors que le pays disposait dans d'autres régions de stocks suffisants : les ressources financières des affamés ne leur permettaient pas d'acheter, et l'aide mondiale n'a pas été sensibilisée à temps. Il est probable, bien qu'abominable, qu'il faudra que se déclenche une telle crise pour que le monde se décide à bouger et à créer des stocks plus importants dans les pays où les manques sont les plus probables, c'est-à-dire dans les zones déjà les plus défavorisées et où les moyens financiers ne sont pas réunis pour créer les dits stocks.

IX. — CONFLITS LIÉS À LA PÉNURIE

Les conflits sur l'eau actuels ou potentiels les plus préoccupants sont liés à la pénurie, au problème du partage d'une ressource devenue insuffisante par rapport aux besoins, soit que ceux-ci aient augmenté, soit que la ressource se soit réduite. Avant d'aller plus loin, donnons deux exemples dramatiques des conséquences potentielles d'une insuffisance des ressources, bien que dans ces deux exemples, la ressource en question ne soit pas l'eau. Il s'agit de l'île de Pâques et du génocide Rwandais de 1994, au cours duquel environ 800 000 personnes (11% de la population) ont été massacrées en un mois. Il est classique de dire que ce génocide a pour origine un conflit ethnique entre Hutus et Tutsis. Le premier à avoir mis en cause cette interprétation est Jared Diamond, géographe américain auteur de « Effondrements » paru en France en 2006, ouvrage qui analyse les cas de catastrophes des civilisations du passé faute d'avoir su gérer leur environnement. Il traite d'abord du cas bien connu de l'île de Pâques, découverte en 1722 par les Hollandais ; cette civilisation totalement isolée, sans contact depuis plusieurs siècles avec le monde extérieur et se croyant seule au monde, a détruit entre le XV^e et le XVII^e siècle son environnement en abattant tous ses arbres pour en faire des rondins pour déplacer ces immenses statues de pierre bien connues, les Moaï, qui servaient de symboles de domination aux prêtres ou aux puissants ; l'érosion des sols et la perte des moyens de production alimentaire qui en est résulté n'ont plus permis de maintenir une société estimée initialement entre 6 000 et 30 000 âmes ; en 1680 environ, des révoltes contre

les élites, une guerre civile et des massacres incluant du cannibalisme ont réduit cette population à quelques 30% de sa population initiale. Au Rwanda, selon Diamond (2006), c'est la croissance démographique démesurée de ce pays, d'environ 3% l'an, et la réduction continue des moyens disponibles *per capita* pour produire la nourriture qui a conduit au massacre. Toutes les terres cultivables étaient exploitées ; la population avait atteint la densité de 760 habitants par km², proche de celle de la Grande Bretagne, et n'était plus en mesure de se nourrir compte tenu des méthodes agricoles utilisées. En 1985, la production alimentaire par habitant, après avoir crû de 1966 à 1981, était redescendue au niveau de 1960. C'est la pénurie qui aurait été la cause première des massacres, ce qui serait en partie confirmé par le massacre de Hutus par des Hutus, dans des zones où les Tutsis étaient minoritaires ou absents. Un conflit ethnique est bel et bien présent, il existe historiquement des conflits ancestraux entre les deux communautés, mais l'hypothèse de Diamond est que la cause première du conflit est la raréfaction de la ressource [3] et qu'ensuite seulement le conflit s'habille en conflit ethnique, religieux ou culturel, ou est délibérément orienté vers un tel conflit par la propagande. Au Rwanda, la raréfaction de la ressource n'était pas l'eau, c'est un pays très humide, mais la disponibilité de terres agricoles sur lesquelles cultiver pour se nourrir. Ce risque de pénurie avait été anticipé par des agronomes belges (Wils *et al.*, 1986), sans qu'aucune action ne soit prise pour éviter la crise. Mais la même chose peut se produire pour les conflits liés à l'eau, laquelle peut bien souvent être la cause première de la raréfaction des productions. Elle peut servir alors d'étincelle pour ranimer des conflits ancestraux liés à l'ethnie, au nomadisme, à la religion...

Un autre cas du même ordre peut être proposé : celui de la Côte d'Ivoire et du Burkina Faso. La guerre civile qui a sévi en Côte d'Ivoire dans les années 2002-2011 est généralement attribuée à un conflit politique ou ethnique entre partisans du Président Gbagbo, se référant à son identité ivoirienne, contre le candidat Ouattara, d'origine burkinabé, immigré en Côte d'Ivoire avec un grand nombre de ses concitoyens. Il ne s'agit pas d'un conflit entre ces deux pays, mais pourquoi les Burkinabés sont-ils venus si massivement immigrer en Côte d'Ivoire ? Il est certain que la raréfaction des ressources au Burkina Faso, pays sahélien pauvre en eau, du fait de la croissance démographique, jouxtant un pays de la zone humide riche en eau et plus prospère, a certainement joué un rôle (même s'il n'est pas le seul) dans ces migrations de population, à vrai dire assez courantes en Afrique, en fonction des fluctuations du climat. Là encore on risque de se méprendre sur la cause première des conflits, en se limitant au caractère politique, ethnique ou xénophobe des affrontements. Mais ce type de conflits n'est pas réservé à l'Afrique ; on peut citer par exemple le cas de l'immigration des Scandinaves et des Irlandais aux Etats-Unis au XIX^e siècle, poussés hors de chez eux par les famines, qui a conduit indirectement au massacre des populations indigènes de l'Amérique du Nord. Que dire de l'actuel conflit à caractère confessionnel en Centre-Afrique ? Est-il seulement confessionnel, ou initié par une raréfaction des ressources ? Le conflit du Darfour serait aussi, selon certains, un conflit engendré par la pénurie, pour l'appropriation des moyens de production entre agriculteurs sédentaires et éleveurs nomades, l'appartenance ethnique ou religieuse n'étant que secondaire. Les conflits actuels au Sud-Soudan sont-ils de même nature ? Que dire de l'actuelle guerre civile en Syrie ? Une étude récente de Gleick (2014) porte sur les sécheresses qui ont très durement frappé la Syrie de 2006 à 2011, peu avant le début de la guerre civile. Le manque d'eau a entraîné des récoltes catastrophiques et une émigration rurale venue gonfler le chômage dans les villes et serait à la base de la rébellion. L'auteur montre que le changement climatique n'est pas seul en cause : la construction de grandes infrastructures en amont sur le Tigre et l'Euphrate par la Turquie aurait contribué à aggraver la situation.

Selon Taithe (2008), la question hydrique n'est plus celle des grands fleuves mais celle des aquifères souterrains. Selon lui, 445 aquifères communs à deux ou plusieurs Etats ont été recensés par l'UNESCO. Qu'ils se renouvellent ou qu'ils soient fossiles, mieux connaître leurs stocks va nécessiter d'importants investissements. Sans aide, les Etats dépourvus de moyens scientifiques seront incapables de discuter avec leurs voisins plus puissants – tel est le cas du Bangladesh face à l'Inde – de l'usage équitable et raisonnable des réservoirs souterrains d'eau douce. Enfin pour d'autres, comme la CIA (2013), c'est le couple « eau-alimentation » et « eau-énergie » qui va engendrer les tensions majeures dans le futur. La violence pourrait connaître d'autres formes, allant de la famine, endémique ou catastrophique en années sèches, aux grandes épidémies. La croissance démographique et la pauvreté en milieu rural s'accompagnent d'une croissance démesurée des grandes mégapoles. Il existe aujourd'hui plus de vingt villes de plus de dix millions d'habitants (dont plus de dix-sept dans les pays en voie de développement), contre trois en 1950. On en comptera plus de cinquante en 2025. Les conditions d'hygiène (approvisionnement en eau et assainissement) dans ces grandes villes sont parfois effrayantes, les autorités hésitant souvent à construire les aménagements nécessaires, de peur de voir la croissance s'accélérer encore, ou ne disposant pas des ressources pour le faire. Ces agglomérations pourraient favoriser l'éclosion et la transmission de nouvelles maladies. Galland (2008) rapporte que pendant la première guerre d'Iraq en 1991, le bombardement par les troupes américaines des installations électriques a interdit la fourniture d'eau potable aux populations, faute d'énergie, ainsi que le traitement des eaux usées. Il estime à 45 000 le nombre d'enfants qui seraient décédés suite aux maladies hydriques engendrées par l'impossibilité de traiter les eaux. Le même phénomène se serait reproduit lors de l'invasion de 2003, engendrant des hépatites, des fièvres typhoïdes et le retour du choléra. Il ne s'agit pas véritablement d'un conflit lié à l'eau, mais de l'eau impliquée dans un conflit ayant une autre origine.

X. — CONCLUSION

Le vrai « problème de l'eau » sur Terre est en réalité celui de la croissance démographique, principalement en Afrique. L'Asie va aussi très vite avoir des besoins en eau et en terres cultivables supérieurs aux ressources locales, la rendant bientôt incapable d'assurer son autosuffisance alimentaire. L'Asie et l'Afrique du Nord-Moyen Orient ne pourront s'alimenter qu'en important massivement de la nourriture, ce qu'on appelle de « l'eau virtuelle », ou en laissant émigrer leurs populations. L'Amérique du Sud paraît alors être le principal continent capable de fournir la production agricole nécessaire, mais au prix de défrichements gigantesques, réduisant encore un peu plus la part de la planète réservée aux écosystèmes naturels et la biodiversité. L'Europe du Nord, la Russie et l'Amérique du Nord pourront aussi fournir une partie des besoins. L'Afrique sub-saharienne pourrait devenir autosuffisante, malgré une très forte croissance démographique, en mettant en culture une vaste partie de ses espaces naturels ; mais elle est aujourd'hui déficitaire, et peine déjà à faire mieux que de maintenir son taux de dépendance. Il est à craindre cependant que des crises climatiques majeures (sécheresses par exemple, liées à des événements El Niño) engendrent, dans un avenir imprévisible, des conflits et des famines dramatiques simultanées sur plusieurs continents. Les autres problèmes de l'eau apparaissent secondaires devant le problème précédent ; ils portent sur les effets des changements climatiques, sur la distribution d'eau potable, sur les risques de pénurie dans la zone méditerranéenne, sur la qualité de l'eau et des écosystèmes et sur les crues. Une bonne ingénierie de l'aménagement, conçue pour respecter et conserver les écosystèmes naturels, et une gestion cohérente et patrimoniale de la ressource devraient permettre de les résoudre, si les moyens matériels nécessaires y sont consacrés à temps.

NOTES

[1] Il faut par exemple 2 400 litres d'eau pour fabriquer un hamburger (pour produire le pain, produire la nourriture pour alimenter le bétail qui donne la viande, etc.) et 140 litres pour une tasse de café...

[2] Il ne s'agit pas seulement de l'eau contenue dans les produits importés, comme la quantité d'eau contenue par exemple dans les fruits et légumes, mais bien de l'eau qu'il a fallu consommer dans le pays exportateur pour irriguer les cultures, ou fabriquer les produits, etc.

[3] L'économiste Daniel Cohen désigne par « poches de Malthusianisme » ces situations locales où la population devient en nombre supérieure à la capacité de production des écosystèmes.

BIBLIOGRAPHIE

- AGRIMONDE (2010). — *Scénarios et défis pour nourrir le monde en 2050*. Coordonné par S. PAILLARD, S. TREYER & B. DORIN. Editions Quae, Versailles : 295 p.
- CIA (2013). — *Le Monde en 2030 vu par la CIA*. Edition des Equateurs, Paris : 273 p.
- DAVIS M. (2006). — *Génocides tropicaux. Catastrophes naturelles et famines coloniales. Aux origines du sous-développement*. La Découverte/Poche, Paris : 479 p.
- DIAMOND J. (2006). — *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*. Gallimard, Paris : 648 p. (Traduit de l'Anglais, « Collapse », Viking Penguin, 2005)
- GALLAND F. (2008). — *L'eau. Géopolitique, enjeux, stratégies*. CNRS Editions, Paris : 186 p.
- GERLAND P., RAFTERY A., SEVCIKOVA H., LI N., GU D., SPOORENBERG T., ALKEMA L., FOSDICK B., CHUNN J., LALIC N., BAY G., BUETTNER T., HEILIG G. & WILMOTH J. (2014). — World population stabilization unlikely this century. *Science*, **346** : 234-237 ; doi: 10.1126/science.1257469.
- GLEICK P.H. (2014). — Water, Drought, Climate Change, and Conflict in Syria. *Wea. Climate Soc.*, **6**, 331-340; doi: <http://dx.doi.org/10.1175/WCAS-D-13-00059.1>.
- GRIFFON M. (2006). — *Nourrir la planète*. Odile Jacob, Paris : 456 p.

- GUILLOU, M., MATHERON, G. (2011) *9 milliards d'hommes à nourrir*. François Bourin, Ed. Paris, 428 p.
- HOEKSTRA A. & MEKONNEN M. (2012). — The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. World Wide Web address: www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1109936109
- IWMI (INTERNATIONAL WATER MANAGEMENT INSTITUTE) (2007). — *Water for Food, Water for Life : the Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. D. Molton (ed.), Earthscan, London, UK : 645 p.
- LERIDON H. & MARSILY G. de, coord. (2011). — *Démographie, climat et alimentation mondiale*. EDP Sciences – Rapport de l'Académie des Sciences, Paris : 313 p.
- MARSILY G. de, ed. (2005). — *Eaux Continentales. Comptes Rendus Geosciences, numéro spécial*, **337** (1-2) : 296 p.
- MARSILY G. de coord. (2006). — *Les Eaux Continentales*. EDP Sciences – Rapport de l'Académie des Sciences, Paris : 328 p.
- MARSILY G. de (2009). — *L'eau, un trésor en partage*. Dunod, Paris : 260 p.
- ORTLIEB L. (2000). — The documented historical period of El Niño events in Peru : an update of the Quinn record (16th to 19th centuries). In: DIAZ H.F. & MARKGRAF V. eds, *El Niño and the southern oscillation. Multiscale variability and local and regional impacts*. Cambridge University Press: 496 p.
- SEN A. & DRÈZE J. (1999). — *Omnibus*. Oxford University Press, New Delhi (Inde): 945 p.
- SHIKLOMANOV I. & RODDA, J. eds (2004). — *World water resources at the beginning of the twenty-first century*. Cambridge University Press, Cambridge (UK): 452 p.
- TARDIEU F. (2005). — Plant tolerance to water deficit : physical limits and possibilities for progress. *Comptes Rendus Geoscience*, **337**: 57-67.
- TAITHE A. (2008). — *L'eau. Un bien ? Un droit ? Tensions et opportunités*. Editions UNICOMM, Paris : 214 p.
- TRENBERTH K., SMITH L., QIAN T., DAI A. & FASULLO J. (2007). — Estimates of the global water budget and its annual cycle using observational and model data. *Journal of Hydrometeorology*, **8** : 758-769.
- VIVIROLI D., DÜRR H., MEYBECK M., WEINGARTNER R. & MESSERLI B. (2007). — Mountains of the world – water towers for humanity: Typology, mapping and global significance. *Water Resources Research*, **43** : W07447 ; doi:10.1029/2006WR005663.
- WILS W., CARAEL M. & TONDEUR G. (1986). — Le Kivu Montagneux: surpopulation, sous-nutrition, érosion du sol. *Mém. Acad. Royale Sc. Outremer Belgique*, **21** (3) : 201 p.
- WWAP (2012). — United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), United Nations World Water Assessment Programme (WWAP), UN-Water. March 2012; see also World Resources Institute at: <http://www.wri.org/resource/physical-and-economic-water-scarcity>.
- WWF (2012). — *Rapport Empreinte eau de la France*. Thierry Thouvenot et al. World Wildlife Fund, Paris : 37 p.

terre
à portée de main



Voyage d'un grain de Sable

Patrick De Wever & Francis Duranthon



LA REDUCTION DES MODELES HYDROLOGIQUES POUR DES APPLICATIONS PRATIQUES MOINS FASTIDIEUSES

The reduction of hydrological models for less tedious practical applications

par Frédéric DELAY (*) & Philippe ACKERER (*)

Résumé. – Ce travail constate qu'il peut très souvent persister des incohérences entre la complexité des modèles hydrologiques (qui progressent en fonction de la connaissance acquise du fonctionnement du milieu naturel) et les données disponibles pour la documentation du modèle et son application. Ainsi, les modèles hydrologiques «intégrés» traitent de la dynamique hydrique complète d'un bassin versant mais ne sont conditionnables que sur des données qui ne distinguent que très partiellement toute la dimension de l'écoulement. Il est proposé de réduire ce type de modèle en agrégeant sa physique pour en réduire la dimension euclidienne. Le modèle devient alors un outil manipulable et en meilleure adéquation avec les données d'observation. Paradoxalement, la complexité de la physique d'un modèle peut aussi en faciliter la réduction. Traiter par exemple des écoulements dans un aquifère carbonaté par une approche double continuum augmente le nombre de paramètres locaux comparé à une approche simple continuum. Cependant, l'hétérogénéité structurale du réservoir étant inscrite dans les équations du modèle, la paramétrisation à l'échelle de l'aquifère se simplifie fortement. La réduction est ici le fait d'une diminution des efforts de conditionnement du modèle sur les données ; les exercices d'inversion et de prédiction deviennent abordables. Finalement, il semble aujourd'hui nécessaire d'envisager et jauger les progrès réalisés par les modèles, d'une part sur leur complexité accrue, d'autre part sur la capacité de réduire cette complexité en fonction des applications ciblées et des informations disponibles.

Abstract. – This work notices that inconsistencies may persist between the complexity of hydrological models (which improve according to the established knowledge on how natural systems work), and available data for model documentation and application. Therefore, the integrated hydrological models handle the whole water dynamics over a watershed but are only conditioned on data that incompletely record the dimensions of flow. It is suggested to reduce this type of model by aggregating the physical grounding to diminish its Euclidean dimension. The model then becomes a handy tool, more consistent with observation data. Paradoxically, the complexity in the physics of a model may also result in model reduction. Dealing for example with flow in a limestone aquifer by relying upon a dual continuum approach increases the number of local parameters compared with a single continuum approach. However, the structural heterogeneity of the reservoir being concealed in the model equations, the parametrization at the scale of the aquifer becomes much simpler. The model reduction is here associated with diminishing the effort to condition the model onto data; inversion and prediction exercises become tractable. In the end, it seems suited now to envision and gauge model improvements, on the one hand, on the basis of their increased complexity, on the other hand, on the ability to lower this complexity in regard of targeted applications and available conditioning information.

Mots clés. – Modèle hydrologique intégré ; dimension d'écoulement ; milieux simples et double continuums ; problème inverse ; paramétrisation.

Key words. – Integrated hydrological model; flow dimension; single and dual continua; inverse problem; parameterization.

I. — INTRODUCTION

Il est notoirement reconnu aujourd'hui que les hydrosystèmes souterrains sont, par définition, peu accessibles en dépit de nombreux efforts prometteurs venant de l'imagerie géophysique de sub-surface (par ex. Mari & Porel, 2008; Mari *et al.*, 2009; Hinderer *et al.*, 2009). Ces systèmes restent très sous-échantillonnés alors même que la problématique ressource en eau et gestion voudrait que l'on puisse avoir une bonne vision de la qualité et de la quantité d'eau, ainsi que leur évolution face à de multiples perturbations naturelles et anthropiques. Très vite dans l'histoire des sciences hydrologiques, les modèles

analytiques, analogiques puis numériques ont constitué des substituts à l'absence d'observation afin de mieux comprendre la dynamique des hydrosystèmes. Ainsi, dès le début des années 80, apparaissent des modèles numériques distribués pour la simulation des écoulements souterrains, les efforts de recherche passant rapidement dans le domaine public pour la construction d'outils opérationnels (par ex. McDonald & Hargbaugh, 1980; Thiery, 1990). Ces outils servent, dans un premier temps, de schéma explicatif et interprétatif des données disponibles. Ensuite, ils deviendront des demandes formulées par les décideurs pour l'aide à la gestion des ressources en eau. Plus spécifiquement en France, le développement dans les années

(*) LHyGeS, 1 rue Blessig, Université de Strasbourg/EOST – CNRS, F – 67000 Strasbourg ; fdelay@unistra.fr , ackerer@unistra.fr

90 des SAGE et SDAGE (Schéma (Directeur) d'Aménagement et Gestion des Eaux) incite les gestionnaires à développer la modélisation des grands hydrosystèmes régionaux (par ex. Amraoui *et al.*, 1999; Mougin *et al.*, 2008). Quelques études plus locales existent, majoritairement construites comme le raffinement spécifique d'approches à plus grande échelle (par ex. Stockle *et al.*, 1994; Thiery, 1993; Douez *et al.*, 2010). Dans tous les cas et jusqu'au début des années 2000, l'accent est mis sur le fonctionnement des écoulements souterrains (plus rarement sur le transfert de masse), les flux hydrométéorologiques, les écoulements de surface ou encore le fonctionnement de la zone vadose étant assimilés à de simples fonctions d'entrée-sortie de l'hydrosystème (par ex. Kolghi *et al.*, 1996).

Certainement motivés par la recherche sur le climat qui, pour partie, essaye de décortiquer les grandes circulations fluides à l'échelle globale, les travaux sur le cycle continental de l'eau «redécouvrent» que les compartiments surface et sub-surface du cycle de l'eau sont intriqués (par ex. Winter *et al.*, 1998 ; Fleckenstein *et al.*, 2010). La physique du simple échange de volumes ou de flux d'eau entre les compartiments ne répond que très partiellement aux faits d'observation. Les couplages sont de fait très instationnaires, montrent de forts contrastes de temps caractéristiques et sont bien moins linéaires que les simples échanges mentionnés plus haut. Parallèlement, des évolutions des contraintes exercées sur les hydrosystèmes comme l'irrigation de l'agriculture intensive génèrent de nouvelles difficultés de gestion de la ressource. L'irrigation intensive pompe majoritairement des eaux de surface et des eaux de nappe d'accompagnement des rivières (Corpen, 2007). On s'aperçoit alors que de nombreux hydrosystèmes plus profonds sont rapidement en récession avec, en retour, des étiajes sévères constatés dans les vallées de grands fleuves. La rotation accélérée de l'eau sur son cycle accroît également les contaminations souterraines et l'excès de minéralisation des eaux (par ex. Caswell - Zilberman, 1986; Skaggs *et al.*, 1994; Yadav *et al.*, 2002). Dès lors, Les modèles hydrologiques de seconde génération apparaissent. Ils sont qualifiés de modèles «intégrés» en raison de leur capacité à traiter de l'ensemble des trois compartiments surface, zone vadose et nappe souterraine (par ex. Furman, 2008; Goderniaux *et al.*, 2009; Frei *et al.*, 2010; Weill *et al.*, 2013). La partie hydrométéorologie de ces modèles reste encore aujourd'hui assez fruste, vraisemblablement parce que la prédiction des flux d'entrée et l'identification des paramètres météorologiques à l'échelle locale reste un domaine de recherche amont parsemé de questions encore sans réponse (bilan radiatif local, séparation évaporation-transpiration des végétaux, etc., Sophocleous, 2002; Mirus *et al.*, 2011). Dans ces nouveaux modèles intégrés, les trois compartiments majeurs sont plus ou moins couplés, sachant que les approches les plus abouties traitent de la physique des écoulements dans un unique continuum surface – sol – aquifère.

Alors que les premiers modèles d'hydrosystèmes souterrains s'adressent très majoritairement aux grandes échelles et sont en partie homogénéisés, les modèles intégrés sont généralement plus locaux et de forte hétérogénéité. En premier lieu, la dynamique des flux hydriques est très contrastée entre surface, sol et nappe, grossièrement les temps caractéristiques de séjour de l'eau sont de l'ordre de quelques jours, quelques semaines à quelques mois, quelques mois à plusieurs années dans chacun des compartiments respectifs. En second lieu, de nombreuses applications ciblent la haute résolution sur des systèmes de petite et moyenne échelle (1 – 1000 km²). La forte hétérogénéité de structure de nombreux réservoirs (milieux poreux fracturés, sols à porosités multiples, ...) ne peut plus être occultée. L'ensemble des caractéristiques évoquées plus haut a rendu les modèles intégrés de plus en plus complexes et finalement de moins en moins bien conditionnés

par les données disponibles, l'échantillonnage pratiqué étant le plus souvent insuffisant pour rendre compte de l'hétérogénéité des compartiments. Si ces données sont plus nombreuses aujourd'hui, c'est surtout parce que des variables locales continuent d'être suivies pour disposer de longues chroniques, comme : les débits des rivières, les hauteurs de nappe, la chimie des éléments majeurs. Excepté sur les cas particuliers de sites expérimentaux dévolus à la recherche, les sites d'exploitation pétrolière ou de stockage souterrain (par ex. Mari *et al.*, 2009), on n'a guère amélioré l'analyse «en routine» de l'hétérogénéité spatiale des hydrosystèmes souterrains ou encore la mesure des flux d'échange nappe – rivière. Le bilan est d'avoir à disposition d'une part des modèles potentiellement précis, tridimensionnels et à multiples lois physiques et, d'autre part, de manquer d'information haute résolution pour documenter une application quelconque. Sans nier les avancées scientifiques et techniques des modèles intégrés, leur exploitation pratique doit passer par une phase de «réduction» qui ajuste la complexité du modèle aux capacités de conditionnement et également aux attendus souhaités.

Deux illustrations de cette réduction sont proposées dans ce travail. La première s'appuie sur le fait que les données d'observation usuelles ne distinguent pas forcément toute la géométrie des écoulements dans les hydrosystèmes. Ainsi, les mesures de débits en rivière ou de hauteurs d'eau fournissent des grandeurs moyennes qui distinguent mal les composantes tridimensionnelles de l'écoulement à surface libre d'un réseau drainant. La même constatation s'applique aux charges hydrauliques dans les nappes. Elles sont le plus souvent mesurées comme des hauteurs d'eau dans des puits complètement ouverts où le potentiel hydraulique s'équilibre à une valeur moyenne uniforme sur l'épaisseur mouillée de la nappe. Cette mesure ne discrimine pas l'hétérogénéité verticale de l'aquifère, pas plus que les composantes verticales de l'écoulement (Delay *et al.*, 2011, 2012). Il est proposé de ramener le système drainant de surface (fossé, rivière...) à un réseau de liens monodimensionnels, chaque lien gardant néanmoins les paramètres d'une géométrie simplifiée de la section de drain modélisé. Les écoulements de sub-surface sont traités dans un continuum zone vadose – zone saturée mais en intégrant sur la verticale les propriétés hydrodynamiques du sol et de l'aquifère et les charges hydrauliques (et/ou pressions capillaires). Zone vadose et nappe sont donc modélisées comme une surface bidimensionnelle déformée, tenant ainsi compte des variations topographiques de la surface du sol et du mur (fond) de l'aquifère. La seconde illustration se focalise sur le compartiment souterrain de l'hydrosystème dont on a vu que l'hétérogénéité verticale et ses effets restaient peu visibles sur les mesures classiques de charge hydraulique. En présence de forte hétérogénéité, comme dans les milieux poreux fracturés (cas de nombreux aquifères carbonatés plus ou moins karstifiés), une approche classique associant descriptions géométriques des fractures et de la matrice poreuse se heurtera au manque d'information sur le réseau de fractures. A l'opposé, une approche simple continuum (type milieu poreux unique) devra être finement discrétisée et présenter de très forts contrastes de propriétés hydrodynamiques susceptibles de rendre compte de la chenalisation des écoulements. En gardant une approche bidimensionnelle de la nappe mais en rendant plus complexe la physique des écoulements, on peut «réduire» le modèle de nappe. L'hétérogénéité locale de l'écoulement est assimilée dans un double continuum qui décrit explicitement les flux dans le milieu ouvert du réseau de fractures et les flux dans la matrice. A l'échelle d'un site expérimental hydrogéologique, un exemple de résolution de problème inverse est traité sur des données d'interférences hydrauliques entre puits. Cet exemple montre qu'un aquifère simple milieu nécessite le choix d'une forte variabilité locale des propriétés hydrodynamiques et par

conséquent une paramétrisation lourde du modèle. A l'opposé, l'accroissement de la complexité physique d'une approche double continuum décrit localement la forte hétérogénéité et n'a besoin que d'une résolution spatiale grossière de cette hétérogénéité, réduisant ainsi la paramétrisation du modèle.

II. — REDUCTION DE DIMENSION D'UN MODELE HYDROLOGIQUE INTEGRE

1) Ecoulement dans le réseau drainant

On limite ici le modèle hydrologique aux écoulements du réseau drainant de surface et aux écoulements de sub-surface de la zone vadose et de la zone saturée. Usuellement, les écoulements à surface libre dans le réseau drainant et les rivières sont traités par les équations de Saint-Venant (par ex. Panday & Huyakorn, 2004) que l'on va réécrire ici, après simplifications, sous la forme d'une équation d'onde diffusives monodimensionnelle (Govindaraju & Kavvas, 1990). On suppose que chaque tronçon de rivière est de section trapézoïdale définie par deux paramètres l [L] la largeur du fond du tronçon et α [-], la pente des berges (Fig. 1). On admet également que l'on peut définir un flux moyen unitaire (vitesse) \mathbf{u}_x [LT⁻¹] dans une direction x normale à la section d'écoulement. La direction x n'est pas fixée dans l'espace et suit la pente principale du lit de la rivière. Dans ces conditions, le système d'équations traduisant le principe de conservation des flux volumiques en eau (1a) et la conservation de la quantité de mouvement (1b) est écrit sous la forme :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \nabla_x (A \mathbf{u}_x) = l' q \quad (1a)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial t} + \mathbf{u}_x \cdot \frac{\partial \mathbf{u}_x}{\partial x} + |g| |\nabla_x h| = |g| \left(\nabla_x z - \mathbf{s}_f \right) - \frac{q}{h} \mathbf{u}_x \quad (1b)$$

A [L²] est la surface en eau normale à la direction principale d'écoulement x dans la rivière, h [L] est la hauteur d'eau dans la rivière, l' [L] est la largeur de la surface d'eau libre dans la rivière, z [L] est cote topographique du fond de la rivière, q [LT⁻¹] caractérise l'ensemble des entrées-sorties d'eau «latérales» par les berges et le fond de la rivière, $|g|$ [LT⁻²] est la composante scalaire de l'accélération de pesanteur, \mathbf{s}_f [-] est le vecteur correspondant à la pente de «friction» de la rivière.

On peut apporter une simplification majeure à l'équation de conservation de la quantité de mouvement en supposant que les variations du régime d'écoulement sont lentes (écoulement pseudo-stationnaire) et rendent nul le terme $d/dt = \partial/\partial t + \mathbf{u} \partial/\partial x$. Les flux latéraux q sont également considérés comme négligeables comparés au flux circulant dans le lit de la rivière. Dans ces conditions, on obtient pour l'équation (1b) :

$$\nabla_x (h + z) = -\mathbf{s}_f \quad (2)$$

Bien que la vitesse ait disparu de l'équation (2), la pente de friction réintroduit cette vitesse dans l'équation via la relation de Manning :

$$\mathbf{u}_x = \frac{R_h^{2/3}}{N_{man}} \mathbf{s}_f^{1/2} \quad (3)$$

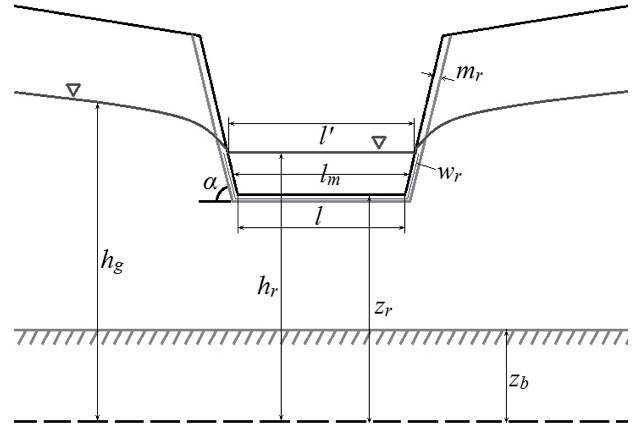


Fig. 1.- Géométrie simplifiée de la section d'un tronçon drainant (fossé, rivière, ...) et principaux paramètres de modélisation. h_r et h_g sont les charges hydrauliques dans la rivière et la nappe. z_r est la cote topographique du fond de la rivière et z_b celle du fond de la nappe. l' est la largeur de la surface d'eau libre, l est la largeur du fond de la rivière, α est la pente des berges. w_r est le périmètre mouillé de la rivière et m_r l'épaisseur de sédiments au fond de la rivière.

Fig. 1.- Simplified geometry of the cross section of a draining segment (ditch, river, ...) and main modeling parameters. h_r and h_g are the hydraulic heads in the river and the aquifer. z_r is the elevation of the river bottom and z_b the elevation of the aquifer bottom. l' is the width of the water surface, l is the width of the river bottom, α is the slope of the banks. w_r is the wetted perimeter of the river, and m_r the thickness of the sediment coating in the river bed.

avec N_{man} [L^{1/3} T⁻¹] le coefficient de Manning et R_h [L] le rayon hydraulique de la rivière.

Pour une section trapézoïdale de rivière, on identifie facilement la largeur en eau de la rivière l' et la section d'écoulement A en fonction de la hauteur d'eau h et des paramètres l et α (Fig. 1) :

$$l' = l + \frac{2h}{\tan \alpha} ; A = \frac{l+l'}{2} h = \left(l + \frac{h}{\tan \alpha} \right) h \quad (4)$$

Le rayon hydraulique R_h correspond au rapport entre la section A et le périmètre «mouillé» du lit la rivière :

$$R_h = \frac{(l+l')h}{2(l+2h/\sin \alpha)} \quad (5)$$

L'introduction de \mathbf{s}_f (équation 2) dans la relation de Manning (équation 3) permet d'identifier le flux moyen unitaire (vitesse) le long de la direction principale d'écoulement de la rivière :

$$\mathbf{u}_x = - \frac{R_h^{2/3}}{N_{man} |\nabla_x (h+z)|^{1/2}} \nabla_x (h+z) \quad (6)$$

En substituant U_x dans l'équation de conservation des flux (1a), on obtient :

$$\frac{\partial A}{\partial t} - \nabla_x \cdot \left(A \frac{R_h^{2/3}}{N_{man} |\nabla_x(h+z)|^{1/2}} \nabla_x(h+z) \right) = l'q \quad (7)$$

Sachant que la dérivée de A par rapport au temps peut se réécrire :

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left(h \left(l + \frac{h}{\tan \alpha} \right) \right) = \left(l + \frac{2h}{\tan \alpha} \right) \frac{\partial h}{\partial t} = l'(h) \frac{\partial h}{\partial t} \quad (8)$$

l'équation de conservation des flux prend la forme d'une équation de diffusion non-linéaire de la hauteur d'eau h dans la rivière :

$$l'(h) \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla_x \left(T_R(h) \nabla_x(h+z) \right) = l'(h)q \quad ; \quad T_R(h) = \frac{(l+l'(h))hR_h^{2/3}}{2N_{man} |\nabla_x(h+z)|^{1/2}} \quad (9)$$

2) Ecoulement en zone vadose et zone saturée

Le compartiment souterrain depuis la surface du sol jusqu'au fond de la nappe est assimilé à un unique continuum. Pour des questions de simplification, on occulte ici l'existence d'écoulements gravitaires en lames de surface (le ruissellement selon Horton) ou de sub-surface (écoulements hypodermiques à la faveur d'horizons tassés peu perméables du sol). Ils pourraient également être traités comme le réseau drainant (voir plus haut) mais cette fois dans une approche bidimensionnelle de l'onde de diffusion. Zone vadose et nappe sont régies par des écoulements laminaires dont la dynamique est représentée par l'équation de Darcy-Buckingham (par ex. Huyakorn & Pinder, 1983). Supposant que le milieu est peu déformable et que la masse volumique du fluide reste constante (compressibilité du fluide nulle et absence de fortes variations de concentration en solutés), on écrit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + Ss Sw(\theta) \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (\mathbf{K}(\theta) \nabla h) = q_w \quad (10)$$

Θ [-] est la teneur en eau du milieu correspondant au ratio du volume en eau sur le volume total du milieu (pores + solide), Sw [-] est la saturation en eau correspondant au ratio du volume en eau sur le volume des pores, Ss [L^{-1}] est l'emmagasinement spécifique du milieu, \mathbf{K} [LT^{-1}] est le tenseur de conductivité hydraulique du milieu, h [L] est la charge hydraulique (ou la hauteur capillaire), et q_w [T^{-1}] un terme puits-source (en volume d'eau entré ou extrait par unité de volume de milieu et unité de temps).

La réduction de la dimension d'écoulement est opérée en intégrant l'équation (10) selon la direction verticale z ou, en cas de forte pente du bassin versant, selon z pris comme la normale au mur de l'aquifère. Pour simplifier cette intégration (éviter en l'occurrence le développement d'une intégrale de Leibnitz), on suppose que les écoulements sont majoritairement parallèles au mur de l'aquifère ($\nabla_x h = 0$), que les bornes d'intégration z_b, z_s , correspondant respectivement aux côtes altimétriques du mur de l'aquifère et de la surface du sol, sont de gradient local négligeable. Enfin, on sépare l'intégration selon la direction z en deux composantes en introduisant la borne d'intégration z_w correspondant à la côte de l'interface zone non-saturée/zone saturée (ou le toit d'une nappe semi-captive) :

$$\frac{\partial h}{\partial t} \int_{z_b}^{z_w} Ss Sw(\theta) dz + \int_{z_b}^{z_w} \frac{\partial \theta}{\partial t} dz + \frac{\partial h}{\partial t} \int_{z_w}^{z_s} Ss Sw(\theta) dz + \int_{z_w}^{z_s} \frac{\partial \theta}{\partial t} dz - \nabla_{x,y} \cdot \left(\nabla_{x,y} h \int_{z_b}^{z_w} \mathbf{K}(\theta) dz + \nabla_{x,y} h \int_{z_w}^{z_s} \mathbf{K}(\theta) dz \right) = Q \quad (11)$$

La dichotomie permet de dissocier les divers comportements des paramètres hydrodynamiques entre zone vadose et zone saturée. Ainsi, les variations de teneur en eau θ sont évidemment nulles dans la zone saturée et la saturation en eau Sw vaut 1. Le terme relatif à l'emmagasinement spécifique Ss est négligeable comparé aux variations de teneur en eau dans la zone vadose, et enfin, la conductivité hydraulique \mathbf{K} ne dépend pas de la teneur en eau dans la zone saturée. On peut donc réécrire l'équation (11) sous la forme :

$$\frac{\partial h}{\partial t} \int_{z_b}^{z_s} Ss dz + \int_{z_b}^{z_s} \frac{\partial \theta}{\partial t} dz - \nabla_{x,y} \cdot \left(\nabla_{x,y} h \int_{z_b}^{z_s} \mathbf{K} dz + \nabla_{x,y} h \int_{z_w}^{z_s} \mathbf{K}(\theta) dz \right) = Q \quad (12)$$

Le théorème de la valeur moyenne permet d'exprimer les intégrales des termes en Ss et \mathbf{K} sous la forme $\int Ss dz = S_{sat} h$, $\int \mathbf{K} dz = \mathbf{K}_{sat} h$. Le terme en θ est transformé en introduisant la capacité capillaire :

$$\int_{z_w}^{z_s} \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = \int_{z_w}^{z_s} \frac{\partial \theta}{\partial h} \frac{\partial h}{\partial t} dz = \frac{\partial h}{\partial t} \int_{z_w}^{z_s} C(h) dz \quad (13)$$

Finalement l'intégration selon z permet d'établir une équation bidimensionnelle commune à la zone vadose et la zone saturée de la forme :

$$\bar{S}(h) \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla_{x,y} \cdot (\bar{\mathbf{T}}(h) \nabla_{x,y} h) = Q \quad (14)$$

$$\bar{S}(h) = S_{sat} h + \int_{z_w}^{z_s} C(h) dz \quad ; \quad \bar{\mathbf{T}}(h) = \mathbf{K}_{sat} h + \int_{z_w}^{z_s} \mathbf{K}(\theta) dz$$

Les paramètres moyens \bar{S} et $\bar{\mathbf{T}}$ sont obtenus par intégration numérique, l'intégration dans la zone vadose entre z_w et z_s supposant que soient classiquement imposées des équations d'état liant conductivité K et teneur en eau θ , capacité capillaire C et charge hydraulique h . Ces mêmes équations d'état supposent également que l'on puisse établir un profil selon z de la hauteur capillaire alors que l'équation (14) n'est *a priori* construite que pour calculer une charge moyenne h unique le long de z . Il est choisi pour le calcul des paramètres \bar{S} et $\bar{\mathbf{T}}$ que le profil capillaire entre z_w et z_s soit hydrostatique, conduisant à une évolution linéaire de la hauteur capillaire entre zéro en z_w et $-(z_s - z_w)$ en z_s . Il faut également noter que l'équation d'écoulement calcule une charge moyenne h positive dès que le milieu est localement saturé (présence d'une nappe). Une valeur négative de h (succion capillaire) ne peut être obtenue que pour un milieu complètement non saturé (absence de nappe). Usuellement, les flux latéraux (dans le plan normal à z) sont tels que : 1- dans la zone saturée le moteur des flux est le gradient des charges hydrauliques h , 2- dans la zone vadose, le moteur est le gradient des hauteurs capillaires (h négatif). Ne disposant que d'une seule valeur de h sur z , les flux latéraux totaux zone vadose et zone saturée sont en partie erronés ; par exemple, le flux dans la zone vadose peut être la conséquence du gradient d'une charge h positive correspondant à la hauteur de nappe. A l'usage, de nombreux tests sur différentes configurations d'hétérogénéité de milieu montrent que les erreurs induites par l'intégration sur z restent très faibles et non significatives à l'échelle d'un bassin versant complet (non détaillé ici).

Pour conclure sur le modèle, le couplage à l'échelle du bassin versant entre système souterrain et réseau de drainage est réalisé localement via des flux d'échange entre les deux systèmes passant par les termes puits-source de l'équation (9) et Q de l'équation (14). On considère que ces flux sont proportionnels aux différences entre hauteur d'eau dans la rivière et charge hydraulique dans la nappe (Gunduz & Aral, 2005). Cette hypothèse reste acceptable tant que la charge dans la nappe est supérieure à la côte topographique du fond de la rivière. Lorsque la nappe est plus basse, le flux d'échange devient simplement proportionnel à la hauteur d'eau dans la rivière. La réduction de dimension euclidienne du modèle intégré présenté ci-dessus permet bien évidemment une forte réduction des coûts calcul et simplifie également la linéarisation des équations pour la zone vadose et le système drainant de surface. L'objectif ici n'est pas d'entrer dans les détails de cette réduction des coûts en fonction du degré de complexité géométrique et d'hétérogénéité du système étudié. On peut néanmoins considérer sans difficulté qu'à réduire les dimensions euclidiennes d'un modèle, le temps calcul est a minima réduit au prorata du nombre d'inconnues éliminées. Par exemple, un modèle tridimensionnel à 10

«couches» de calcul (un minimum pour une vue 3D correcte) sera calculé au moins 10 fois plus vite dans son approche bidimensionnelle.

3) Exemples

Deux simulations numériques sur des objets simplifiés permettent d'illustrer le comportement du modèle intégré. Il ne sera pas procédé ici à une comparaison des résultats avec ceux d'autres approches. La géométrie simple du «livre ouvert» ou de la «vallée en Y» est paradoxalement un exemple de référence largement usité dans la littérature (par ex. Sulis *et al.*, 2010; Maxwell *et al.*, 2014). La géométrie simple du modèle ne permet pas de cacher les erreurs numériques ou de conception derrière les résultats nécessairement difficiles à appréhender sur un objet complexe. On reprendra ci-dessous la vallée en Y dont le fond est occupé par trois branches connectées d'un réseau drainant. Chaque branche est ici un fossé ou un ruisseau de 1 m de large, 1 m de profondeur et les berges sont verticales. La topographie de la vallée est telle que la pente moyenne est de

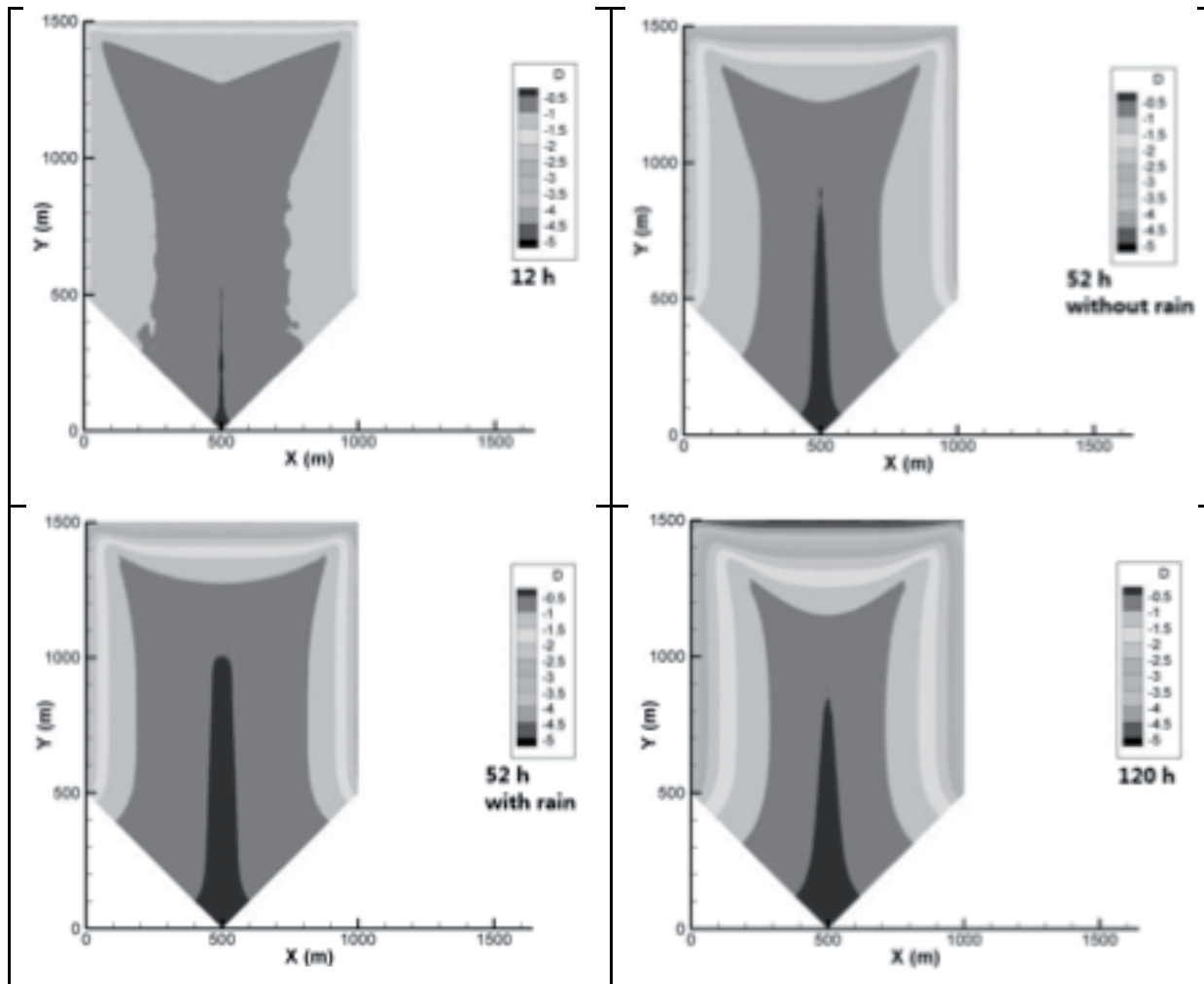


Fig. 2.- Cartes piézométriques (D = Depth) à différents temps sur un bassin versant de géométrie simplifiée (vallée en Y) soumis à drainage gravitaire. La piézométrie est exprimée en profondeur du toit de la nappe sous la surface topographique. Les deux cartes à 52 h sont les hauteurs d'eau sans et avec évènement pluvieux déclenché au temps de simulation 48 h.

Fig. 2.- Hydraulic head maps (D = depth) at different simulation times over the watershed with simplified geometry (Y shaped valley) under gravity-driven draining. The heads are given as the water table depth below the topographic surface. The two maps at 52 h are water depths without and with a rainfall event simulated at 48 h.

3% (50 m de dénivelé pour 1.5 km de long). Le compartiment souterrain est un aquifère d'accompagnement (en sus du sol) du réseau drainant, de faible épaisseur égale à 5 m sur l'ensemble du système. Le mur de l'aquifère suit la topographie de la surface. On teste le scénario d'un petit bassin-versant dont l'aquifère initialement à 1 m de profondeur sous la surface topographique se vidange naturellement par effet gravitaire. Les ruisseaux sont initialement secs. Au cours de cette vidange, le bassin est arrosé d'une forte pluie uniformément distribuée, d'intensité 5 mm.h⁻¹, qui se déclenche au temps t=48 h et dont la durée est de 4 h.

La Figure 2 représente les cartes de charges hydrauliques dans la nappe, représentées en profondeur de l'interface saturé/non saturé sous la surface topographique. On observe clairement que la pluie générée à 48 h engendre en 4 h une forte augmentation piézométrique comparée à ce que serait le régime de vidange sans événement pluvieux. Cette rapidité de réaction, difficile à simuler, est la conséquence de la faible profondeur de l'aquifère, de son caractère peu capacitif et d'un sol encore suffisamment humide (la nappe est initialement à 1 m de profondeur) pour permettre une infiltration rapide. Succédant l'évènement pluvieux, le fond du bassin garde un niveau piézométrique élevé pendant que la partie amont s'assèche rapidement (vidange de la nappe). Le caractère fortement transitoire du scénario simulé et la rapidité de réaction du système sont confirmés par l'analyse de la variation du débit à l'exutoire du Y formé par les ruisseaux. La courbe débit versus temps est globalement croissante convexe, conséquence de la vidange gravitaire de la nappe (Fig. 3). Elle devrait ensuite décroître avec l'assèchement de la nappe, mais l'évènement pluie à 48 h se manifeste par un pic de débit très asymétrique avec une croissance abrupte en raison du flux pluvieux immédiatement drainé par les ruisseaux. La relaxation nettement plus lente ramène ensuite le pic de débit vers un régime général de vidange progressive de la nappe.

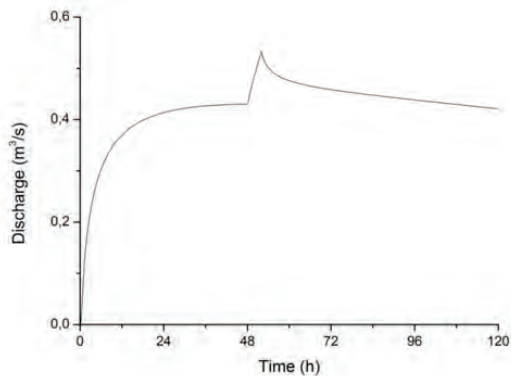


Fig. 3.- Débit simulé en fonction du temps à l'exutoire du bassin versant – vallée en Y.

Fig. 3.- Simulated flow rate with respect to time at the outlet of the watershed – Y shaped valley.

Le modèle à dimension euclidienne réduite se comporte sans anomalie de calcul (oscillations, diffusion numérique, etc.) qui pourrait adoucir et amortir ses réponses. Ceci se vérifie tant pour un raffinement important du modèle (maille de 5 m pour un domaine de 500x1500 m, pas de temps de 4 s pour 120 h de temps simulé) que pour une approche plus grossière (maille de 20 m, pas de temps de 120 s). Les erreurs entre discrétisation fine et grossière sont négligeables. En pratique, l'intégration

verticale des écoulements souterrains et la simplification du réseau de surface en chenaux sont des éléments qui rendent la résolution numérique plus robuste et notamment moins sensible aux hétérogénéités spatiales des paramètres ou encore leur évolution d'une itération temporelle à l'autre.

Le second exemple proposé est bâti sur une géométrie de bassin plus réaliste qui reprend celle d'un bassin-versant réel de moyenne montagne (Le Strengbach, Vosges). La géométrie est néanmoins légèrement retouchée afin d'accentuer, pour l'exercice, la réactivité du système. 72 segments de 1 m de large et 1 m de profondeur forment le réseau de drainage en surface. Le bassin-versant de 0,8 km² est à forte pente (20-30%) : de 1148 m au point haut jusqu'à 883 m au point bas sur une distance de moins d'un kilomètre de long. Cette caractéristique engendre des écoulements très majoritairement contrôlés par les effets gravitaires pour un aquifère d'accompagnement du réseau de surface et dont la faible épaisseur (8 m) est uniforme sur l'ensemble du bassin. En raison des fortes pentes locales, le maillage bidimensionnel du compartiment de sub-surface est raffiné aux abords du réseau drainant afin d'améliorer la simulation des échanges surface-souterrain. Néanmoins, la taille minimale des mailles ne descend jamais en dessous de 5 m. On simule sur une période de 120 h le drainage gravitaire rapide de l'aquifère pour une situation initiale où la hauteur de nappe initiale varie linéairement entre -8 m et -4 m sous la surface topographique entre le haut et le bas du bassin versant. On ne discute ici que de l'évolution du compartiment souterrain, évolution plus complexe que dans le premier exemple mentionné en raison d'une géométrie réaliste du bassin et de sa forte pente. Le drainage progressif de l'aquifère est décrit avec précision en espace et en temps. Les zones élevées s'assèchent pendant que les vallées se saturent, en particulier celles dont le fond est occupé par un drain de surface dont la «perméabilité» très forte facilite le transfert des flux. Globalement, pour tous les temps de simulation, les flux convergent (Fig. 4) vers le réseau drainant et la taille des zones drainées diminue avec le temps lorsque l'aquifère se vide. Les cartes piézométriques (Fig. 5) confirment l'évolution temporelle rapide du bassin et le comportement majoritairement gravitaire des écoulements en raison de la forte pente du système.

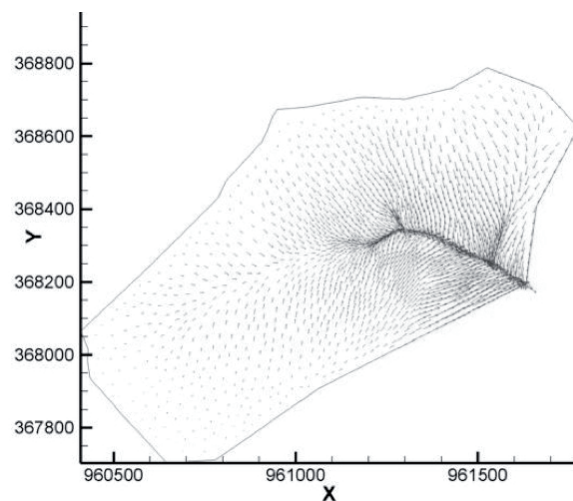


Fig. 4.- Vecteurs flux hydriques après 12 h de drainage gravitaire d'un petit bassin versant de montagne.

Fig. 4.- Water fluxes directions after 12 h of gravity-driven draining in a small hilly watershed.

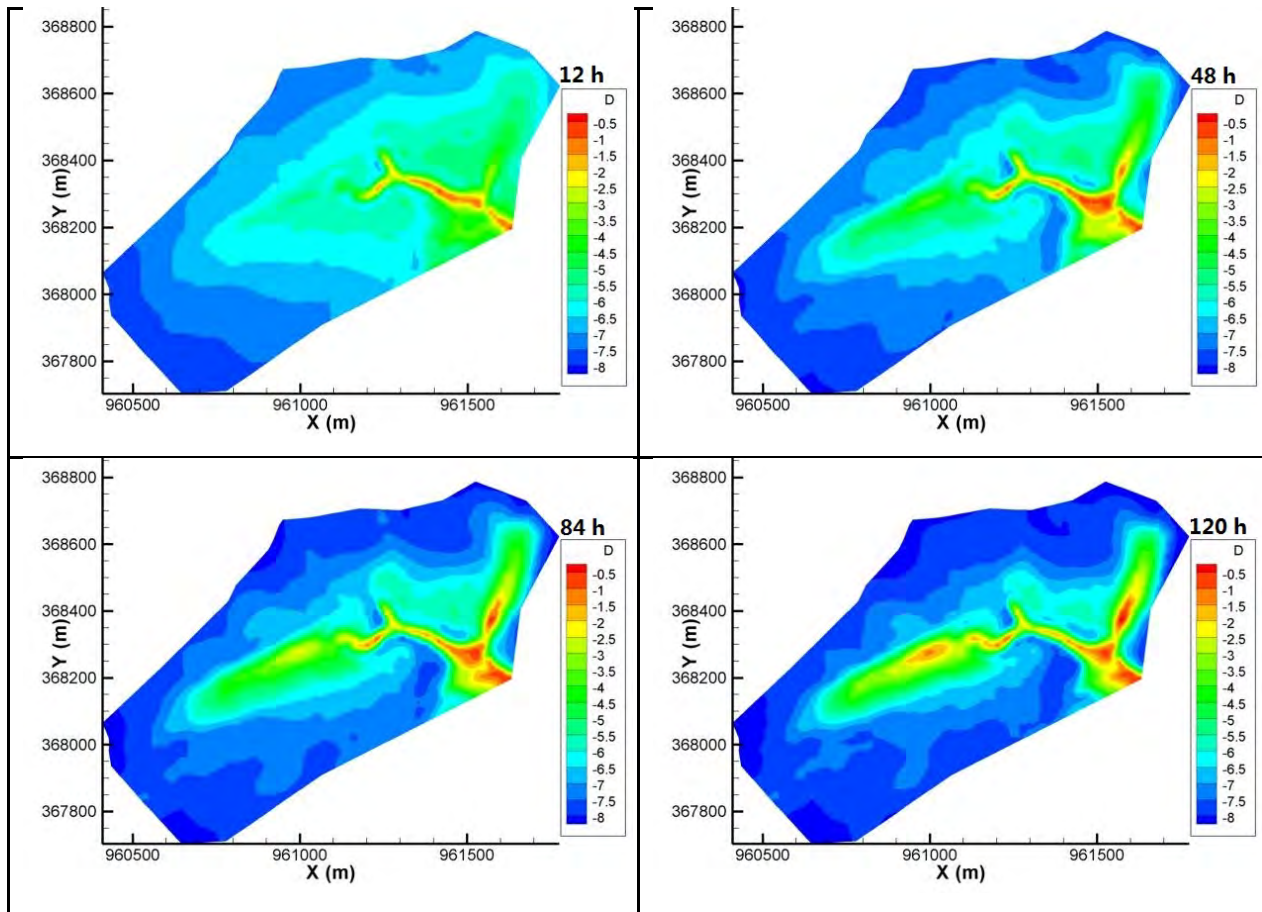


Fig. 5.- Cartes piézométriques à différents temps du drainage gravitaire d'un petit bassin versant de montagne. La piézométrie est exprimée en profondeur du toit de la nappe sous la surface topographique.

Fig. 5.- Hydraulic head maps at different times of gravity-driven drainage in a small hilly watershed. The heads are expressed at the water table depth below the topographic surface.

Une comparaison, non présentée ici, entre un modèle tridimensionnel et l'approche à dimension réduite ne montrerait pas de différence significative tant pour les flux du réseau drainant que les flux échangés entre compartiments et les flux souterrains. Notons néanmoins que l'exercice de simulation n'intègre pas de forte hétérogénéité du milieu souterrain dans la mesure où l'on regarde à petite échelle un aquifère peu épais accompagnant un petit réseau de surface. L'intégration d'une hétérogénéité conséquente du milieu souterrain doit être travaillée à plus grande échelle mais constitue une analyse longue au-delà des préoccupations principales de ce travail. D'ailleurs, s'il est question de traiter d'aquifères profonds à forte hétérogénéité de structure, la proposition d'une réduction de modèle via une physique plus fouillée de la dynamique des écoulements souterrains se révèle une perspective également intéressante.

III. — REDUCTION DE MODELES D'HYDROSYSTEMES SOUTERRAINS A FORTE HETEROGENEITE

Comme cela est évoqué dans l'introduction, les hydrosystèmes souterrains peuvent présenter des hétérogénéités de structure très peu «visibles» sur les données hydrauliques

disponibles. C'est particulièrement le cas des aquifères carbonatés qui mixent des caractéristiques hydrodynamiques de milieux poreux et de milieux fissurés, voire karstifiés, sur des distances parfois très courtes. Le caractère diffusif des écoulements amortit très fortement les charges hydrauliques du système, passant d'une zone d'écoulement poreux à une zone d'écoulement préférentiel en drains et fractures sans observer de variation marquée des charges (par ex. Kaczmaryk & Delay, 2007a). Identifier les contrastes des propriétés de conduction et de stockage du milieu sur la base de valeurs locales de charges hydrauliques peut se révéler un exercice ardu et nécessiter un degré élevé de raffinement spatial et temporel du modèle. Il en ressort des difficultés de paramétrisation du modèle qui rendent l'exploitation de l'outil difficile tant dans sa phase de calage (inversion) que dans une phase ultérieure de prédiction et d'évaluation des incertitudes.

La plupart des modèles hydrogéologiques opérationnels a pour habitude de traiter des milieux complexes sous l'approche d'un simple continuum dans lequel on compte sur le raffinement de la discrétisation et une affectation maille par maille de propriétés hydrodynamiques contrastées pour simuler l'hétérogénéité de structure. Dans ces conditions, l'écoulement est vu au travers d'une équation unique de conservation des flux volumiques de l'équation de Darcy. En éliminant les conditions

initiales et celles des limites, puis en occultant le temps et l'espace pour la variable d'état et les paramètres afin d'alléger l'écriture, le modèle est décrit par l'équation (par ex. de Marsily, 1996) :

$$Ss \frac{\partial h}{\partial t} - \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla h) = q \quad (15)$$

avec h [L] la charge hydraulique dans la nappe, \mathbf{K} [LT^{-1}] le tenseur de conductivité hydraulique, Ss [L^{-1}] l'emmagasinement spécifique, et q [T^{-1}] un terme puits-source par unité de volume de milieu. Ce sont les disparités dans l'espace (et éventuellement le temps) des valeurs des paramètres Ss et \mathbf{K} qui décrivent l'hétérogénéité du milieu.

On peut également transcrire les contrastes de propriétés hydrodynamiques entre milieu poreux et milieu fissuré plus ouvert en supposant que le modèle est double. En chaque point de l'espace, il est susceptible de coexister un continuum fractures généralement très conducteur mais peu capacitif et un continuum matrice peu conducteur mais capacitif (par ex. Barrenblatt *et al.*, 1960 ; Warren & Root, 1963 ; Delay *et al.*, 2007). Les écoulements sont donc régis localement par deux équations :

$$\begin{aligned} Ss_f \frac{\partial h_f}{\partial t} - \nabla \cdot (\mathbf{K}_f \cdot \nabla h_f) + \alpha (h_f - h_m) &= q_f \\ Ss_m \frac{\partial h_m}{\partial t} - \nabla \cdot (\mathbf{K}_m \cdot \nabla h_m) + \alpha (h_m - h_f) &= q_m \end{aligned} \quad (16)$$

La définition des grandeurs h , Ss , \mathbf{K} et q est conforme à celle énoncée pour l'équation (15) sachant que, spécifiquement, les indices f et m se rapportent aux continums respectifs fractures et matrice. α [$\text{L}^{-1}\text{T}^{-1}$] est un coefficient d'échange de flux entre les deux continums. Plusieurs configurations du modèle sont possibles. Considérant que les deux milieux sont présents partout, on renseignera les équations (16) sur l'ensemble de leurs paramètres en chaque maille du domaine. On peut également supposer que seul un milieu peut exister localement, mettant alors les paramètres de l'autre milieu et l'échange α à la valeur zéro. Cette configuration reste néanmoins d'intérêt réduit puisque qu'elle est conforme à une approche simple continuum (équation 15) éventuellement bimodale sur la distribution de ses paramètres. Enfin, il est fréquemment admis que la matrice peu conductrice est de conductivité hydraulique \mathbf{K}_m négligeable devant celle des fractures (Landereau *et al.*, 2001). Le milieu devient stagnant, comparable à un réservoir statique qui alimente (est alimenté par) le milieu fracturé via une cinétique de premier ordre :

$$Ss_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + \alpha (h_m - h_f) - q_m = 0 \quad (16)$$

Cette cinétique a un comportement très similaire à celui d'une équation de diffusion (ici de pression) entre les deux milieux.

Les utilisateurs des modèles opérationnels de nappe rechignent généralement à s'appuyer sur une approche double milieu, prétextant : 1- que sa paramétrisation intrinsèque par maille est plus forte, 5 paramètres en excluant les termes puits au lieu de 2 pour un simple milieu, et 2- que les formes similaires des deux équations d'écoulement conduisent invariablement à des équifinalités sur les sorties du modèle sauf fort contraste

entre les paramètres du milieu fracturé d'une part et les paramètres de matrice d'autre part. Il est vrai également, en cas d'inversion du modèle ou simplement d'ajustement «à la main» que les charges h_f , h_m sont de sensibilités très différentes vis-à-vis des paramètres (plusieurs ordres de grandeur). Il est, par exemple, très difficile d'ajuster le coefficient α si les autres paramètres ne sont pas déjà établis ou leur sensibilité artificiellement très atténuée (Delay *et al.*, 2007; Kaczmaryk & Delay, 2007b). Pour autant, l'exemple proposé ci-dessous démontre que l'approche double continuum n'est pas sans avantage en termes de réduction de modèle, même dans l'exercice de paramétrisation optimale et d'inversion du modèle.

L'exemple proposé repose sur l'inversion d'un simple et d'un double continuum sur la base de tests d'interférences réalisés sur le Site Expérimental Hydrogéologique (SEH) de Poitiers. La description générale du site et des tests d'interférences est détaillée dans plusieurs références, notamment (Kaczmaryk & Delay, 2007b; Audouin *et al.*, 2008; Bodin *et al.*, 2012). Le test d'interférence consiste à pomper un débit constant dans un puits et observer dans un ou plusieurs puits distants les rabattements de charge hydraulique en fonction du temps. Comme il est stipulé en introduction de cette contribution, les charges moyennes mesurées dans un puits ouvert sur l'ensemble de l'épaisseur mouillée d'un aquifère enregistrent mal les composantes verticales de l'écoulement. Par conséquent, les deux types de modélisation sont basés sur une simplification bidimensionnelle considérant des écoulements plans horizontaux. On admet également que la conductivité hydraulique des milieux est isotrope localement ce qui ramène l'identification du tenseur \mathbf{K} à celle d'un scalaire K . L'approche double continuum considère que le milieu matrice est un réservoir statique où les écoulements sous gradient de charge sont négligeables (cf. plus haut). Spécifiquement dans le cas du SEH, l'aquifère carbonaté investigué est karstifié localement à la faveur de 4 horizons de 2-3 m d'épaisseur aux profondeurs de 30, 50, 80 et

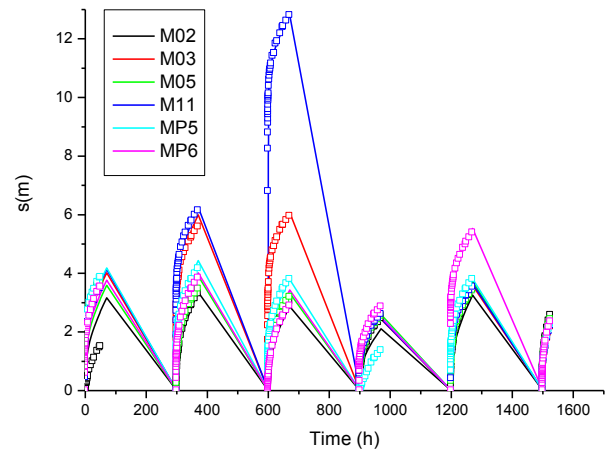


Fig. 6.- Exemple de formes de courbes de rabattements hydrauliques lors de tests d'interférences menés sur le site expérimental hydrogéologique de Poitiers. L'enchaînement de pics multiples est la conséquence d'un ajout séquentiel au cours du temps des différentes réponses d'un puits aux sollicitations de différents puits pompés. Ronds = mesures observées, trait continu = simulation numérique après ajustement d'un modèle d'écoulement double continuum.

Fig. 6.- Examples of drawdown curves during interference testing held in the hydrogeological experimental site in Poitiers. The series of multiple peaks is the result of adding sequentially in time the responses of a well to stresses generated by different pumping wells. Open dots = observed data, solid line = numerical simulation after inversion of a dual-continuum flow model.

110 m environ. Les écoulements préférentiels dans ces horizons engendrent des réponses très rapides aux tests d'interférence. Afin de produire une information spatialisée la plus exhaustive possible sur la dynamique des écoulements, on génère des jeux de données d'interférences qui, en chaque point d'observation, ajoutent séquentiellement dans le temps la réponse du puits observé à chacun des stress engendrés par chaque puits pompé. La réponse en chaque puits observé correspond donc aux rabattements de charge hydraulique générés pour n puits pompés individuellement en séquence. Chaque séquence est suivie d'une période de relaxation permettant à la nappe de revenir à sa hauteur initiale avant pompage (Fig. 6). Les jeux de données assemblés en chaque puits observé sont utilisés pour identifier par approche inverse les paramètres hydrodynamiques des deux modèles, simple et double continuums. On calcule une fonction objectif $F(\mathbf{h}(\mathbf{p}), \mathbf{h}^*, \mathbf{p})$ correspondant à la somme du carré des résidus entre les sorties du modèle $\mathbf{h}(\mathbf{p})$ et les observations \mathbf{h}^* . Les paramètres \mathbf{p} sont ajustés par un algorithme d'optimisation qui cherche itérativement les meilleures valeurs de \mathbf{p} pour réduire F . Cette optimisation suppose que l'on puisse calculer les composantes $dF/d\mathbf{p}$ du gradient de la fonction F . Ces composantes sont obtenues par la méthode de l'état adjoint qu'un lecteur intéressé pourra retrouver dans (Ackerer & Delay, 2010 ; Ackerer *et al.*, 2014).

Attendu que les deux modèles, simple et double continuums, sont programmés avec les mêmes approches numériques, le même niveau de discrétisation en espace et en temps sur le même domaine, la réduction de modèle passe ici par la paramétrisation du calcul. On cherche le nombre de paramètres spatialement distribués pour décrire l'hétérogénéité du milieu identifiable sur les données d'interférences hydrauliques. Afin de ne pas influencer artificiellement sur le nombre, la distribution spatiale et la distribution statistique des paramètres à identifier, on utilise une technique évolutive de paramétrisation (Ackerer & Delay, 2010 ; Trottier *et al.*, 2014 ; Ackerer *et al.*, 2014) qui positionne des points de calcul de valeurs de paramètres aux nœuds d'une grille grossière surimposée au domaine de calcul. Il n'y a pas de relation entre la grille des paramètres et la grille de résolution des équations du modèle. L'affectation des valeurs locales des

paramètres sur la grille de calcul des équations s'effectue par simple interpolation linéaire des valeurs aux nœuds de la grille des paramètres. Lors des itérations de convergence minimisant la fonction objectif F , la grille des paramètres peut être affinée, augmentant ainsi le nombre de paramètres à ajuster pour caler le modèle (Fig. 7). Ce raffinement est local et différencié en fonction de la position sur la grille des paramètres. Il s'appuie sur des critères multiples comme celui de réduire localement les écarts locaux entre $\mathbf{h}(\mathbf{p})$ et \mathbf{h}^* ou encore, faire décroître les composantes locales $dF/d\mathbf{p}$. Au final, on obtient le nombre minimum et la valeur de paramètres locaux distribués sur le domaine modélisé pour ajuster les sorties du modèle aux données d'observation.

Reprenant l'exemple des tests d'interférence mentionnés plus haut, la Figure (8) propose deux cartes des conductivités hydrauliques K (simple continuum) et K_f (double continuum) obtenues sur la grille de calcul après inversion (Ackerer & Delay, 2010 ; Trottier *et al.*, 2014). On rappelle qu'ayant annihilé les écoulements du milieu matrice du double continuum, la conductivité K_f du milieu fracturé devient comparable à la conductivité K d'un simple continuum. Alors que les ajustements des deux modèles sur les données d'interférence sont de qualité égale (en général, moins de 1 cm d'écart pour chaque valeur de charge entre modèle et données), les distributions spatiales de K et K_f diffèrent largement. A l'échelle de l'ensemble du domaine modélisé, les deux approches identifient sensiblement les mêmes gammes de variation des paramètres. La délimitation spatiale des zones de forte conductivité comparée aux faibles valeurs peut varier d'un modèle à l'autre. Cela étant, l'approche de paramétrisation décrite plus haut est typiquement stochastique et peut dupliquer le nombre de champs de paramètres équiprobables pour le même ajustement du modèle aux données. Regardant ces ensembles, simple et double continuum identifient les mêmes grandes zones de conductivité forte versus zones peu conductrices. La différence majeure entre approche simple et double continuum tient au degré de raffinement nécessaire pour obtenir un bon ajustement du modèle. Le simple continuum est obligé de décrire finement l'hétérogénéité locale pour rendre compte des données d'interférences. Ainsi la carte des conductivités hydrauliques K , peut localement présenter de fortes variations de valeurs locales pour rendre compte des contrastes de comportement de l'hydrosystème. En pratique, il faut un nombre important de paramètres locaux servant de point d'appui à l'interpolation pour produire le champ de conductivités. A l'opposé, le double continuum dispose intrinsèquement (dans ses équations) de la capacité à rendre compte de contrastes locaux de comportement hydraulique du milieu. La carte des conductivités ressemble à un assemblage simple de zones de valeurs uniformes plus ou moins étendues. Elle nécessite un faible nombre de paramètres (donc de points d'appui pour être établie). On rappelle que pour autant, l'ajustement des données est similaire entre les modèles. Un simple continuum à deux paramètres K et S_s nécessite entre $2 \times 1036 = 2072$ et $2 \times 4108 = 8216$ paramètres pour une inversion correcte. Le double continuum quant-à-lui est nettement moins gourmand avec pour les 4 paramètres K_f , S_{s_f} , α et S_{s_m} , un nombre de valeurs à identifier entre $4 \times 31 = 124$ et $4 \times 89 = 356$.

Quand la résolution numérique du double continuum est bien écrite, le coût calcul d'une simulation est à peine supérieur à celui affiché par un simple continuum. Bien que la procédure de raffinement de la grille des paramètres soit en partie dépendante de la «randomisation» qui permet d'obtenir plusieurs solutions équiprobables au problème inverse, on peut grossièrement considérer que le temps calcul total est proportionnel au nombre de paramètres à identifier. Dès lors et pour le cas présent, une approche double continuum s'avère entre 6 à 66 fois plus rapide à inverser qu'une approche simple

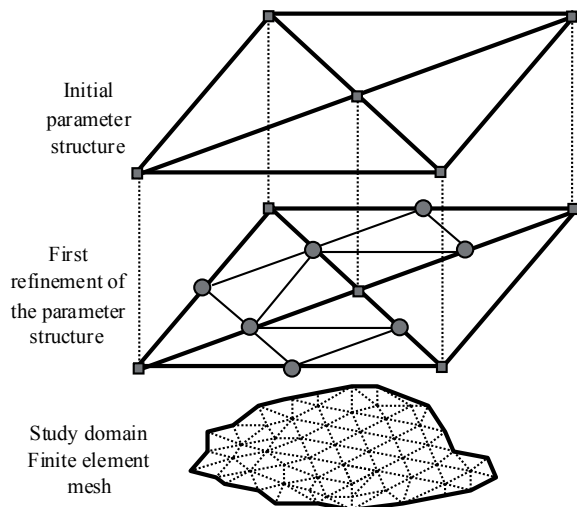


Fig. 7.- Grille des paramètres et raffinement utilisés lors de l'inversion des modèles d'écoulement. L'affectation des paramètres de la grille de calcul (en dessous) s'effectue par interpolation linéaire des valeurs aux nœuds de la grille des paramètres.

Fig. 7.- Grid of parameters and refinement technique used with the inversion of flow models. Prescribing the parameters of the computation grid (below) is performed by linear interpolation of node values from the parameter grid.

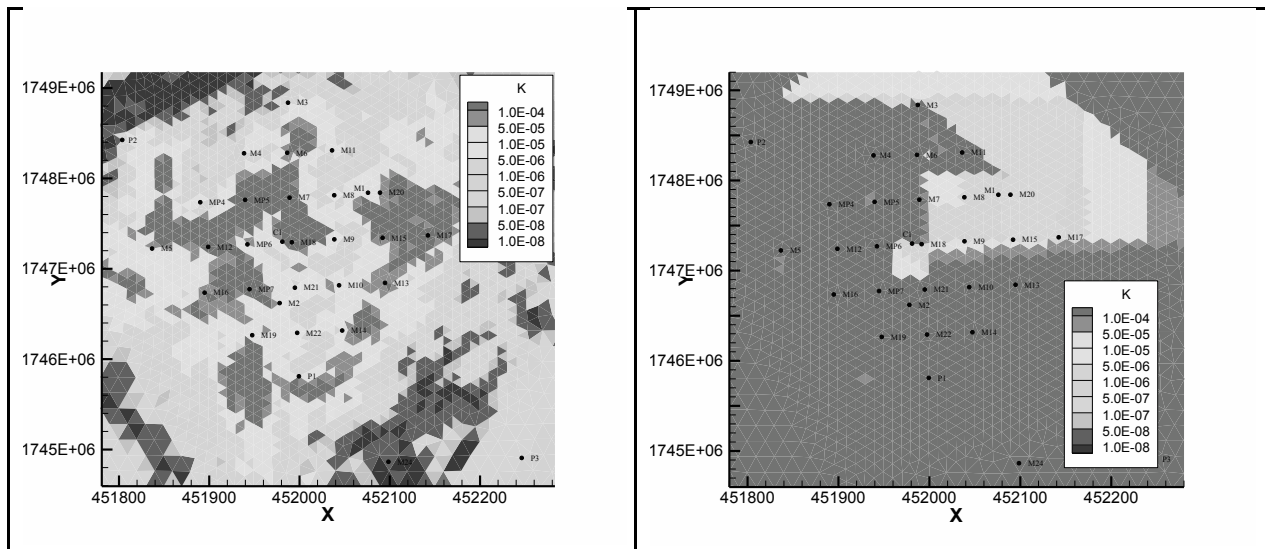


Fig. 8.- Exemples de champs de conductivité hydraulique K (simple continuum, à gauche), K_f (double continuum, à droite) identifiés par approche inverse sur des données de tests d'interférence. Si la gamme de variation des conductivités ne diffère pas beaucoup entre approches simple et double continous, le simple continuum nécessite bien plus de détails et de résolution spatiale que le double continuum pour produire une solution inverse acceptable.

Fig. 8.- Examples of hydraulic conductivity fields K (single continuum, left), K_f (dual continuum, right) identified by inversion of interference test data. Even though the conductivity ranges do not much differ between a single and a dual continuum approach, the single continuum requires much more details and high spatial resolution to provide a valuable inverse solution.

continuum. La complexification apparente de la physique est à l'usage une réduction drastique du modèle qui nécessite alors bien moins d'effort d'ajustement.

IV. — CONCLUSION

Si le besoin d'une analyse plus fouillée de la dynamique du cycle de l'eau continentale s'impose dans de nombreux travaux de recherche et d'applications pratiques, ce besoin est également à l'origine d'une complexité accrue des modèles mécanistes de l'Hydrologie. Ainsi, les modèles actuels, dits «intégrés», appréhendent sous le même ensemble la complexité du fonctionnement d'un bassin versant depuis les données d'entrées hydrométéorologiques en passant par le drainage superficiel, l'infiltration dans les sols, jusqu'aux écoulements en nappe. La tridimensionnalité du système et la forte variabilité spatio-temporelle de comportement sont les éléments majeurs de complexité. Cela étant, un modèle ne reste qu'un outil générique de calcul qui doit être adapté puis renseigné sur le contexte local pour une application dédiée. De fait, le sous-échantillonnage chronique des hydrosystèmes, en particulier leur compartiment souterrain, n'aide pas à la documentation du modèle, lui-même d'autant plus demandeur d'information qu'il est complexe et finement résolu. Pire encore, une grande partie des variables observables se révèlent peu discriminantes du fonctionnement de l'hydrosystème. On a pu ainsi prendre l'exemple des flux et hauteurs d'eau en rivière ou encore des charges hydrauliques en aquifère et constater que ces variables moyennes (agrégées) restituent mal la tridimensionnalité des écoulements. Elles renseignent mal un modèle hydrologique intégré sauf à adopter la dimensionnalité du modèle à celle que la donnée est susceptible d'identifier.

Ceci nous a conduits à dégrader un modèle hydrologique

sans pour autant amputer complètement la physique sous-jacente. Cette dernière est en grande partie préservée car elle ne subit qu'une phase d'agrégation permettant de réduire la dimension des écoulements du système. Il n'y a pas non plus d'incohérence conceptuelle entre réduction de dimension, variables manipulées et paramètres du modèle. Spécifiquement sur les paramètres, les valeurs moyennes utilisées ne sont que le strict reflet de l'agrégation et non pas des valeurs empiriques ou issues de connaissance *a priori* ou encore d'une manipulation algébrique sans relation avec la manière de réduire le modèle. Comme l'idée de réduction du modèle est motivée par la mise en conformité des variables manipulées avec la réalité des données, on compare nécessairement les sorties du modèle sans le biais de mettre face à face des objets qui n'ont pas même signification. Le fait peut s'avérer un élément incontournable lors de phases d'inversion du modèle. Si introduire de multiples mécanismes et processus, donc alourdir la description physique, peut engendrer des modèles plus complexes, paradoxalement, une physique plus affûtée peut aussi aider à la réduction. Une approche simple «entassera» sur ses propres mécanismes les effets de mécanismes absents mais partiellement capturés par des données d'observation. Il peut alors ressortir d'un exercice de comparaison modèle – données, des paramétrisations lourdes, voire irréalistes tant sur le nombre de paramètres à identifier que sur les valeurs trouvées. Prenant l'exemple d'écoulements préférentiels dans un hydrosystème carbonaté karstifié, on montre qu'une physique qui intègre localement des écoulements bimodaux à la faveur d'un continuum fracturé et d'un continuum matriciel, engendre une paramétrisation simplifiée du modèle. Les exercices d'inversion deviennent abordables, en particulier dans une approche stochastique cherchant les valeurs des paramètres, leurs distributions statistiques et spatiales, ainsi que le caractère plausible ou non d'une prédiction. S'il est indéniable qu'il faille faire progresser les modèles à la mesure des avancées dans la compréhension

du fonctionnement du milieu naturel, il faut également se poser la question de l'adéquation entre les sorties du modèle et ce que peut être sa documentation, en particulier sur des données d'observation. Un idéal (mais il peut y en avoir d'autres) qui ne construirait l'expérimentation et l'observation qu'en pleine connaissance des capacités du modèle et de ses besoins n'est

en pratique jamais atteint. Par conséquent, le véritable progrès dans la modélisation est typiquement un exercice à double entrée, compliquant les approches pour améliorer la description des processus physiques en jeu d'une part, mais d'autre part et en connaissance de cause, sachant réduire cette complexité en fonction des besoins et/ou des informations disponibles.

BIBLIOGRAPHIE

- ACKERER P. & DELAY F. (2010). – Inversion of a set of well-test interferences in a fractured limestone aquifer by using an automatic downscaling parameterization technique. *Journal of Hydrology*, **389** : 42-56.
- ACKERER P., TROTTIER N. & DELAY F. (2014). – Flow in double porosity aquifers: Parameter estimation using an adaptive multiscale approach. *Advances in Water Resources*, **73** : 108-122.
- AMRAOUI, BICHOT F., SEGUIN J.-J., PLATEL J. & SOURISSEAU B. (1999). – Restructuration du modèle nord-aquitain de gestion des nappes. Réalisation de six simulations pour le schéma de gestion des eaux du département de la Gironde. *BRGM/RR*, **40224-FR** : 128 p.
- AUDOUIN O., BODIN J., POREL G. & BOURBIAUX B. (2008). – Flowpath structure in a limestone aquifer: Multi-borehole logging investigations at the Hydrogeological Experimental Site of Poitiers – France. *Hydrogeology Journal*, **16** (5) : 939-950.
- BARRENBLATT G., ZHELTOV I. & KOCHINA I. (1960). – Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, **24** : 852-864.
- BODIN J., ACKERER P., BOISSON A., BOURBIAUX B., BRUEL D., DE DREUZY J.-R., DELAY F., POREL G. & POURPAK A. (2012). – Predictive modeling of hydraulic head responses to dipole flow experiments in a fractured/karstified limestone aquifer: Insights from a comparison of five modeling approaches to real-field experiments. *Journal of Hydrology*, **454-455** : 82-100.
- CASWELL M.F. & ZILBERMAN D. (1986). – The effects of well depth and land quality on the choice of irrigation technology. *American Journal of Agricultural Economics*, **68** (4) : 798-811.
- CORPEN (Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'Environnement) (2007). – *Les fonctions environnementales des zones tampons*. *Protection des eaux*. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie édit., Paris. Open-file document. World Wide Web address : http://www.developpementdurable.gouv.fr/IMG/pdf/DGALN_fonctions_environn_zones_temp_bd.pdf
- DELAY F., ACKERER P., BELFORT B. & GUADAGNINI A. (2012). – On the emergence of reciprocity gaps during interference pumping tests in unconfined aquifers. *Advances in Water Resources*, **46** : 11-19.
- DELAY F., ACKERER P. & GUADAGNINI A. (2011). – Theoretical analysis and field evidence of reciprocity gaps during interference pumping tests. *Advances in Water Resources*, **34** : 592-606.
- DELAY F., KACZMARYK A. & ACKERER P. (2007). – Inversion of interference hydraulic pumping tests in both homogeneous and fractal dual media. *Advances in Water Resources*, **30** (3) : 314-334.
- DE MARSILY G. (1996). – *Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers. Second edition*. Academic Press, San Diego (California) : 467 p.
- DOUEZ O., BICHOT F., DEQUIDT D., DUGRILLON D., PUTOT E. & PETIT L. (2010). – Contribution à la gestion des prélèvements à la périphérie du Marais Poitevin par modélisation hydrodynamique. *BRGM/RP*, **58297-FR** : 241 p.
- FLECKENSTEIN J.H., KRAUSE S., HANNAH D.M. & BOANO F. (2010). – Groundwater – surface water interactions: New methods and models to improve understanding of processes and dynamics. *Advances in Water Resources*, **33** (11) : 1291-1295.
- FREI S., LISCHIED G. & FLECKENSTEIN J.H. (2010). – Effects of microtopography on surface-subsurface exchange and runoff generation in a virtual riparian wetland: A modeling study. *Advances in Water Resources*, **33** (11) : 1388-1401.
- FURMAN A. (2008). – Modeling coupled surface-subsurface flow processes: a review. *Vadose Zone Journal*, **7** (2) : 741-56.
- GODERNIAUX P., BROUYERE S., FOWLER H.J., BLEKINSOP S., THERRIEN R., ORBAN P. & DASSARGUES A. (2009). – Large scale surface-subsurface hydrological model to assess climate change impacts on groundwater reserves. *Journal of Hydrology*, **373** : 122-138.
- GOVINDARAJU R. & KAVVAS M. (1990). Approximate analytical solutions for overland flow. *Water Resources Research*, **26** (12) : 2903-2912.
- GUNDUZ O. & ARAL M.M. (2005). – River networks and groundwater flow: A simultaneous solution of a coupled system. *Journal of Hydrology*, **301** (1-4) : 216-234.
- HINDERER J., DE LINAGE C., BOY J.-P., GEGOUT P., MASSON F., ROGISTER Y., AMALVICT M., PFEFFER J., LITTLE F., LUCK B., BAYER R., CHAMPOLLION C., COLLARD P., LE MOIGNE N., DIAMENT M., DEROUSSI S., DE VIRON O., BIANCALE R., LEMOINE J.-M., BONVALOT S., GABALDA G., BOCK O., GENTHON P., BOUCHER M., FAVREAU G., SEGUIS L., DESCLOITRES M. & GALLE S. (2009). – The GHYRAF (Gravity and Hydrology in Africa) experiment : description and first results. *Journal of Geodynamics*, **48** (3-5) : 178 p.
- HUYAKORN P.S. & PINDER G.F. (1983). – *Computational Methods in Subsurface Flow*. Academic Press, Orlando (Florida) : 473 p.
- KACZMARYK A. & DELAY F. (2007a). – Improving dual-porosity-medium approaches to account for karstic flow in a fractured limestone. Application to the automatic inversion of hydraulic interference tests. *Journal of Hydrology*, **347** : 391-403.
- KACZMARYK A. & DELAY F. (2007b). – Interpretation of interference pumping test in fractured limestone by means of dual-medium approaches. *Journal of Hydrology*, **337** : 133-146.
- KHOLGHI M., RAZACK M. & TREICHEL W. (1996). – Modeling and quantitative management of river-aquifer systems with the use of unit response functions. *Hydrogéologie*, **4** : 11-20.
- LANDEREAU P., NOETINGER B. & QUINTARD M. (2001). – Quasi-steady two equation models for diffusive transport in fractured porous media: Large-scale properties for densely fractured systems. *Advances in Water Resources*, **24** (6) : 863-876.
- MARI J.-L. & POREL G. (2008). – 3-D seismic imaging of a near-surface heterogeneous aquifer: A case study. *Oil & Gas Science and Technology*, **63** (2) : 179-201.

- MARI J.-L., POREL G. & BOURBIAUX B. (2009). – From 3D seismic to 3D reservoir deterministic model thanks to logging data: The case study of a near surface heterogeneous aquifer. *Oil & Gas Science and Technology*, **64** (2) : 119-131.
- MAXWELL R.W., PUTTI M., MEYERHOFF S., DELFS J.O., FERGUSON I.M., IVANOV V., KIM J., KOLDITZ O., KOLLET S.J., KUMAR M., LOPEZ S., NIU J., PANICONI C., PARK Y.J., PHANIKUMAR M.S., SHEN C., SUDICKY E.A. & SULIS M. (2014). – Surface-subsurface model inter-comparison: a first set of benchmark results to diagnose integrated hydrology and feedbacks. *Water Resources Research*, **50** : 1531-1549.
- MCDONALD M.G. & HARBAUGH A.W. (1980). – A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Open-File Report, **83-875**. 76 p. http://pubs.usgs.gov/twri/twri6a2/pdf/TWRI_6-A2.pdf
- MIRUS B.B., EBEL B.A., HEPPNER C.S. & LOAGUE K. (2011). – Assessing the detail needed to capture rainfall-runoff dynamics with physics-based hydrologic response simulation. *Water Resources Research*, **47** : W00H10.
- MOUGIN B., ALLIER D., PUTOT E., SEGUIN J.-J., STOLLSTEINER P. & SCHROETTER J.-M. (2008). – Bassins versants bretons en contentieux européen. Typologie et modélisation de l'évolution des concentrations en nitrates. *BRGM/RP*, **56408-FR** : 64 p.
- PANDAY S. & HUYAKORN P.S. (2004). – A fully coupled physically-based spatially-distributed model for evaluating surface/subsurface flow. *Advances in Water Resources*, **27** (4) : 361-382.
- SKAGGS R.W., BREVE M.A. & GILLIAM J.W. (1994). – Hydrologic and water quality impacts of agricultural drainage. *Critical reviews in environmental science and technology*, **24** (1) : 1-32.
- SOPHOCLEOUS M.A. (2002). – Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, **10** : 52-67.
- STOCKLE C.O., MARTIN S.A. & CAMPBELL G.S. (1994). – CropSyst, a cropping system model : water/nitrogen budgets and crop yields. *Agricultural systems*, **46** : 335-359.
- SULIS M., MEYERHOFF S.B., PANICONI C., MAXWELL R.M., PUTTI M. & KOLLET S.J. (2010). – A comparison of two physics-based numerical models for simulating surface water-groundwater interactions. *Advances in Water Resources*, **33** (4) : 456-467.
- THIERY D. (1990). – Logiciel MARTHE. Modélisation d'aquifère par maillage rectangulaire en régime transitoire pour un calcul hydrodynamique des écoulements – version 4.3. *BRGM, R32210EAU*, 356 p.
- THIERY D. (1993). – Optimisation des champs captants : le logiciel CAPUCINE. Principes et domaine d'application. *Rapport BRGM*, **37811** : 56 p.
- TROTTIER N., DELAY F., BILDSTEIN O. & ACKERER P. (2014). – Inversion of a dual-continuum approach to flow in a karstified limestone: Insight into heterogeneity revealed by well-test interferences. *Journal of Hydrology*, **508** : 157-169.
- WARREN J.E. & ROOT P.J. (1963). – The behavior of naturally fractured reservoirs. *Society of Petroleum Engineering Journal*, **3** (3) : 245-255.
- WEILL S., ALTISSIMO M., CASSIANI G., DEIANA R., MARANI M. & PUTTI M. (2013). – Saturated area dynamics and streamflow generation from coupled surface-subsurface simulations and field observations. *Advances in Water Resources*, **59** : 196-208.
- WINTER T.C., HARVEY J.W., FRANKE O.L. & ALLEY W.M. (1998). – Ground water and surface water: a single resource. U. S. Geological Survey (Denver, Colorado), Circular **1139** : 87 p.
- YADAV R.K., GOYAL B., SHARMA R.K., DUBEY S.K. & MINHAS P.S. (2002). – Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and ground water : A case study. *Environment International*, **28** (6) : 481-486

L'APPORT DES OPERATIONS ARCHEOLOGIQUES A LA CONNAISSANCE DU PLEISTOCENE REGIONAL : EXEMPLE DES FONDS DE VALLEES DU BASSIN FRANÇAIS DE L'ESCAUT

The contribution of archaeological operations to the knowledge of the regional Pleistocene: the example of the valley bottoms of the French catchment of the Scheldt river

par Laurent DESCHODT (*)

Résumé. – De nombreuses observations stratigraphiques et paléoenvironnementales recueillies dans les fonds de vallées du nord de la France, en particulier en contexte d'archéologie préventive, autorisent une synthèse sur le bassin français de l'Escaut. Des enregistrements sédimentaires sont recensés au moins depuis le Saalien sous forme de nappes graveleuses, de dépôts de l'Eemien ou du Début Glaciaire weichselien à faible profondeur, d'emboîtements de nappes alluviales profondes dans la terminaison française de la « vallée flamande ». La bonne représentation des deux derniers cycles contraste avec le faible enregistrement des périodes précédentes du Pléistocène. Le fait peut être expliqué par un bilan tectonique quaternaire proche de la neutralité et par une accélération de la morphogenèse de la vallée flamande depuis la fin du Saalien. Le système morpho-sédimentaire du bas pays est marqué par l'héritage prépondérant de la fin du Pléniglaciaire supérieur weichselien. Après une phase hydrologique extensive et érosive, le réseau se contracte vers 22 000 ans et un dépôt fluvio-éolien, voire purement éolien (dunes, mais surtout épandage loessique) exhausse les fonds de vallée. Le réseau hydrographique du Tardiglaciaire et de l'Holocène s'inscrit dans cet héritage morphologique. Des enregistrements sédimentaires variés permettent de préciser l'évolution paléoclimatique au Tardiglaciaire et de mettre en évidence des crises hydrologiques intra-holocènes.

Abstract. – Numerous stratigraphic and palaeoenvironmental observations collected in the north of France, especially in a rescue archaeology context, allow a synthesis in the French Scheldt catchment. Sedimentary records are identified at least since the Saalian in gravel layers, in shallow Eemian or Weichselian Early Glacial deposits, in deep nested alluvial sheets in the French termination of the « Flemish Valley ». The good representation of the last two cycles contrasts with the faint of all the previous periods of the Pleistocene. The fact can be explained by a Quaternary tectonic balance close to neutral and an acceleration of the morphogenesis of the Flemish Valley since the late Saalian. The morpho-sedimentary system of the low country is marked by the Weichselian Upper Pleniglacial major inheritance. After an extensive and erosive hydrological phase, network shrinks about 22,000 years ago and fluvio-aeolian deposit or even purely aeolian (dunes but mostly loess cover) raise the valley bottoms. The hydrographic network of the Late Glacial and Holocene is part of this morphological inheritance. Various sedimentary records allow to specify the palaeoclimatic evolution during Late Glacial and highlight intra-Holocene hydrological crisis.

Mots clés. – Escaut, fonds de vallée, stratigraphie quaternaire, sédiment fluvial, sédiment éolien.

Key words. – Scheldt river, valley bottoms, Quaternary stratigraphy, fluvial sediment, aeolian sediment.

Note préliminaire. — Concernant les mots Weichselien/weichselien et Eemien/eemien, la question de leur orthographe s'est souvent posée. Pour des raisons d'euphonie, on attendrait Weichsélien et Eémien (voire Éemien). Cependant, à l'instar de Jean Sommé, nous privilégions l'orthographe la plus proche de l'orthographe du stratotype, c'est à dire Weichsel et Eem sans accent. C'est ce qui est maintenant le plus usité dans la revue *Quaternaire*.

I. — INTRODUCTION

Le bassin français de l'Escaut est composé d'un haut pays (plateaux crayeux) et d'un bas pays (plaines basses et collines de sables et d'argiles). Il est caractérisé par l'absence de cours d'eau d'importance et, dans le bas pays, par une couverture sédimentaire quaternaire continue et des pentes faibles (Fig. 1). Système morpho-sédimentaire, taille limitée des cours d'eau, appartenance à la zone loessique : autant de paramètres qui font du bas pays une région particulièrement favorable aux

enregistrements du Pléistocène et de l'Holocène en fond de vallée. Pourtant, malgré des premières observations précoces (Ladrière, 1881) et quelques travaux qui illustrent tout le potentiel de la région, tels Warneton (Paepé & Vanhoorne, 1967) ou Erquinghem-sur-la-Lys (Sommé *et al.*, 1996), les fonds de vallée du bassin de l'Escaut n'ont que peu profité du renouveau des recherches sur le Quaternaire, comme a pu le remarquer Jean Sommé dans un inventaire des unités lithostratigraphiques quaternaires régionales (Sommé, 2013).

(*) INRAP, 11 rue des Champs, 59650 Villeneuve-d'Ascq et UMR 8591 du CNRS, Laboratoire de Géographie Physique : Environnements Quaternaires et Actuels; laurent.deschodt@inrap.fr

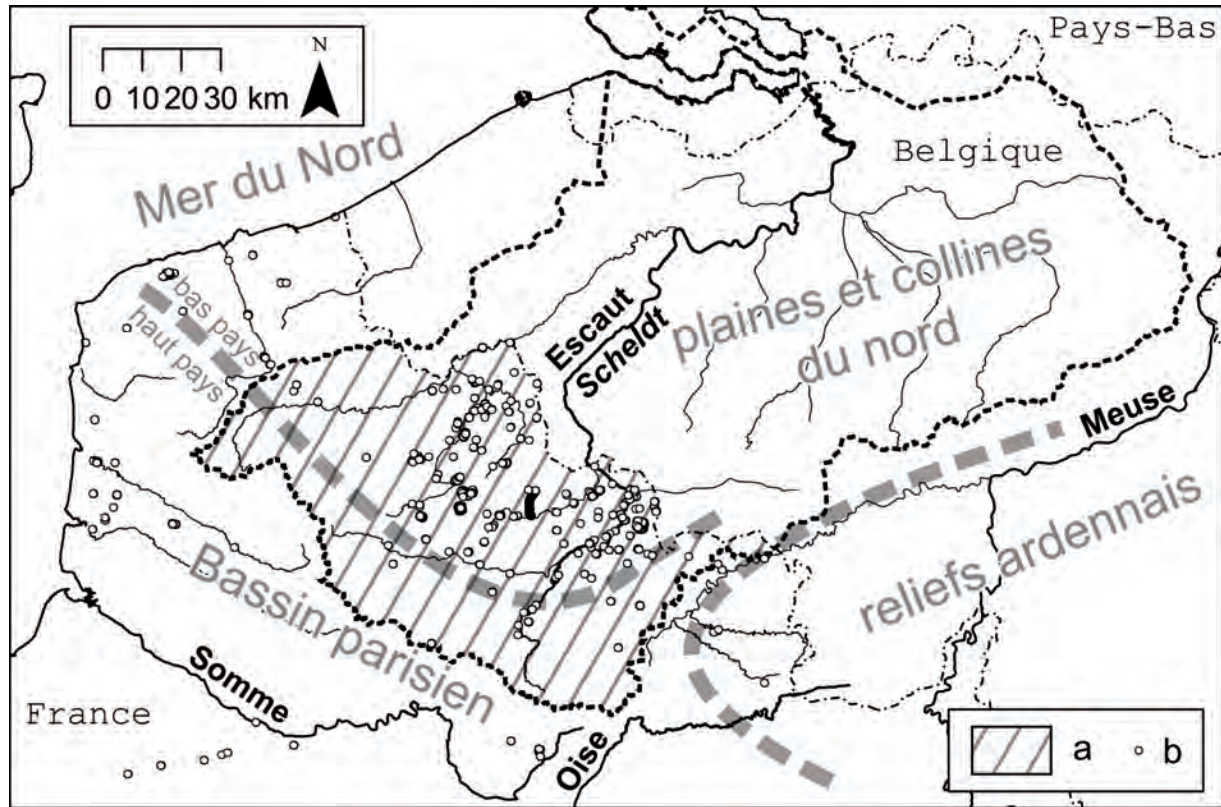
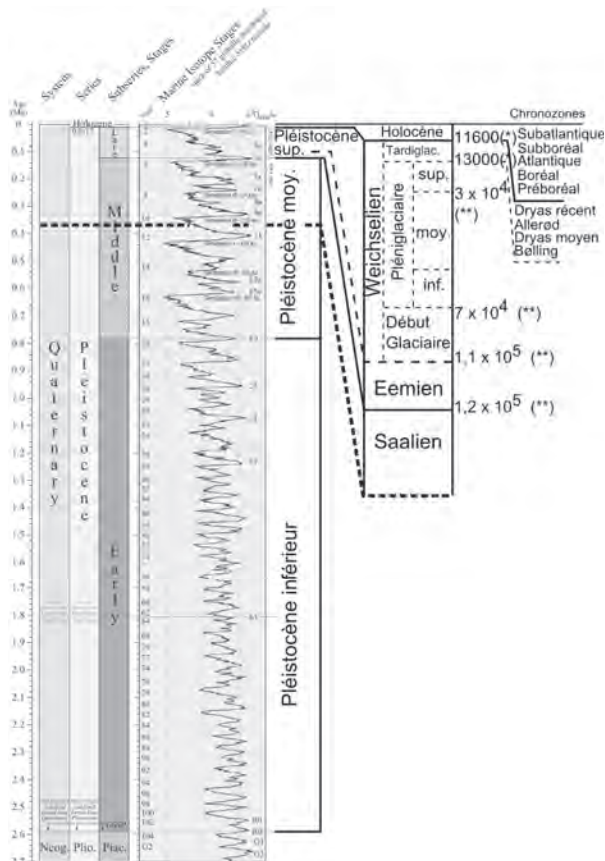


Fig. 1. – Le bassin français de l’Escaut. Légendes : a – le bassin français, b – observation personnelle.

Fig. 1. – The French catchment of the Scheldt river. Captions: a – the French catchment, b – personal observation.



Une thèse a été récemment soutenue sur la chronostratigraphie et les paléoenvironnements des fonds de vallées du bassin français de l’Escaut principalement à partir de données issues de l’archéologie préventive (Deschodt, 2014). À côté de levés détaillés et d’études paléoenvironnementales acquis sur des chantiers de fouille archéologique, une meilleure connaissance des formations de fond de vallées est alimentée par un semis d’observations récolté sur des opérations courtes de diagnostic archéologique, en général sous la forme de puits effectués à la pelle mécanique (plus de 1 400 sur la zone considérée). Ces données sont éventuellement complétées par des dépouillements de sondages géotechniques. À l’issue du travail, l’héritage du Pléni-glaciaire supérieur weichselien apparaît prépondérant et les dépôts quaternaires des fonds de vallée peuvent être divisés en trois grands groupes : les dépôts du Pléni-glaciaire supérieur weichselien, les dépôts antérieurs, les dépôts postérieurs (Fig. 2).

Fig. 2. – Cadre chronostratigraphique : indication du cadre chronostratigraphique employé avec un extrait de la charte stratigraphique de Cohen & Gibbard (2011). Age approximatif des limites d’unités : (*) d’après Stuiver *et al.* (1995) et Taylor *et al.* (1997), (**) d’après Imbrie *et al.*, (1984) et Antoine *et al.* (1998).

Fig. 2. – Chronostratigraphic setting - display of the used chronostratigraphic setting with an extract of the stratigraphic chart after Cohen & Gibbard (2011). Approximate age of the used limits : (*) after Stuiver *et al.* (1995), Taylor *et al.* (1997), (**) after Imbrie *et al.* (1984), Antoine *et al.* (1998).

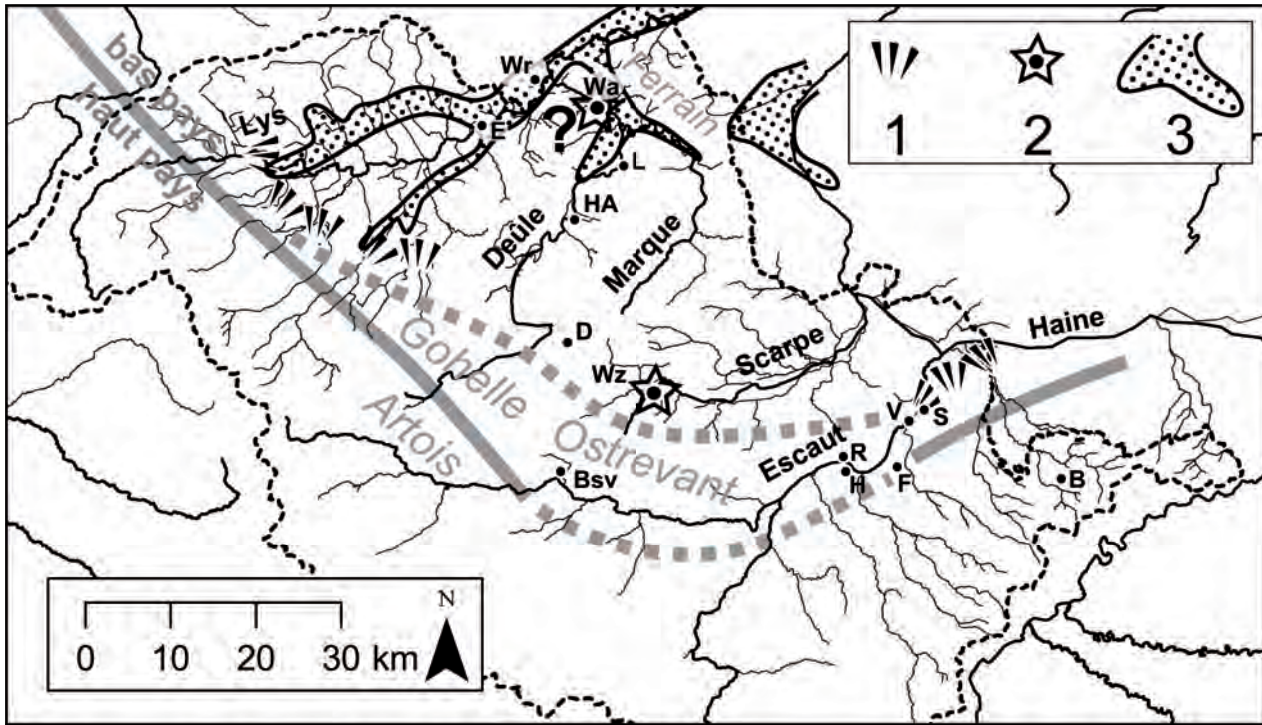


Fig. 3. – Les trois catégories de dépôts antérieurs au Weichselien conservés en fond de vallée dans le bassin français de l’Escaut et localisation des toponymes cités. Légendes : 1 – emboîtements de nappes graveleuses à la bordure du haut pays : bord sud de la plaine de la Lys et plaine de confluence Escaut-Haine ; 2 – témoin isolé de nappes eemiennes à faible profondeur : Waziers (attesté) et Wambrechies (supposé) ; 3 – nappes alluviales saaliennes et eemiennes profondes emboîtées : terminaison de la vallée flamande (Lys, Deûle-Marque aval, Escaut à l’est du Ferrain). Localités : B = Bavay ; Bsv = Biache-Saint-Vaast ; D = Dourges ; E = Erquinghem-sur-la-Lys ; F = Famars ; H = Haulchain ; HA = Houplin-Ancoisne ; L = Lille ; R = Rouvignies ; S = Saint-Saulve ; V = Valenciennes ; Wa = Wambrechies ; Wr = Warneton ; Wz = Waziers.

Fig. 3. – The three categories of deposits anterior to Weichselian preserved in the valley bottoms of the French catchment of the Scheldt river and location of the used toponyms. Captions: 1 – interbedded coarse layers in the high country border : Leie river plain southern part and Scheldt-Haine river confluence plain ; 2 – isolated indication of Eemian deposits at shallow depth : Waziers (attested) and Wambrechies (supposed) ; 3 – deep interbedded Saalian and Eemian alluvial layers on the Flemish valley bottom: Leie river plain, lower Deûle Marque rivers and the Scheldt river valley east of Ferrain. Localities: B = Bavay; Bsv = Biache-Saint-Vaast; D = Dourges; E = Erquinghem-sur-la-Lys; F = Famars; H = Haulchain; HA = Houplin-Ancoisne; L = Lille; R = Rouvignies; S = Saint-Saulve ;V = Valenciennes ;Wa = Wambrechies; Wr = Warneton; Wz = Waziers

II. — LES DÉPÔTS ANTÉRIEURS AU PLÉNIGLACIAIRE SUPÉRIEUR

1) Les dépôts antérieurs au Weichselien : nature et répartition

Seul le bas pays présente une conservation de dépôts antérieurs au Weichselien dans le fond de vallée. Il peut s’agir (Fig. 3) :

- de nappes graveleuses déposées en piedmont du haut pays ; ces nappes ne sont pas datées, toutefois une partie d’entre elles est probablement ancienne, associée à la morphogenèse régionale et à la différenciation haut et bas pays. Elles correspondent aux systèmes de terrasses présents en amont dans le haut pays (en particulier ceux de l’Aa et de la Lys). Un équivalent méconnu existe dans le cas de la plaine de confluence Escaut-Haine.

- de dépôts eemiens isolés conservés à faible profondeur ; à ce jour, seul le site de Waziers « Bas Terroir » dans la plaine de la Scarpe est attesté (Antoine *et al.*, 2013 ; Locht *et al.*, 2014). Il s’agit d’un comblement interglaciaire de chenal, avec dépôts alluviaux organiques, du bois, des restes de

faune et quelques éléments témoins d’une présence humaine en position primaire. D’autres dépôts eemiens sont susceptibles d’être conservés à Wambrechies, au « fort du Vert-Galant » anciennement décrit par Ladrière (1883, 1885). La conservation de ces témoins a été favorisée par un contexte de très larges plaines occupées par des cours d’eau de gabarit réduit.

- de nappes emboîtées dans la terminaison française de la vallée flamande ; des dépôts fluviatiles du Saalien et de l’Eemien sont présents à une vingtaine de mètres de profondeur dans la plaine de la Lys et dans la partie aval de la Deûle et de la Marque. La présence de l’Eemien est en particulier attestée vers la cote zéro à Erquinghem-sur-la-Lys (Sommé *et al.*, 1996). Ces dépôts participent au comblement de la « vallée flamande », en continuité avec la partie aval belge. Les deux derniers cycles glaciaires sont enregistrés sur environ 25 m d’épaisseur sous la forme d’un emboîtement de nappes alluviales et d’une interstratification de couvertures éoliennes (deuxième partie du Saalien et Weichselien) (Fig. 4).

Dans le bassin de l’Escaut, ces trois types de gisements en fond de vallées s’ajoutent à la nappe alluviale étagée de Biache-Saint-Vaast sur la bordure du haut pays (Tuffreau *et al.*, 1988).

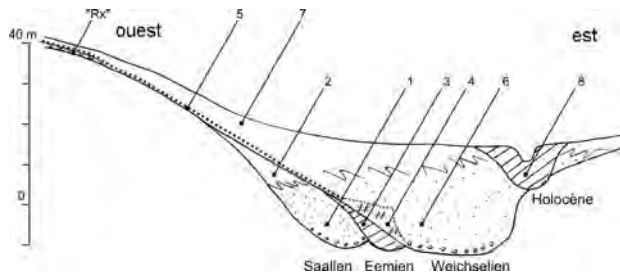


Fig. 4. – Transect théorique de la terminaison française de la vallée flamande ; échelle non respectée, chimère associant les données de la plaine de la Lys et de la Deûle en aval de Lille. Légendes : Rx – « formations résiduelles à silex », Pléistocène inférieur et Pléistocène moyen ancien ; 1 – sable fluviatile (Saalien) ; 2 – limon sableux éolien (Saalien) ; 3 – limon, sable fluviatile et dépôts organiques (Eemien) ; 4 – limon, sable fluviatile et dépôts organiques (Début Glaciaire weichselien) ; 5 – érosion fluviatile sur versant (Pléniglaciaire weichselien) ; 6 – sable fluviatile (Pléniglaciaire weichselien) ; 7 – limon éolien (Pléniglaciaire weichselien) ; 8 – limon, sable fluviatile et dépôts organiques (Tardiglaciaire weichselien et Holocène).

Fig. 4. – Hypothetical cross-section of the French end of the Flemish valley ; not to scale, chimera from association of data of the Leie river plain and Deûle river valley in Lille. Captions : Rx – residual formations with flints, Lower Pleistocene and Early Middle Pleistocene ; 1 – fluvial sand (Saalian) ; 2 – aeolian sandysilt (Saalian) ; 3 – fluvial silt, sand and organic deposits (Eemian) ; 4 – fluvial silt, sand and organic deposits (Weichselian Early Glacial) ; 5 – fluvial erosion on slope (Weichelian Pleniglacial) ; 6 – fluvial sand (Weichselian Pleniglacial) ; 7 – aeolian silt (Weichselian Pleniglacial) ; 8 – fluvial silt, sand and organic deposits (Weichselian Late Glacial and Holocene).

2) Les dépôts du Pléistocène moyen : une information sur le bilan tectonique quaternaire

Dans le bas pays, les témoins quaternaires les plus anciens sont représentés par quelques dépôts résiduels présents à une altitude modérée (70 ou 40 m) sur les interfluvés. Ils témoignent d'écoulements pléistocènes anciens provenant de l'Artois et dirigés vers le nord, dans la logique d'un retrait de la ligne de cote paléogène. La parcimonie des dépôts anciens contraste avec ceux des deux derniers cycles (Saalien, Eemien, Weichselien) qui sont bien conservés au moins dans la vallée flamande. Le Weichselien y est même particulièrement représenté (Fig. 4).

Entre ces deux pôles, les témoins sont absents. Le fait s'explique en partie par la nature du substrat (sous-représentation des roches dures, mobilité des cours d'eau sur sable, non-conservation sur la longue distance ou le long terme des cailloutis de craie) et les problèmes de reconnaissance. La bonne représentation des deux derniers cycles est d'autant plus remarquable. Nous pouvons en tirer quelques informations sur l'évolution tectonique de la zone. Les deux cycles enregistrés sur une vingtaine de mètres d'épaisseur dans la terminaison française de la vallée flamande sont à comparer avec les étagements et emboîtements de nappes des régions voisines. L'âge et l'épaisseur des dépôts de la zone étudiée semblent dérisoires par rapport aux 300 mètres accumulés aux Pays-Bas au cours du Quaternaire en lien avec un système de graben actif (Ziegler, 1994 ; Zagwijn, 1974, 1989 ; Geluk *et al.*, 1994 ; Van den Berg, 1994 ; Houtgast & Van Balen, 2000). L'enregistrement est également bien peu développé par rapport à la dizaine de cycles enregistrés sous forme de nappes étagées en contexte surrectif dans les vallées du Bassin parisien (Antoine *et al.*, 2000a ; Chaussé *et al.*, 2004) ou encore les nombreuses terrasses

de la Meuse à l'est de Maastricht qui couvrent une grande partie du Quaternaire (Van den Berg, 1994). Les enregistrements sédimentaires du Pléistocène moyen suggèrent un bilan tectonique proche de la stabilité à l'échelle du Quaternaire, ce qui ne préjuge ni de la prépondérance de la structure sur le relief ni de possibles rejeux récents (éventuellement antagonistes). Un bilan proche de la neutralité est en conformité avec la position géographique de la zone, entre un Bassin parisien en surrection et un bassin belgo-néerlandais en subsidence. Cette relative stabilité participe à la mauvaise conservation des dépôts les plus anciens.

3) Le comblement de la vallée flamande : une information sur l'évolution paléogéographique depuis la fin du Saalien

a) des apports éoliens massifs et atypiques au cours des deux derniers cycles ...

Les dépôts fluvio-éoliens du Pléniglaciaire weichselien ont comblé la vaste plaine de la Lys. Les apports éoliens ont été suffisamment importants pour modifier la morphologie de la vallée de la Deûle et permettre un décalage vers l'est du talweg (Fig. 4) (Deschodt, 1999 ; Deschodt *et al.*, 2008). Le phénomène est amorcé à la fin du Saalien et est particulièrement important au Weichselien. Sans les apports éoliens, le bilan sédimentaire des deux derniers cycles aurait été réduit, voire limité aux seuls dépôts fluviatiles de la fin du Weichselien et de l'Holocène. Nous envisageons des apports éoliens faibles avant le Saalien et particulièrement importants au Weichselien.

b) ... en liaison avec l'évolution paléogéographique du sud de la Mer du Nord depuis la fin du Saalien ...

Ce changement dans l'abondance des apports éoliens des deux derniers cycles peut être mis en parallèle avec la modification de la composition en minéraux lourds (augmentation à partir du Saalien du taux de hornblende verte) (Balescu, 1986 ; Meijs, 2002 ; Meijs *et al.*, 2012), indice d'un changement paléogéographique de la zone source à la fin du Saalien (stade isotopique marin 6, Fig. 2). Le minéral est présent dans les moraines de l'inlandsis scandinave et dans les alluvions du paléo-Rhin qui les bordait. Dans la zone d'étude, l'origine du changement de minéralogie est à chercher dans une modification du bassin sud de la Mer du Nord. La publication d'Hijma *et al.* (2012) apporte une nouvelle conception de l'évolution paléogéographique pléistocène récent de la mer du Nord. La modification des minéraux peut être expliquée par l'apport d'un stock d'alluvions rhénanes vers le sud du bassin et vers la Manche. Deux étapes sont perçues :

– Au Saalien, la rupture en mer du Nord au large des actuels Pays-Bas d'un seuil aurait eu pour conséquence la vidange d'un compartiment nord du lac pro-glaciaire exutoire du Rhin vers le bassin sud et le surcreusement du seuil crayeux du détroit du Pas de Calais, exutoire vers le bassin de la Manche ;

– Au Weichselien, le Rhin aurait trouvé son cours vers le bassin de la Manche.

Ces éléments impliqueraient une plus grande surface du bassin de la mer du Nord exondé et une disponibilité de matériaux issus des moraines.

c) ... et en liaison avec le développement récent de la vallée flamande

L'abaissement du niveau de base du bassin à la fin du Saalien impliquerait aussi un approfondissement et un développement rapide de la « vallée flamande » à travers son *bed rock* éocène sablo-argileux meuble. L'incision plus prononcée de la vallée flamande en liaison avec l'ouverture du détroit du Pas de Calais avait déjà été évoquée par Vandenberghe & De Smedt (1979, p. 102). Le scénario d'un approfondissement fin Saalien de la vallée flamande serait cohérent avec les observations suivantes :

— un creusement maximum atteint au Saalien (De Moor & Heyse, 1978 ; Vandenberghe & De Smedt, 1979) ;

— la formation des dernières basses terrasses à la confluence de la Dyle, de la Démer et de la Grande Nèthe au Saalien (Vandenberghe & De Smedt, 1979) ;

— l'extrême pénétration des influences marines eemiennes dans l'intérieur des terres (presque jusqu'à Tournai) (Tavernier, 1946) ;

— la concomitance avec un changement paléogéographique majeur marqué par le changement de minéralogie des apports éoliens et leur accroissement (Balescu, 1986 ; Meijs, 2002 ; Meijs *et al.*, 2012) ;

— les anomalies de profil de la terminaison française de la vallée flamande avec une rupture de pente longitudinale non justifiée par la seule lithologie ou la tectonique. La rupture de pente serait le résultat d'un ajustement non achevé dû à la position distale et au délai relativement court depuis l'abaissement du niveau de base) (Deschodt, 2014) ;

— les deux incisions successives (saalienne et weichselienne) enregistrées dans la vallée de la Deûle à Lille et déjà notées en leurs temps par MM. Ladrière et Gosselet (Ladrière, 1886 ; Gosselet, 1903).

4) Les dépôts du Début Glaciaire weichselien

a) *Le cas du pédo-stratotype de Warneton*

Le Début Glaciaire weichselien en fond de vallée est jusque maintenant principalement connu par le « sol de Warneton » (Paepe, 1964, 1965 ; Paepe & Vanhoorne, 1967) proche de la frontière française dans la plaine de la Lys. Le sol de Warneton a pris valeur de stratotype et est utilisé en binôme avec le « Sol de Rocourt » pour définir l'association d'un sol argileux rouge attribué à l'Eemien et d'un sol gris ou noir attribué au Début Glaciaire weichselien (Paepe, 1969 ; Paepe & Sommé, 1970 ; Sommé & Tuffreau, 1978 ; Langohr & Sanders, 1984 ; Van Vliet-Lanoë, 1990). Depuis, de nouvelles coupes bénéficient d'études paléoenvironnementales et l'utilisation du stratotype de « Warneton » tend à tomber en désuétude (Antoine *et al.*, 1994, 1998 ; Haesaerts *et al.*, 1999 ; Haesaerts & Mestdagh, 2000). La relecture des premières publications de Paepe nous permet de proposer une interprétation alternative au sol de Warneton. Il pourrait s'agir d'une formation humifère et tourbeuse associée à une activité fluviale dans un contexte de chenaux et de plaine d'inondation périglaciaires. Les sédiments limoneux et tourbeux observés pourraient être éventuellement attribués au Pléniglaciaire weichselien (Deschodt, 2014). Si cette simple relecture des données ne permet pas de redéfinir le pédostratotype de Warneton, rien dans les données anciennes ne permet de lever notre doute. Toutefois, qu'elle soit du Début Glaciaire ou du Pléniglaciaire, la formation

de Warneton est l'unique cas connu d'un dépôt tourbeux attribuable au Weichselien dans le bassin français de l'Escaut. Il s'agit d'une formation d'intérêt majeur qui mérite des études environnementales complémentaires.

b) *Des dépôts conservés sous les bas de versants loessiques*

Nos travaux permettent de pointer en plusieurs endroits des formations fluviales limoneuses à dépôts organiques (débris végétaux, passages organiques) attribuables au Début Glaciaire. L'attribution chronologique est toutefois fragile, avec seulement deux sites où elle est étayée par de la palynologie ou la malacologie dans la région de Lille (Deschodt *et al.*, 2008). Elle repose souvent sur une comparaison de faciès et une position morpho-stratigraphique similaire (sous les loess du Pléniglaciaire en bas de versant. La stratigraphie type de Lambersart « les Conquérants » présente un limon alluvial coquillier attribué au Début Glaciaire surmonté par un niveau d'érosion et des dépôts grossiers (présent en fond de vallée et sur versant) puis un apport de loess qui, au cours du Pléniglaciaire weichselien, modifie le statut morphologique du lieu d'un fond de vallée à un bas de versant. Ce système sédimentaire est corréléable à d'autres observations proches (Ladrière, 1885, 1886 ; Sommé, 1977 ; Deschodt *et al.*, 2008). Il est possible que des formations du Début Glaciaire weichselien existent en d'autres endroits. Toutefois, nous nous heurtons au problème de leur reconnaissance et de leur différenciation des dépôts pléniglaciaires.

5) Les dépôts du Pléniglaciaire inférieur et moyen weichselien

Les dépôts du Pléniglaciaire inférieur et moyen weichselien sont mal documentés. En l'absence de datations systématiques, il est délicat d'attribuer les dépôts rencontrés dans le bas pays sous les formations du Pléniglaciaire supérieur. Des indices indirects suggèrent une forte activité fluviale pendant le Pléniglaciaire inférieur. Quelques formations limoneuses enfouies dans les plaines sont attribuées, sans certitude, au Pléniglaciaire moyen. Rares dans la vallée de la Deûle, ces formations liées à des écoulements de plus faible énergie semblent être fréquentes et étendues dans les plaines de la Lys et de la Scarpe. Leur toit se situe à plusieurs mètres de profondeur sous les dépôts du Pléniglaciaire supérieur. Toute lacunaire qu'elle soit, la reconstitution de l'évolution pléniglaciaire inférieur et moyen du bas pays est corréléable avec les vallées des plaines des bassins voisins, au Royaume-Uni, en Belgique, aux Pays-Bas et en Allemagne du Nord (Deschodt 2014).

III. — LES DÉPÔTS DU PLÉNIGLACIAIRE SUPÉRIEUR WEICHSELIEN

1) Un système morpho-sédimentaire propre au haut et bas pays

L'enregistrement pléniglaciaire du haut pays ne diffère guère de celui du reste du Bassin parisien : il est principalement représenté par une nappe de matériaux grossiers, en contact avec le *bed rock* et scellée par les dépôts fluviaux ultérieurs. Par contre, l'enregistrement du bas pays est plus diversifié et riche d'enseignements. Il est continu, souvent à l'affleurement, et couvre de très grandes surfaces sur quelques mètres d'épaisseur. Il est localement épais (de l'ordre de 10 m ou plus) sur les axes de creusements maximums (plaine de la Lys, Deûle aval) (Fig. 5). Les développements suivants concernent le bas pays où l'héritage morpho-sédimentaire de la fin du Pléniglaciaire

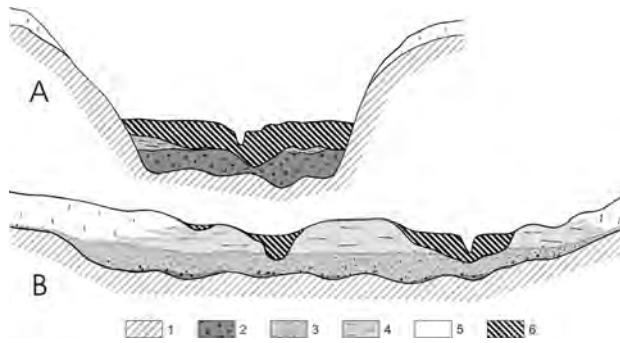


Fig. 5. – Haut et bas pays : deux systèmes morpho-stratigraphiques - croquis théoriques. A – haut pays (quelques centaines de mètres de large) ; B – bas pays (plusieurs kilomètres de large). Légendes : 1 – substrat antérieur au Pléniglaciaire ; 2 – graviers ; 3 – litages sableux ou sablo-limoneux ; 4 – limon en fond de vallée ; 5 – formations de versant ; 6 – alluvions postérieures au Pléniglaciaire.

Fig. 5. – High and low country: two morphostratigraphic systems - theoretical sketches. A – high country (few hundreds of metres wide) ; B – low country (several kilometres wide). Captions : 1 – substrate anterior to the Pleniglacial ; 2 – gravels ; 3 – sandy or silty sandy beds ; 4 – valley bottom silt ; 5 – slope formations ; 6 – post-Pleniglacial alluvia.

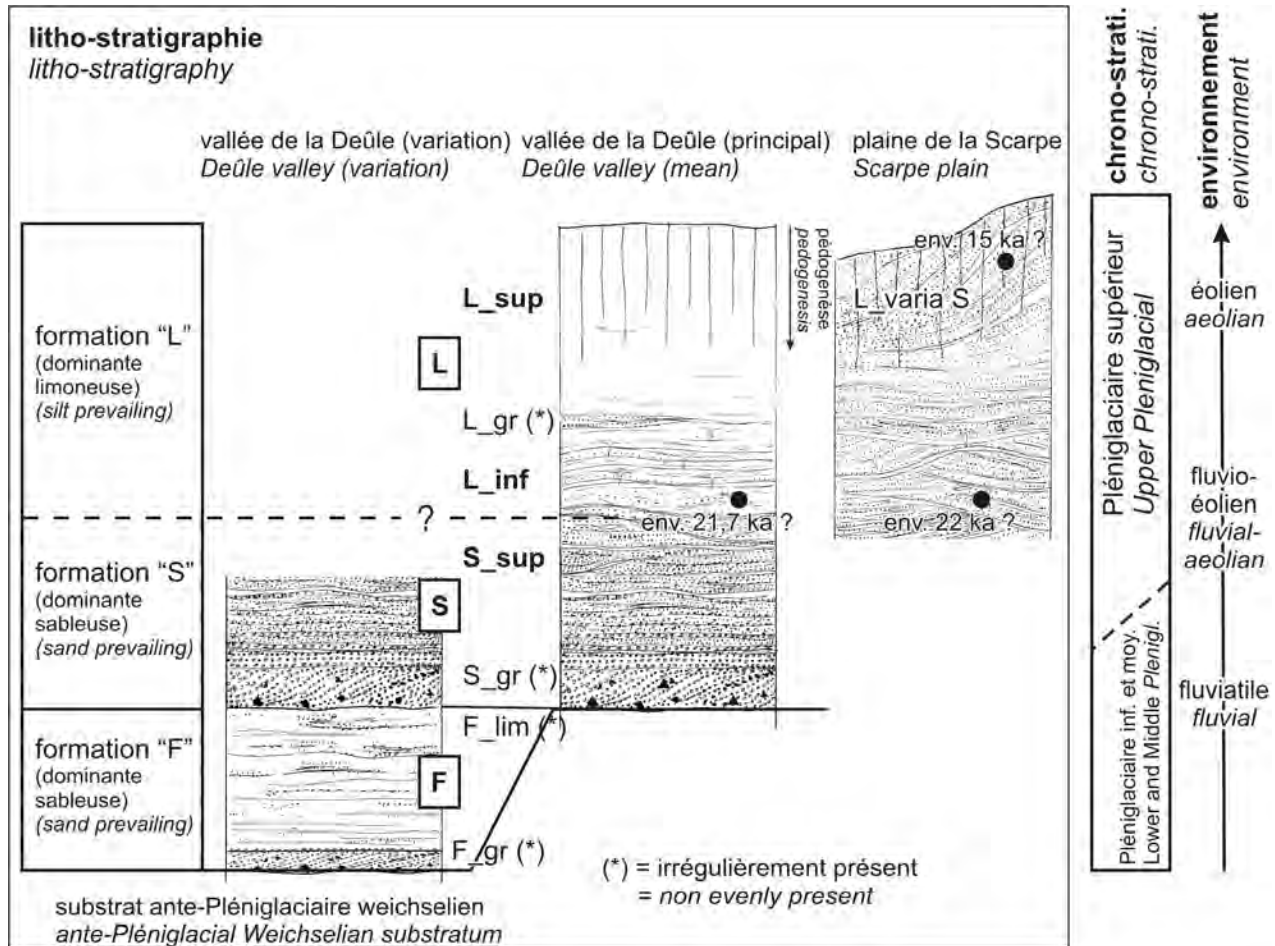


Fig. 6. – Proposition d'une lithostratigraphie des formations du Pléniglaciaire weichselien en fond de vallée du bas pays. Légendes : L sup – limon loessique typique ou limon loessique légèrement sablonneux, présence éventuelle de quelques lits sableux ou d'éléments grossiers, en continuité avec la couverture loessique de versant ; L varia S – sable éolien avec lits loessiques (plaine de la Scarpe) ; L gr – lits sableux épisodiques, retour de caractères grossiers contrastant avec L inf et surtout L sup ; L inf – limon lité avec lits sableux, en général transition diffuse avec la formation sous-jacente ; S sup – sable lité et sable avec lits de limon ; S gr – lits de sable et d'éléments grossiers (éventuellement absents ou graviers sur une surface érosive) ; F lim – limon-sableux lité, plus fin que Ssup, irrégulièrement présent ; F gr – id. S gr, irrégulièrement présent (ou confondu avec S gr ?).

Fig. 6. – A proposed lithostratigraphy of the Weichselian Pleniglacial formations in the valley bottoms of the low country. Captions : L sup – typical loessic silt or lightly sandy loessic silt, possible sandy beds or coarse elements, in continuity with slope loess cover ; L varia S – aeolian sand with loessic beds (Scarp plain) ; L gr – occasional sandy beds, coarse texture contrasting with L inf and especially L sup ; L inf – bedded silt with sandy beds, usually diffuse transition with underlying formation ; S sup – bedded sand with silt beds ; S gr – sandy and coarse elements beds (possibly absent or only gravels upon erosive limit) ; F lim – bedded sandy-loam, finer than Ssup, non evenly present ; F gr – id. S gr, non evenly present (or merged with S gr ?).

weichselien est prépondérant et justifie la subdivision stratigraphique proposée pour le Quaternaire des fonds de vallée de la région. Une synthèse chronostratigraphique pour le Pléniglaciaire supérieur est proposée sur la figure 6.

2) Des plaines balayées par les eaux

a) Lithostratigraphie

En tous points des plaines du bas pays nous observons des formations fluviatiles litées majoritairement sableuses (Fig. 6, unité « S »). Cette unité repose fréquemment sur le substrat antérieur au Quaternaire. L'unité « S » rencontrée en fond de vallée peut être considérée comme l'équivalent stratigraphique de tout ou partie des formations graveleuses des fonds de vallée du bassin parisien. L'unité « S » est associée à une érosion sur versant et au développement de glacis (*cryopediments*) sur les bas de versant sableux à faible pente. Une activité fluviatile importante, extensive, a affecté l'ensemble du fond de vallée jusqu'aux extrémités amont des bassins et les versants pendant une première partie du Pléniglaciaire supérieur. Le développement de la formation « S » sur substrat sableux drainant dans les parties amont des bassins implique la présence d'un pergélisol (Kasse, 1997 ; Bogaart *et al.*, 2003). Des incisions remarquables dans les parties aval des bassins peuvent être associées à cette phase de forts écoulements : axe de drainage central de la plaine de la Lys et, dans la vallée de la Deûle, incision de la craie à partir de Lille (ou, à minima, un déblaiement d'une incision préexistante).

Les styles fluviatiles correspondants ne sont pas clairement identifiés. Des écoulements en tresses ont pu se développer quand les apports en éléments grossiers étaient abondants (zones de *bed rock* crayeux dans la vallée de la Deûle, nappes de graviers de silex dans la vallée de l'Escaut). Cependant, les paramètres de lithologie (texture fine majoritaire ou exclusive) et de pente longitudinale (faible) ont vraisemblablement permis le développement de lits méandriiformes. Des traces de méandres sont conservées en nombre dans la plaine de la Scarpe sans être encore datées (Fig. 7). Des processus éoliens locaux ont déjà pu intervenir dans ce contexte.

b) Datations

La formation « S » a été datée à plusieurs reprises dans la plaine de la Scarpe, entre environ -28 et -22 ka (dates OSL et radiocarbone) (Deschodt *et al.*, 2012). Le sommet de la formation sableuse de Lille « rue Hegel » a été daté d'environ 21,6 ka Cal BP (Deschodt, 2012). Ces datations sont cohérentes avec la position stratigraphique sous la formation « L » corrélée à la couverture loessique de versant. La nécessité de la présence d'un pergélisol conforte l'attribution chronologique. Les dates évoquées sont compatibles avec la chronologie des occurrences d'un pergélisol continu lors du dernier maximum de froid (Van Vliet et Langohr, 1981 ; Van Vliet-Lanoë, 1989 ; Vandenberghe, 1992, 1993 ; Huijzer & Vandenberghe, 1998 ; Bertran *et al.*, 2013).

c) Comparaisons

Les faciès, la stratigraphie et les hypothèses émises trouvent d'évidentes comparaisons avec les vastes dépôts fluviaux et fluvio-éoliens des plaines du nord-ouest de l'Europe (Kasse, 2002), que ce soit aux Pays-Bas (Vandenberghe, 1985 ; Schwan, 1986 ; Van Huissteden *et al.*, 1986 ; Van Huissteden & Vandenberghe, 1988 ; Huisink, 2000 ; Van Huissteden *et al.*, 2000 ; Van Huissteden & Kasse, 2001 ; Schokker & Koster, 2004 ; Kasse *et al.*, 2007 ; Busschers *et al.*, 2007) ou en Allemagne (Mol, 1997 ; Kasse *et al.*, 2003). Les premiers dépôts du Pléniglaciaire supérieur dans le bas pays sont corrélables à l'*Older Coversand I* du nord de l'Europe. Les dépôts y sont sableux, fluviatiles, avec une tendance au fluvio-éolien dans la partie supérieure. La mise en place de l'*OCI* est datée dans la localité type de Twente (à l'est des Pays-Bas) entre $25,2 \pm 1,9$ et $19,9 \pm 1,6$ ka par une longue série de dates OSL (Vandenberghe *et al.*, 2013). La même unité est datée aux environs de 25-17 ka à Grubbenvorst (au sud des Pays-Bas) (Kasse *et al.*, 2007).

3) Des plaines balayées par le vent

a) Lithostratigraphie

La formation essentiellement sableuse « S », associée à une activité fluviatile, passe en presque tout point des plaines à une formation limoneuse « L », de texture loessique, ou parfois (« L varia ») (Fig. 6). Un faciès transitoire est fréquemment observé entre les deux formations (texture intermédiaire litée). L'apport loessique et la faiblesse des écoulements ont entraîné un exhaussement des fonds de vallée. Dans la plus grande partie des bassins versant, les affleurements deviennent majoritairement voire exclusivement limoneux et en continuité stratigraphique avec la couverture loessique sur versant. Le fait souligne la baisse de compétence, l'absence d'incision (au moins dans la partie amont des bassins) et la non-mobilisation du sable pourtant présent à faible profondeur. L'activité fluviatile est donc passée à une activité fluvio-éolienne, voire purement éolienne. Le phénomène a nécessité la rétraction drastique du réseau hydrographique. L'engraissement du versant sous le vent par le loess modifie la morphologie, restreint la largeur du fond de vallée et tend à déplacer la bande active vers l'est.

b) Datations

Les formations limoneuses (unité « L ») ont été datées à plusieurs reprises dans la vallée de la Deûle (Deschodt, 2012, 2014) et dans la plaine de la Scarpe (pour sa variation de faciès sableux, unité « L varia ») dans la plaine de la Scarpe (Deschodt *et al.*, 2012). Leur âge se situerait aux environs de 20 à 17 ka (datations par OSL). Dans la vallée de la Deûle, les datations OSL de Lille « rue Hegel » donnent des résultats plus anciens mais avec une large marge de probabilité qui les rend compatibles avec la date radiocarbone effectuée sur l'unité sableuse « S ». À cet endroit, la comparaison des dates permet d'avancer un passage de l'une à l'autre des formations à environ 21,7 ka (Deschodt, 2012). Le passage de la formation S à L n'est probablement pas isochrone dans le détail en tout point du fond de vallée (Deschodt, 2014). Toutefois, il est probablement très rapide, associé à la dégradation du pergélisol et à un apport

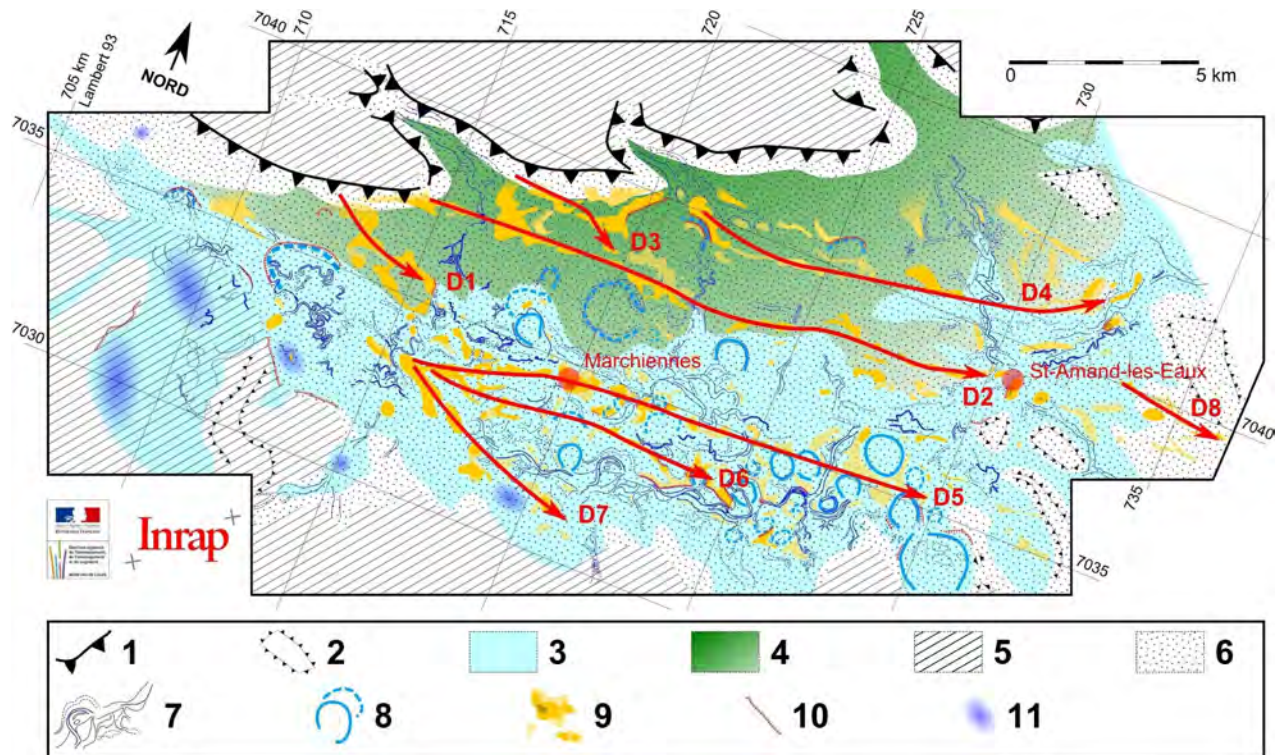


Fig. 7. – Carto-interprétation du MNT LiDAR de la plaine de la Scarpe. Légendes : 1 – talus bordier structural de la Pévèle ; 2 – collines témoins développées dans les sables éocènes ; 3 – basse plaine ; 4 – haute plaine ; 5 – limon en surface (d'après Fourier, 1989) (dépôts organiques holocènes non représentés) ; 6 – limon sableux ou sable en surface (d'après Fourier, 1989) (dépôts organiques holocènes non représentés) ; 7 – traces de chenaux visibles sur le MNT ; 8 – méandre visible sur le MNT ; 9 – éminences sableuses (dunes) ; 10 – petit talus vigoureux visible sur le MNT ; 11 – zones basses fermées ; D1 à 8 – dunes linéaires.

Fig. 7. – Cartographic interpretation of the Scarpe LiDAR DEM. Captions : 1 – Pévèle country talus structural border ; 2 – outlier hills in Eocene sand ; 3 – low plain ; 4 – high plain ; 5 – surface silt deposit (according to Fourier, 1989) (Holocene organic deposits are not displayed) ; 6 – Sandy silty or sand on surface (according to Fourier, 1989) (Holocene organic deposits are not displayed) ; 7 – channel marks visible on DEM ; 8 – meander marks visible on DEM ; 9 – sandy high points (dunes) ; 10 – small steep scarp visible on DEM ; 11 – closed depressions ; D1 to 8 – linear dunes.

loessique abondant. L'unité « L » se développe en continuité avec les loess sur versant, confortant par corrélation longue distance une datation aux environs de 22 ka (Haesaerts, 1985 ; Van den Haute *et al.*, 1998 ; Antoine *et al.*, 2002a ; Frechen *et al.*, 2003 ; Koster, 2005).

c) Comparaisons

L'évolution d'un système fluvial extensif vers un système dominé par l'éolien, trouve des correspondances évidentes avec les plaines qui s'ouvrent sur la mer du Nord. Toutefois, si la formation « S » est corrélable avec l'« Older Coversand 1 » (*cf. supra*), nous constatons dans le nord de la France l'absence du « *Beuningen gravel bed* » (érosion de déflation et repère majeur de la zone sableuse).

d) Un modèle morpho-sédimentaire des vallées loessiques du bas pays

La persistance d'écoulements (pic de crue), la largeur des fonds de vallées et le dépôt massif de loess concourent au développement de faciès sédimentaire, d'une morphologie et

d'un fonctionnement fluvial original. Nous proposons un modèle morpho-sédimentaire pour les vallées loessiques (Fig. 8), en distinguant trois sections de l'amont vers l'aval. Elles sont caractérisées respectivement par du ruissellement diffus, une morphologie fluviale liée à un « transit » sédimentaire dans une étroite bande active, et, plus en aval, une morphologie fluviale affirmée encaissée dans une plaine en remblaiement par les dépôts fluvio-éoliens (modèle rencontré dans la plaine de la Lys et dans la vallée de la Deûle en aval de Lille).

e) Le phénomène dunaire

Le faciès éolien loessique est majoritaire mais non exclusif. Quand les eaux ont charrié et déposé du sable en quantité suffisante, de petites dunes ont pu se développer. Les sables dunaires sont interstratifiés avec des lits de loess. Elles se situent systématiquement à l'est (sous le vent) des épandages fluviaux. Une dune a été ainsi observée sur l'interfluve entre Deûle et Scarpe (Deschodt, 2014). Le modèle dunaire est généralisé à une large partie orientale de la plaine de la Scarpe où des trains de dunes linéaires sont révélés sur un levé LiDAR (Fig. 7). Certaines ont été observées et datées sur le terrain (Deschodt *et*

al., 2012). Il est difficile à détecter en raison d'un dénivelé faible (maximum de l'ordre de 3 mètres), d'une extension parfois restreinte ou d'un éventuel dépôt loessique final susceptible de masquer la texture associée à la forme. Des modelés éoliens contemporains de plus grande ampleur existent un peu plus au nord (Verbruggen & Kiden, 1989 ; Vandenberghe, 1983 ; Kasse, 2002).

f) Un héritage morpho-sédimentaire prépondérant

L'activité fluvio-éolienne de la fin du Pléniglaciaire a laissé une couverture continue et une empreinte morphologique dans le bas pays. Le dernier état des chenaux du Pléniglaciaire supérieur constitue fréquemment le lit majeur des cours d'eau ultérieurs et contraint le tracé des écoulements du Tardiglaciaire et de l'Holocène. Les rives des anciens chenaux pléniglaciaires peuvent localement rester inscrites dans la topographie. Des dépôts éoliens ou fluvio-éoliens ont pu créer une morphologie confuse avec un mauvais drainage naturel. Sous le climat plus tempéré et humide du Tardiglaciaire et de l'Holocène, ces zones deviennent aisément humides ou marécageuses. L'héritage morpho-stratigraphique de la fin du Pléniglaciaire constitue un facteur prépondérant de la structuration des larges plaines du bas pays. Sa prise en compte est essentielle pour comprendre les évolutions ultérieures (contrainte sur le réseau hydrographique, logique de développement des zones humides...) ou leur peuplement (axes de circulation, noyaux de peuplement, ressources...).

IV – LES DÉPÔTS POSTÉRIEURS AU PLÉNIGLACIAIRE SUPÉRIEUR WEICHSELIEN

1) Le Tardiglaciaire

a) Deux stratotypes régionaux complémentaires : Houplin-Ancoisne et Dourges

Les enregistrements les mieux documentés pour le Tardiglaciaire sont ceux d'Houplin-Ancoisne « Station d'épuration » (Deschodt *et al.*, 2004) et du « Marais de Dourges » (Dourges « Delta 3 », sur la commune d'Hénin-Beaumont) (Deschodt *et al.*, 2005 ; Deschodt, soumis), proposés comme stratotypes régionaux (Deschodt, 2014). Le premier concerne un remplissage de chenal et le second une zone lacustre et palustre alimentée soit par la nappe, soit par des crues. Ils peuvent être comparés à une quinzaine de sites attestés ou présumés du Tardiglaciaire, bénéficiant, au total, d'une trentaine de dates radiocarbone (Deschodt, 2014). L'évolution du Tardiglaciaire est comparable aux régions voisines, avec cependant quelques particularités.

b) Système lacustre, palustre et variation des niveaux d'humidité

L'enregistrement du Bølling et de l'Allerød est le plus détaillé dans les dépressions fermées de fond de vallée. La présence d'un système palustre et lacustre rapproche indéniablement le système morpho-sédimentaire du bas pays de celui des plaines de Belgique et des Pays-Bas (Crombé *et al.*, 2013 ; Hoek *et al.*, 1999 ; Denys *et al.*, 1990 ; Bos *et al.*, 2006 ; Heiri *et al.*, 2007). Entre Dourges et les lacs septentrionaux, nous constatons

cependant des divergences du niveau hydrologique au cours du Tardiglaciaire. Le fait, ainsi que le recensement d'épisodes d'apports détritiques, participe à une réflexion sur les variations des précipitations et leur saisonnalité au cours du Tardiglaciaire (Deschodt, 2014).

c) Détail de l'évolution paléoenvironnementale au Dryas récent

L'amorce d'un réseau de coins de glace à Dourges précède la limite sud du pergélisol discontinu au début du Dryas récent. Comme dans le Bassin parisien, le bilan Dryas récent dans le système fluvial est au remblaiement des chenaux. Toutefois, contrairement au Bassin parisien où nombre de fonds de vallée sont envahis par une boue crayeuse (Antoine *et al.*, 2000b, 2012 ; Pastre *et al.*, 2002), les dépôts restent confinés au lit mineur. Cette géométrie, ainsi que leur composition essentiellement sableuse avec des lits organiques rapprochent encore une fois le bas pays des plaines plus septentrionales belges (Munaut & Paulissen, 1973). La raison est probablement l'absence de versant en forte pente avec de la craie à l'affleurement.

L'ensemble des données sur le Dryas récent dans la zone d'étude permet de reconstituer l'évolution paléo-climatique suivante (Deschodt, 2014) :

– vers environ 11,03 ka BP, quelques décennies d'un froid sec, formation d'un mince sol humifère (prairie ?) ;

– épisode froid intense, solifluxion et amorce d'un pergélisol discontinu ;

– épisode humide, fonte du pergélisol, érosion fluviale intense sur versant, création de ravines, forts écoulements dans le réseau fluvial ;

– entre environ 10,7 ka BP et 10,4 ka BP, écoulements très réguliers enregistrés dans le réseau fluvial (fonte printanière d'une couverture neigeuse ?) et tendance au remblaiement des chenaux, éventuellement développement tourbeux ;

— après 10,4 ka BP jusqu'à l'Holocène peu d'informations : probable arrêt des écoulements dans les réseaux amont, contexte froid et sec.

2) L'Holocène

a) Une difficulté de synthèse propre à l'Holocène

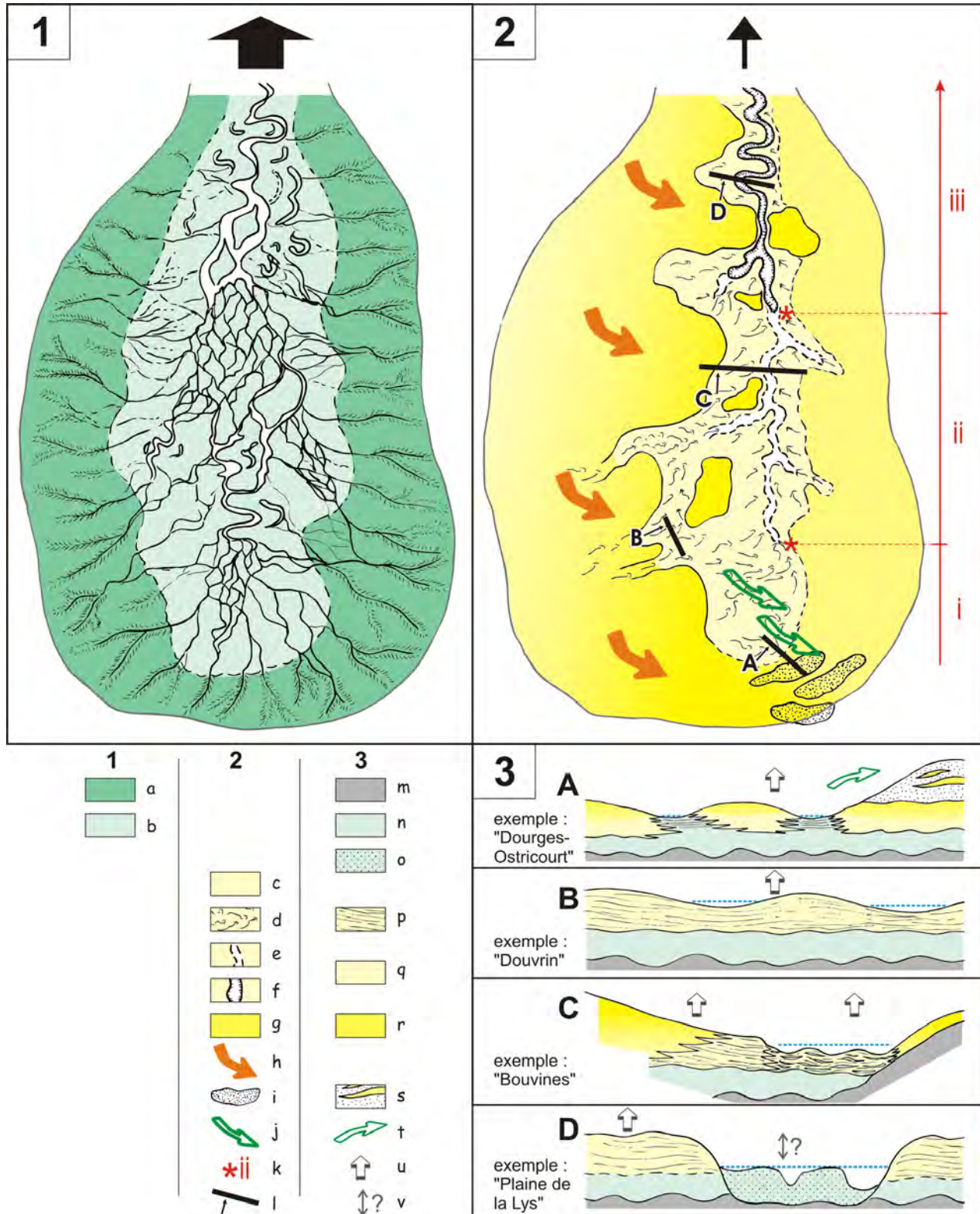
Les données sur l'Holocène sont multiples, mais fragmentaires. Le caractère partiel des observations, la complexité de l'objet même (diversité des dépôts, une commande climatique moins nette que pour le Pléistocène, croisée à une influence anthropique croissante depuis le Néolithique) et la nécessité de résolution chronostratigraphique plus précise pour la période compliquent, voire limitent, les synthèses.

b) Une évolution majeure à la fin de l'Atlantique - début du Subboréal

D'après les enregistrements en fond de vallée, l'Holocène peut être subdivisé en deux grandes périodes. La première partie, jusqu'à environ la fin de l'Atlantique, est caractérisée

par un système tourbeux, voire travertineux, en aggradation, avec une tendance à l'envahissement des fonds de vallées. À la fin de l'Atlantique ou au début du Subboréal, un nouveau système chenalisé se met en place probablement sous une commande à dominante climatique (plus humide) renforcée par l'anthropisation du milieu (néolithisation) (Boulen *et al.*, 2014). La fin de l'Atlantique reste marquée, dans tous les hydrosystèmes

européens des moyennes latitudes, par une métamorphose du système ou des apports détritiques et marque une bipartition majeure de l'Holocène (Notebaert & Verstraeten, 2010). À Valenciennes « le Vignoble », la croissance de la tourbe (déjà fortement ralentie) s'arrête après environ 5,4 ka BP (soit env. 6,2 ka Cal BP). À Rouvignies-Haulchin, la tourbière ne se développe plus depuis environ 7 ka BP (env. 7,8 ka Cal BP) et le nouveau



chenal de l'Escaut est déjà actif vers 4 ka BP (env. 4,6 ka Cal BP). Dans l'hypothèse où la fin du système tourbeux du Vignoble précéderait de peu l'incision, celle-ci se produirait peut-être vers 5,5 ka BP (environ 6,3 ka Cal BP ou 4 300 av. J.-C.).

c) Plusieurs phases érosives intra-holocènes ?

Une série d'indices (Deschodt, 2014) permet d'envisager une période de forte activité fluviale aux environs de 3 ka BP (environ 3,2 Cal BP). Sous réserve d'investigations supplémentaires et d'une meilleure résolution chronologique, tout ou partie des indices pourrait être rapproché de la dégradation climatique bien mise en évidence vers 2,7 ka BP (Van Geel *et al.*, 1996 ; Van Geel & Magny, 2002). D'autres indices permettent d'envisager une période de forte activité pendant l'Antiquité. Elle avait déjà été perçue à Lille (Deschodt *et al.*, 2006). Nous avons alors conclu à un phénomène local. Nos observations s'ajoutaient à celle de Ladrière dans la région de Bavay (Ladrière, 1881). Avec, de plus, les transects de Famars, de Rouvignies-Haulchin (Deschodt, 2014) et de Saint-Saulve (Neaud & Deschodt, 2015), nous devons admettre le caractère régional d'une crise hydrologique qui a entraîné le charriage d'une nappe grossière dans le fond des lits mineurs. Le phénomène, qui répond probablement à un forçage climatique, interviendrait vers le 2e-3e siècle apr. J.-C. Une partie des dépôts travertineux lacustres holocènes rencontrés dans la région (Sommé, 2006) pourrait être associée à cette phase (notamment dans le bassin de la Sensée-Satis).

d) Des dépôts d'inondations récents

La plupart des fonds de vallée sont scellés par des dépôts d'inondations limoneux ou limono-argileux. Leur présence est systématique dans le haut pays où leur épaisseur varie de quelques décimètres à plusieurs mètres. L'arrivée de ces limons d'inondations dans les fonds de vallées marque une rupture dans les hydrosystèmes avec les périodes antérieures. L'exemple de Valenciennes « Le Vignoble » (Boulen *et al.*, 2014) semble indiquer que l'érosion de versant ne s'est manifestée que

relativement tard dans la zone d'étude, probablement en lien avec un changement de l'utilisation des sols au Moyen Âge. Cette interprétation est partagée pour le Royaume-Uni (Lewin *et al.*, 2005). Dans la zone d'étude, les inondations ont pu être aggravées par d'éventuelles fluctuations climatiques (dégradation climatique du « Petit Âge Glaciaire » ? avec éventuellement des précipitations hivernales plus abondantes) (Antoine *et al.*, 2002b ; Nesje & Dahl, 2003) ou par le tassement de la tourbe dans le fond de vallée de l'Escaut (ex. de Prouvy) (Deschodt, 2014). La création de biefs et moulins a aussi pu jouer un rôle important dans le stockage du limon en fond de vallée (Lespez *et al.*, 2005, 2006 ; Barraud & Ménanteau, 2009).

V. — CONCLUSION

Le bas pays appartient aux vastes plaines du Nord de l'Europe. Toutefois, il s'en distingue par son appartenance à la zone loessique et par l'absence de grands cours d'eau. Les possibilités d'enregistrements s'en trouvent renforcées, avec parfois des dépôts exceptionnels telle la formation fluviale eemienne de Waziers. Les enregistrements quaternaires antérieurs au Weichselien sont encore sous-exploités (qu'ils se trouvent en faible profondeur ou enfouis dans la vallée flamande). La géométrie et le comblement de la vallée flamande indiquent une morphogenèse récente vraisemblablement liée à un changement paléogéographique à la fin du Saalien dans le sud du bassin de la Mer du Nord. A la fin du dernier Glaciaire, l'activité fluviale extensive érosive est suivie d'une rétraction du réseau vers - 22 000 ans et d'un envahissement éolien massif des fonds de vallée du bas pays. Cet épisode est déterminant dans la configuration ultérieure du réseau hydrographique. L'évolution paléoclimatique du Tardiglaciaire et de l'Holocène peut être perçue à travers des enregistrements variés, en chenal et dans les zones humides.

Remerciements. — L'auteur exprime sa gratitude à la SGN pour l'invitation qui lui a été faite, à P. Auguste et J. Sommé pour leur relecture attentive, à ses collègues de l'INRAP et à l'INRAP qui a permis de finaliser cette synthèse.

Fig. 8. — Schéma de l'évolution d'un bassin versant de faibles dimensions dans la zone de loess à la fin du Pléniglaciaire supérieur weichselien, relations entre écoulements, faciès et morphologie. Légendes : **1 – Pléniglaciaire supérieur, forte activité hydrologique** : a – versant, érosion, b – fond de vallée, alluvions sablo-graveleuses à sablo-limoneuses ; **2 – Pléniglaciaire supérieur, baisse de l'activité hydrologique et envahissement loessique** : c – dépôt loessique en fond de vallée, d – ruissellement, e – bande active faiblement encaissée, f – bande active fortement encaissée, g – loess sur versant, h – apport de loess et progradation du versant, i – dune, j – déflation locale, k – franchissement de seuil dans les paramètres hydrologiques et distinction de 3 sections : (i) section amont, ruissellement dominant chenaux peu marqués ou temporaires, (ii) section intermédiaire, transit sédimentaire en chenaux peu profonds, (iii) section aval, morphologie fluviale marquée avec lit encaissé, l – localisation des transects (3) ; **3 – Transects schématiques en différents secteurs de la carte (2)** : m – substrat antérieur au Pléniglaciaire supérieur, n – sables lités, o – nappe alluviale sableuse grossière, fin du Pléniglaciaire supérieur, p – limon loessique lité, q – limon loessique, r – loess typique, s – dune avec interstratification de loess, t – apport local de sable, u – bilan sédimentaire nettement positif et exhaussement du fond de vallée, v – bilan sédimentaire inconnu.

Fig. 8. — *Small scale catchment basin evolution in the loess belt ; relationships between flows, facies and morphology. Captions : 1 – Upper Pleniglacial, high hydrologic activity: a – slope, erosion, b – valley bottom, gravelly sand to silty sand alluvia; 2 – Late Upper Pleniglacial, decrease in hydrologic activity and loess overrun: c – valley bottom loessic deposit, d – water run off, e – shallow active belt, f – active belt, steep banks, g – loess on slope, h – loess input and slope progradation, i – dune, j – local deflation, k – hydrologic parameter threshold with distinction of three zones: (i) upstream zone, run off, temporary or very shallow channels (ii) intermediate zone, sediment transit in shallow channels, (iii) downstream zone, well defined fluvial morphology and steep banks, l – location of cross-sections (3); 3 – schematic cross-sections in different reaches of map (2): m – substrate anterior to the Upper Pleniglacial substratum, n – bedded sands, o – coarse sandy alluvial sheet, Late Upper Pleniglacial, p – bedded loessic silt, q – loessic silt, r – typical loess, s – loess interstratified dune, t – local sand input, u – distinctly positive sediment budget and raising of the valley floor, v – unknown sediment budget.*

BIBLIOGRAPHIE

- ANTOINE P., DESCHODT L., GAUTHIER A., HULLIN G. & VIRMOUX C. (2013). — Waziers « Bas-Terroir » 2013. *Reconnaissance géophysique et tarière mécanique*. Rapport de fouille programmée, INRAP, UMR8591 du CNRS.
- ANTOINE P., FAGNART J.-P., AUGUSTE P., COUDRET P., LIMONDIN-LOZOUËT N., PONEL P., MUNAUT A.-V., DEFGNEE A., GAUTHIER A. & FRITZ C. (2012). — Conty, vallée de la Selle (Somme, France) : séquence tardiglaciaire de référence et occupations préhistoriques. *Quaternaire hors série*, **5** : 170 p.
- ANTOINE P., FAGNART J.-P., LIMONDIN-LOZOUËT N. & MUNAUT A.V. (2000a) [Antoine *et al.*, 2000a]. — Le Tardiglaciaire du bassin de la Somme : éléments de synthèse et nouvelles données. *Quaternaire*, **11** (2) : 85–98.
- ANTOINE P., LAUTRIDOU J.P. & LAURENT M. (2000b) [Antoine *et al.*, 2000b]. — Long-term fluvial archives in NW France: response of the Seine and Somme rivers to tectonic movements, climatic variations and sea-level changes. *Geomorphology*, **33** (3-4) : 183–207.
- ANTOINE P., LAUTRIDOU J.-P., SOMME J., AUGUSTE P., AUFFRET J.-P., BAIZE S., CLET-PELLERIN M., COUTARD J.-P., DEWOLF Y., DUGUE O., JOLY F., LAIGNEL B., LAURENT M., LAVOLLE M., LEBRET P., LECOLLE F., LEFEBVRE D., LIMONDIN-LOZOUËT N., MUNAUT A.V., OZOUF J.C., QUESNEL F. & ROUSSEAU D.D. (1998). — Les formations quaternaires de la France du Nord-Ouest : Limites et corrélations. *Quaternaire*, **9** (3) : 227–241.
- ANTOINE P., MUNAUT A.-V., LIMONDIN-LOZOUËT N., PONEL P. & FAGNART J.-P. (2002) [Antoine *et al.*, 2002b]. — Réponse des milieux de fond de vallée aux variations climatiques (Tardiglaciaire et début Holocène) d'après les données du bassin de la Selle (Nord de la France). Processus et bilans sédimentaires. In : BRAVARD J.P. & MAGNY M. (ed.), *Histoire des rivières et des lacs de Lascaux à nos jours*. Errance, 15–27.
- ANTOINE P., MUNAUT A.-V. & SOMME J. (1994). — Réponse des environnements aux climats du Début Glaciaire weichselien : données de la France du Nord-Ouest. *Quaternaire*, **5** (3-4) : 151–156.
- ANTOINE P., ROUSSEAU D.D., HATTE C., ZÖLLER L., LANG A., FONTUGNE M. & MOINE O. (2002a) [Antoine *et al.*, 2002a]. — Événements éoliens rapides dans les Loess du Pléniglaciaire supérieur Weichselien : l'exemple de la séquence de Nussloch (vallée du Rhin-Allemagne). *Quaternaire*, **13** (3) : 199–208
- BALESCU S. (1986). — La minéralogie des loess du nord de la France, et la position stratigraphique des paléosols intraloessiques. In TUFFREAU A. & SOMMÉ J. (dir.), *Chronostratigraphie et faciès culturels au Paléolithique inférieur et moyen dans l'Europe du Nord-Ouest*, Actes colloque international Lille (4-6 septembre 1984), 22^e Congrès Préhistorique de France, *Supplément au Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, **26** : 165–170.
- BARRAUD R. & MENANTEAU F. (2009). — Émergence du paradigme de la gestion physique des cours d'eau et héritages paysagers. *Revue du Nord*, hors série, **14** : 189–203.
- BERTRAN P., ANDRIEUX E., ANTOINE P., COUTARD S., DESCHODT L., GARDERE P., HERNANDEZ M., LEGENTIL C., LENOBLE A., LIARD M., MERCIER N., MOINE O., SITZIA L. & VAN VLIET-LANOË B. (2013). — Distribution and chronology of Pleistocene permafrost features in France: Database and first results. *Boreas*, **43** (3) : 699–711.
- BOGAART P.W., BALEN R.T.V., KASSE C. & VANDENBERGHE J. (2003). — Process-based modelling of fluvial system response to rapid climate change II. Application to the River Maas (The Netherlands) during the Last Glacial–Interglacial Transition. *Quaternary Science Reviews*, **22** (20) : 2097–2110.
- BOS J.A., BOHNCKE S.J. & JANSSEN C.R. (2006). — Lake-level fluctuations and small-scale vegetation patterns during the late glacial in The Netherlands. *Journal of Paleolimnology*, **35** (2) : 211–238.
- BOULEN M., DESCHODT L. & HENTON A. (2014). — Valenciennes « Le Vignoble » (vallée de l'Escaut, Nord de la France) : évolution morpho-sédimentaire et mise en évidence de plusieurs phases humides atlantiques. *Quaternaire*, **25** (4) : 369–389.
- BUSSCHERS F.S., KASSE C., VAN BALEN R.T., VANDENBERGHE J., COHEN K.M., WEERTS H.J.T., WALLINGA J., JOHNS C., CLEVERINGA P. & BUNNIK F.P.M. (2007). — Late Pleistocene evolution of the Rhine-Meuse system in the southern North Sea basin: imprints of climate change, sea-level oscillation and glacio-isostasy. *Quaternary Science Reviews*, **26** (25-28) : 3216–3248.
- CHAUSSE C., LHOMME V., CONNET N., BAHAIN J.-J., VOINCHET P. & LIMONDIN-LOZOUËT N. (2004). — Middle and upper Pleistocene evolution of the river Yonne valley (France). First result. *Quaternaire*, **15** (1) : 53–64.
- COHEN K.M. & GIBBARD P. (2011). — *Global chronostratigraphical correlation table for the last 2.7 million years*. Subcommission on Quaternary Stratigraphy (International Commission on Stratigraphy). World Wide Web address: <http://quaternary.stratigraphy.org/charts/>. Consulté le 21 avril 2015
- CROMBE P., DE SMEDT P., DAVIES N.S., GELORINI V., ZWERTVAEGHER A., LANGOHR R., VAN DAMME D., DEMIDDELE H., VAN STRYDONCK M. & ANTROP M. (2013). — Hunter-gatherer responses to the changing environment of the Moervaart palaeolake (Nw Belgium) during the Late Glacial and Early Holocene. *Quaternary International*, **308** : 162–177.
- DE MOOR G. & HEYSE I. (1978). — De morfologische evolutie van de Vlaamse Vallei. *Aardrijkskunde*, **4** : 343–375.
- DENYS L., VERBRUGGEN C. & KIDEN P. (1990). — Palaeolimnological aspects of a Late-Glacial shallow lake in Sandy Flanders. *Hydrobiologia*, **214** : 273–278.
- DESCHODT L. (1999). — Ébauche d'une cartographie au 1/10 000 des formations superficielles de Lille. *Cahiers de Préhistoire du Nord*, **21-22** : 208 p.
- DESCHODT L. (2012). — Sédimentologie et datation des dépôts fluvio-éoliens du Pléniglaciaire weichselien à Lille (Vallée de la Deûle, bassin de l'Escaut, France). *Quaternaire*, **23** (1) : 117–127.
- DESCHODT L. (2014). — *Chronostratigraphie et paléoenvironnements des fonds de vallée du bassin français de l'Escaut*. Thèse de géographie physique, Université de Paris 1 (3 octobre 2014) : 632 p. (inédit). World Wide Web address : https://www.researchgate.net/publication/268967517_Chronostratigraphie_et_paleoenvironnements_des_fonds_de_valle_du_bassin_franais_de_l%27Escaut. Mis en ligne le 3 mars 2015
- DESCHODT L. (soumis). — Raffinement de la chronostratigraphie et des interprétations paléoenvironnementales de l'enregistrement tardiglaciaire du marais de Dourges. *Quaternaire*.
- DESCHODT L., BOULEN M., CERCY C. & DESSAUX N. (2006). — Nouvelles données archéologiques sur la Deûle lilloise: d'une crise érosive du IIe s. ap. J.-C. à l'urbanisation du lit mineur. *Revue du Nord*, **5** : 8–31.
- DESCHODT L., LIMONDIN-LOZOUËT N., MUNAUT A.-V. & BOULEN M. (2008). — Lambersart « Les Conquérants » (vallée de la Deûle, Nord de la France) : une transition versant-fond de vallée au Début Glaciaire et Pléniglaciaire weichselien. *Quaternaire*, **19** (4) : 309–333.

- DESCHODT L., LIMONDIN-LOZOUET N., TEHEUX E., LANTOINE J. & AUGUSTE P. (2005). — L'enregistrement tardiglaciaire de Dourges (Nord de la France, bassin de la Deûle) : évolution d'une zone lacustre et gisements archéologiques associés. *Quaternaire*, **16** (3) : 229–252.
- DESCHODT L., SALVADOR P.-G. & BOULEN M. (2004). — Formations sédimentaires et évolution de la vallée de la Deûle depuis le Pléniglaciaire supérieur à Houplin-Ancoisne (Nord de la France). *Quaternaire*, **15** (3) : 269–284.
- DESCHODT L., SALVADOR P.-G., FERAY P. & SCHWENNINGER J.-L. (2012). — Transect partiel de la plaine de la Scarpe (Bassin de l'Escaut, Nord de la France). Stratigraphie et évolution paléogéographique du Pléniglaciaire supérieur à l'Holocène récent. *Quaternaire*, **23** (1) : 87–116.
- FOURRIER H. (1989). — *La plaine de la Scarpe et ses bordures (Nord de la France). Analyse séquentielle des formations superficielles. Aspects des sols*. Thèse de géographie physique, Université de Lille 1 (26 juin 1989) : 304 p.
- FRECHEN M., OCHES E.A. & KOHFELD K.E. (2003). — Loess in Europe — mass accumulation rates during the Last Glacial Period. *Quaternary Science Reviews*, **22** (18–19) : 1835–1857.
- GELUK M.C., DUIN E.J.T., DUSAR M., RIJKERS R.H.B., VAN DEN BERG M.W. & VAN ROOIJEN P. (1994). — Stratigraphy and tectonics of the Roer Valley Graben. *Geologie en Mijnbouw*, **73** : 129–141.
- GOSSELET J. (1903). — *Esquisse géologique du nord de la France et des contrées voisines. Terrains quaternaires*. Lille, aux archives de la Société géologique du Nord : 343–421.
- HAESAERTS P. (1985). — Les loess du Pléistocène supérieur en Belgique. Comparaisons avec les séquences d'Europe centrale. *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, **22** (2) : 105–115.
- HAESAERTS P. & MESTDAGH H. (2000). — Pedosedimentary evolution of the last interglacial and early glacial sequence in the European loess belt from Belgium to central Russia. *Geologie en Mijnbouw*, **79** (2-3) : 313–324.
- HAESAERTS P., MESTDAGH H. & BOSQUET D. (1999). — The sequence of Remicourt (Hesbaye, Belgium) : new insights on the pedo- and chronostratigraphy of the Rocourt soil. *Geologica Belgica*, **2** (3-4) : 5–27.
- HEIRI O., CREMER H., ENGELS S., HOEK W.Z., PEETERS W. & LOTTER A.F. (2007). — Lateglacial summer temperatures in the Northwest European lowlands: a chironomid record from Hijkermeer, the Netherlands. *Quaternary Science Reviews*, **26** (19-21) : 2420–2437.
- HIJMA M.P., COHEN K.M., ROEBROEKS W., WESTERHOFF W.E. & BUSSCHERS F.S. (2012). — Pleistocene Rhine-Thames landscapes: geological background for hominin occupation of the southern North Sea region. *Journal of Quaternary Science*, **27** (1) : 17–39.
- HOEK W.Z., BOHNCKE S.J.P., GANSSSEN G.M. & MEIJER T. (1999). — Lateglacial environmental changes recorded in calcareous gyttja deposits at Gulickshof, southern Netherlands. *Boreas*, **28** (3) : 416–432.
- HOUTGAST R. & VAN BALEN R. (2000). — Neotectonics of the Roer Valley Rift System, the Netherlands. *Global and Planetary Change*, **27** (1-4) : 131–146.
- HUIJZER B. & VANDENBERGHE J. (1998). — Climatic reconstruction of the Weichselian Pleniglacial in northwestern and Central Europe. *Journal of Quaternary Science*, **13** (5) : 391–417.
- HUISINK M. (2000). — Changing river styles in response to Weichselian climate changes in the Vecht valley, eastern Netherlands. *Sedimentary Geology*, **133** (1-2) : 115–134.
- IMBRIE J., HAYS J.D., MARTINSON D.G., MCINTYRE A., MIX A.C., MORLEY J.J., PISIAS N.G., PRELL W.L. & SHACKLETON N.J. (1984). — The orbital theory of Pleistocene climate: Support from a revised chronology of the marine delta¹⁸O record. In : BEGER A., IMBRIE J., HAYS H. KUKLA G. & SALTZMAN B. (eds.), *Milankovitch and climate: Understanding the response to astronomical forcing*. Reidel Publishing Company, Dordrecht : 269–305.
- KASSE C. (1997). — Cold-Climate Aeolian Sand-Sheet Formation in North-Western Europe (c. 14–12.4 ka): a Response to Permafrost Degradation and Increased Aridity. *Permafrost and Periglacial Processes*, **8** (3) : 295–311.
- KASSE C. (2002). — Sandy Aeolian Deposits and Environments and Their Relation to Climate During the Last Glacial Maximum and Lateglacial in Northwest and Central Europe. *Progress in Physical Geography*, **26** (4) : 507–532.
- KASSE C., VANDENBERGHE D., DE CORTE F. & VAN DEN HAUTE P. (2007). — Late Weichselian fluvio-aeolian sands and coversands of the type locality Grubbenvorst (southern Netherlands): sedimentary environments, climate record and age. *Journal of Quaternary Science*, **22** (7) : 695–708.
- KASSE C., VANDENBERGHE J., VAN HUISSTEDEN J., BOHNCKE S.J.P. & BOS J.A.A. (2003). — Sensitivity of Weichselian fluvial systems to climate change (Nochten mine, eastern Germany). *Quaternary Science Reviews*, **22** (20) : 2141–2156.
- KOSTER E.A. (2005). — Recent advances in luminescence dating of Late Pleistocene (cold-climate) aeolian sand and loess deposits in western Europe. *Permafrost and Periglacial Processes*, **16** (1) : 131–143.
- LADRIÈRE J. (1881). — Les anciennes rivières. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **8** : 1–17.
- LADRIÈRE J. (1883). — Le Terrain quaternaire du fort du Vert-Galant, comparé à celui des régions voisines. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **10** : 86–99.
- LADRIÈRE J. (1885). — Compte-rendu de l'excursion de la Société géologique du Nord aux environs de Lille et considérations sur les terrains quaternaires et récents des vallées de la Lys et de la Deûle. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **12** : 405–423.
- LADRIÈRE J. (1886). — Le Terrain quaternaire de la vallée de la Deûle, à Lille, comparé à celui du Nord de la France. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **13** : 266–287.
- LANGOHR R. & SANDERS J. (1984). — Apport de la pédologie à la reconstitution du Paléoenvironnement en Belgique au Quaternaire. In : CAHEN D., HAESAERTS P. & WATTEYNE (eds), *Peuples chasseurs de la Belgique préhistorique dans leur cadre naturel*. Bruxelles, Patrimoine de l'Institut royal des sciences naturelles de Belgique, 41–52.
- LESPEZ L., CADOR J.-M. & GERMAINE A. (2006). — Gestion de l'eau et trajectoires des paysages des petites vallées, exemples normands. In : Colloque international Interactions Nature Société, La Baule : 1–6.
- LESPEZ L., CLET-PELLERIN M., LIMONDIN-LOZOUET N., PASTRE J.-F. & FONTUGNE M. (2005). — Discontinuités longitudinales des dynamiques sédimentaires holocènes dans les petites vallées de l'Ouest du Bassin Parisien, l'exemple de la Mue (Basse Normandie). *Quaternaire*, **16** (4) : 273–298.
- LEWIN J., MACKLIN M.G. & JOHNSTONE E. (2005). — Interpreting alluvial archives: sedimentological factors in the British Holocene fluvial record. *Quaternary Science Reviews*, **24** (16-17) : 1873–1889.
- LOCHT J.-L., VALLIN L., DESCHODT L., ANTOINE P., HERRISSON D., MASSON B., AUGUSTE P. & LEFEBVRE S. (2014). — *Waziers « Bas-Terroir » 2013. Reconnaissance géophysique et tarière mécanique*. Rapport de fouille programmée, INRAP, UMR8591 du CNRS, Ministère de la Culture, 136 p.

- MEIJS E.P.M. (2002). — Loess stratigraphy in Dutch and Belgian Limburg. *Eiszeitalter und Gegenwart*, **51** : 114-130.
- MEIJS E.P.M., VAN PEER P. & DE WARRIMONT J.P.L.M.N. (2012). — Geomorphologic context and proposed stratigraphic position of lower Palaeolithic artefacts from the Op de Schans pit near Kesselt (Belgium) to the west of Maastricht. *Netherlands Journal of Geosciences - Geologie en Mijnbouw*, **91** (1-2) : 173-157.
- MOL J. (1997). — Fluvial response to Weichselian climate changes in the Niederlausitz (Germany). *Journal of Quaternary Science*, **12** (1) : 43-60.
- MUNAUT A.V. & PAULISSEN E. (1973). — Évolution et paléo-écologie de la vallée de la Petite Nèthe au cours du Post-Würm (Belgique). *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **96** : 301-348.
- NEAUD P. & DESCHODT L. (2015). — *Le lit mineur de l'Escaut. Nord - Pas-de-Calais, Saint-Saulve/Bruay-sur-l'Escaut, RD75*. Rapport de diagnostic archéologique, INRAP, 65 p.
- NESJE A. & DAHL S.O. (2003). — The « Little Ice Age » – only temperature?. *The Holocene*, **13** (1) : 139-145.
- NOTEBAERT B. & VERSTRAETEN G. (2010). — Sensitivity of West and Central European river systems to environmental changes during the Holocene: A review. *Earth-Science Reviews*, **103** (3-4) : 163-182.
- PAEPE R. (1964). — Les dépôts quaternaires de la Plaine de la Lys. *Bulletin de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, **73** (3) : 327-365.
- PAEPE R. (1965). — Évolution morphologique de la Plaine de la Lys et des Monts de Flandre. *Bulletin de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, **74** (2) : 1-18.
- PAEPE R. (1969). — Quelques aspects des dépôts quaternaires de la Famenne. *Bulletin de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, **78** (1) : 69-75.
- PAEPE R. & SOMME J. (1970). — Les loess et la stratigraphie du Pléistocène récent dans le Nord de la France et en Belgique. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **90** (4) : 191-201.
- PAEPE R. & VANHOORNE R. (1967). — The Stratigraphy and Palaeobotany of the Late Pleistocene in Belgium. *Mémoire pour servir à l'explication des Cartes géologiques et minières de la Belgique*, **8** : 96 p.
- PASTRE J.-F., LEROYER C., LIMONDIN-LOZOUËT N., ORTH P., CHAUSSE C., FONTUGNE M., GAUTHIER A., KUNESCH S., LE JEUNE Y. & SAAD M.-C. (2002). — Variations paléoenvironnementales et paléohydrologiques durant les 15 derniers millénaires : les réponses morphosédimentaires des vallées du Bassin Parisien (France). In : BRAVARD (J.-P.) & MAGNY (M.) (eds.), *Les fleuves ont une histoire: paléo-environnement des rivières et des lacs français depuis 15 000 ans*. Errance, 29-44.
- SCHOKKER J. & KOSTER E.A. (2004). — Sedimentology and facies distribution of Pleistocene cold-climate aeolian and fluvial deposits in the Roer Valley Graben southeastern Netherlands. *Permafrost and Periglacial Processes*, **15** (1) : 1-20.
- SCHWAN J. (1986). — The origin of horizontal alternating bedding in weichselian aeolian sands in Northwestern Europe. *Sedimentary Geology*, **49** (1-2) : 73-108.
- SOMMÉ J. (1977). — *Les plaines du Nord de la France et leur bordure. Etude géomorphologique*. Paris 1, Thèse de Doctorat d'Etat en géographie physique (15 mai 1975), Atelier de reproduction des thèses de l'Université de Lille 3, Paris et Lille, 810 p.
- SOMMÉ J. (2006). — Tufs calcaires holocènes récents dans le Nord de la France. *Quaternaire*, **17** (2) : 43-49.
- SOMMÉ J. (2013). — Unités lithostratigraphiques quaternaires du Nord de la France : un inventaire. *Quaternaire*, **24** (1) : 3-12.
- SOMMÉ J., MUNAUT A.V., PUISSEGUR J.J., CUNAT-BOGE N., HEYVAERT F. & LEPLAT J. (1996). — L'Eemien sous les formations fluviales Weichseliennes et holocènes du sondage d'Erquinghem (Nord de la France) dans la plaine de la Lys. *Quaternaire*, **7** (1) : 15-28.
- SOMMÉ J. & TUFFREAU A. (1978). — Historique des recherches sur le Quaternaire de la région du Nord de la France. *Bulletin de l'Association Française pour l'Étude du Quaternaire*, **15** (1) : 5-13.
- STUIVER M., GROOTES P.M. & BRAZIUNAS T.F. (1995). — The GISP2 $\Delta 18\text{O}$ Climate Record of the Past 16,500 Years and the Role of the Sun, Ocean, and Volcanoes. *Quaternary Research*, **44** (3) : 341-354.
- TAVERNIER R. (1946). — L'évolution du Bas Escaut au Pléistocène supérieur. *Bulletin de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, **55** : 106-125.
- TAYLOR K.C., MAYEWSKI P.A., ALLEY R.B., BROOK E.J., GOW A.J., GROTTES P.M., MEESE D.A., SALTZMAN E.S., SEVERINGHAUS J.P., TWICKLER M.S., WHITE J.W.C., WHITHLOW S. & ZIELINSKI G.A. (1997). — The Holocene-Younger Dryas transition recorded at Summit, Greenland. *Science*, **278** : 825-827.
- TUFFREAU A., SOMMÉ J., AITKEN M.J., AUGUSTE P. & BEYRIES S. (1988). — Le gisement paléolithique moyen de Biache-Saint-Vaast (Pas-de-Calais). Volume I. Stratigraphie, environnement, études archéologiques, *Mémoires de la Société Préhistorique Française*, **2** : 338 p.
- VAN DEN BERG M.W. (1994). — Neotectonics of the Roer Valley rift system. Style and rate of crustal deformation inferred from syn-tectonic sedimentation. *Geologie en Mijnbouw*, **73** : 143-156.
- VANDENBERGHE D.A.G., DERESE C., KASSE C. & VAN DEN HAUTE P. (2013). — Late Weichselian (fluvio-) aeolian sediments and Holocene drift-sands of the classic type locality in Twente (E Netherlands): a high-resolution dating study using optically stimulated luminescence. *Quaternary Science Reviews*, **68** : 96-113.
- VANDENBERGHE J. (1983). — Late Weichselian river dune formation Grote Nete valley, central Belgium. *Zeitschrift für Geomorphologie (Supplement)*, **45** : 251-263.
- VANDENBERGHE J. (1985). — Palaeoenvironment and stratigraphy during the last glacial in the Belgian-Dutch border region. *Quaternary Research*, **24** (1) : 23-38.
- VANDENBERGHE J. (1992). — Periglacial phenomena and pleistocene environmental conditions in the Netherlands—An overview. *Permafrost and Periglacial Processes*, **3** (4) : 363-374.
- VANDENBERGHE J. (1993). — Recent results of Pleistocene periglacial research in the Netherlands. *Geologie en Mijnbouw*, **72** : 103-106.
- VANDENBERGHE J. & DE SMEDT P. (1979). — Palaeomorphology in the eastern Scheldt basin (Central Belgium)—The dijle-demer-grote nete confluence area. *Catena*, **6** (1) : 73-105.
- VAN DEN HAUTE P., VANCRAEYNEST L. & DE CORTE F. (1998). — The Late Pleistocene loess deposits and palaeosols of eastern Belgium: new TL age determinations. *Journal of Quaternary Science*, **13** (5) : 487-497.
- VAN GEEL B., BURMAN J. & WATERBOLK H.T. (1996). — Archaeological and palaeoecological indications of an abrupt climate change in The Netherlands, and evidence for climatological teleconnections around 2650 BP. *Journal of Quaternary Science*, **11** (6) : 451-460.
- VAN GEEL B. & MAGNY M. (2002). — Mise en évidence d'un forçage solaire du climat à partir de données paléocologiques et archéologiques : la transition Subboréal-Subatlantique. In : *Équilibres et ruptures dans les écosystèmes depuis 20 000 ans en Europe de l'Ouest* (Actes du colloque international de Besançon, 18-22 septembre 2000). Presses Universitaires de Franche-Comté, 107-122.

- VAN HUISSTEDEN J. & KASSE C. (2001). — Detection of rapid climate change in Last Glacial fluvial successions in The Netherlands. *Global and Planetary Change*, **28** (1-4) : 319-339.
- VAN HUISSTEDEN K. (J.) & VANDENBERGHE J. (1988). — Changing fluvial style of periglacial lowland rivers during the Weichselian Pleniglacial in the eastern Netherlands. *Zeitschrift für Geomorphologie, Neue Folge*, supplément **71** : 131-146.
- VAN HUISSTEDEN J.K., VANDENBERGHE J., VAN DER HAMMEN T. & LAAN W. (2000). — Fluvial and aeolian interaction under permafrost conditions: Weichselian Late Pleniglacial, Twente, eastern Netherlands. *Catena*, **40** (3) : 307-321.
- VAN HUISSTEDEN J., VAN DER VALK L. & VANDENBERGHE J. (1986). — Geomorphological evolution of a Lowland valley system during the Weichselian. *Earth Surface Processes and Landforms*, **11** (2) : 207-216.
- VAN VLIET B. & LANGOHR R. (1981). — Correlation between fragipans and permafrost with special reference to silty Weichselian deposits in Belgium and northern France. *Catena*, **8** (2) : 137-154.
- VAN VLIET-LANOË B. (1989). — Dynamics and extent of the Weichselian permafrost in western Europe (Substage 5E to stage 1). *Quaternary International*, **3-4** : 109-113.
- VAN VLIET-LANOË B. (1990). — Le pédocomplexe de Warneton, Ou en est-on ? Bilan paléopédologique et micromorphologique. *Quaternaire*, **1** (1) : 65-75.
- VERBRUGGEN C. & KIDEN P. (1989). — L'évolution postglaciaire du Bas et Moyen Escaut. *Cahiers de Préhistoire du Nord*, **6** : 5-14.
- ZAGWIJN W.H. (1974). — The palaeogeographic evolution of the Netherlands during the Quaternary. *Geologie en Mijnbouw*, **54** (6) : 369-385.
- ZAGWIJN W.H. (1989). — The Netherlands during the Tertiary and the Quaternary: A case history of Coastal Lowland evolution. *Geologie en Mijnbouw*, **68** : 107-120.
- ZIEGLER P.A. (1994). — Cenozoic rift system of western and central Europe: an overview. *Geologie en Mijnbouw*, **73** : 99-124.

APPORTS DES OPERATIONS ARCHEOLOGIQUES A LA CONNAISSANCE DU PLEISTOCENE REGIONAL : EXEMPLE DE LA COUVERTURE LOESSIQUE DU NORD DE LA FRANCE

Contribution of rescue archaeology excavations to the knowledge about regional Pleistocene: example of the loessic cover from northern France

par Sylvie COUTARD (*, **) avec la collaboration de Pierre ANTOINE (**), Emilie GOVAL (*, ***), David HERISSON (***)
& Jean-Luc LOCHT (*, **)

Mots clés. – Archéologie préventive, Pléistocène, loess, chronostratigraphie, Préhistoire.
Key words. – *Rescue archaeology, Pleistocene, loess, chronostratigraphy, Prehistory.*

I. — GEOLOGIE ET PREHISTOIRE DANS LE NORD DE LA FRANCE : UNE LONGUE HISTOIRE COMMUNE ET DES APPORTS RECIPROQUES

L'origine des recherches sur les dépôts quaternaires du nord de la France est intimement liée à celle de la Préhistoire depuis les travaux de Jacques Boucher de Perthes, publiés en 1847. Ce dernier démontra l'association, au sein d'alluvions anciennes de la Somme à Abbeville, d'outils en silex taillés par l'homme avec des restes d'animaux fossiles. La couverture loessique attire également l'attention des chercheurs (Auguste *et al.*, 2014), toujours avec prise en compte des « *produits de l'industrie humaine* » (Ladrière, 1890). La fin du XIX^e siècle et le début du XX^e siècle sont féconds en recherches sur les formations quaternaires et les industries paléolithiques associées (Antoine *et al.*, 2010), grâce aux nombreuses carrières (gravières et briqueteries) ouvertes dans les dépôts alluviaux et les formations de couverture (Commont, 1909). Nombre de briqueteries restent encore visibles bien après-guerre. Les coupes dans les loess sont ainsi largement exposées dans la thèse de J. Sommé (1975), telles que Marquion, Vimy... Les travaux de P. Antoine s'inscrivent dans cette lignée, avec l'étude détaillée des paléosols présents dans les couvertures des terrasses de la Somme, l'insertion chronostratigraphique des occupations associées et l'établissement d'une coupe-type en contexte loessique pour le Début Glaciaire weichsélien (Antoine, 1989, 1990). Au cours des années 1990 et 2000, les recherches sur les loess de Picardie et des régions avoisinantes connurent un essor sans précédent en liaison avec le développement rapide de l'archéologie de sauvetage sur les grands travaux d'aménagement, en particulier les tracés linéaires (TGV Nord, autoroutes A16 [Locht, 2002], A29, Canal Seine-Nord-Europe entre autres...). La réalisation de sondages destinés à la découverte de gisements paléolithiques et l'étude des occupations préhistoriques dans leur contexte géomorphologique, chronostratigraphique et paléoenvironnemental ont alors mené à la constitution d'équipes

pluridisciplinaires informelles alliant Afan-Inrap, CNRS, MNHN... (Coutard *et al.*, 2012).

II. — L'ETUDE DES COUVERTURES LOESSIQUES EN ARCHEOLOGIE PREVENTIVE

L'objectif des sondages réalisés lors de la phase dite de diagnostic est de déterminer la présence ou l'absence de vestiges archéologiques. Les sondages sont réalisés avec une pelle hydraulique à godet lisse (Locht *et al.*, 2010). Ils permettent d'observer les grandes lignes des séquences sédimentaires, l'accumulation des observations (plus de 2 500 sondages, plus de 80 profils détaillés) et des corrélations menant à l'élaboration de séquences pédosédimentaires synthétiques et de séquences de référence, prenant en compte la répartition spatiale des différentes formations à l'échelle régionale. Les fouilles préventives sont le lieu des études pluridisciplinaires approfondies (près de 20 fouilles paléolithiques à ce jour). Les fouilles programmées, complémentaires, offrent l'avantage du temps de réflexion, mais concernent des surfaces beaucoup plus petites.

III. — EXEMPLE DU CANAL SEINE-NORD-EUROPE

Les diagnostics archéologiques sur le tracé du futur Canal Seine-Nord-Europe, réalisés par l'Inrap, ont débuté en 2008. La couverture loessique et diverses formations alluviales ont été explorées grâce à plus de 800 sondages en puits entre Noyon (Oise) et Oisy-le-Verger (Pas-de-Calais). Les sondages ont été effectués par des équipes locales alliant préhistoriens et géomorphologues. Une pelle au bras rallongé a permis de traverser des épaisseurs de limons variables, dépassant 13 m dans certains secteurs du Pas-de-Calais. Les séquences observées, reposant sur la craie ou des formations

(*) INRAP Nord-Picardie, 518 Rue Saint-Fuscien, 80000 Amiens ; sylvie.coutard@inrap.fr

(**) UMR 8591, Laboratoire de Géographie Physique, Environnements quaternaires et actuels, 1 place Aristide Briand, 92195 Meudon.

(***) INRAP CSNE, 16 Rue du Général Leclerc, 80400 Croix-Moligneaux et UMR 7194, Département de Préhistoire du Muséum national d'Histoire naturelle, Institut de Paléontologie Humaine, 1 rue René Panhard, 75013 Paris.

tertiaires, correspondent majoritairement au Pléistocène supérieur. De nombreux silex taillés ont été récoltés mais les sites archéologiques bien conservés sont en nombre restreint. Trois fouilles de grande ampleur ont eu lieu. Deux fouilles à Havrincourt (Pas-de-Calais) ont permis des avancées importantes quant à la chronostratigraphie du Pléiglaciaire inférieur et moyen du Weichsélien (Antoine *et al.*, 2014) (Fig. 1). Une fouille à Etricourt-Manancourt (Somme) a été effectuée sur

des niveaux acheuléens et moustériens pris dans une séquence pédosédimentaire unique couvrant les MIS 11 à 5. Cette fouille a montré que le modèle d'occupation humaine lié aux phases climatiques et pédosédimentaires, construit en Picardie pour le Weichsélien, peut servir de base de réflexion pour d'autres cycles interglaciaire-glaciaire, ainsi que pour d'autres régions de France et d'Europe.



Fig. 1. — Fouille d'Havrincourt – secteur 2 (Pas-de-Calais) © Denis GLIKSMAN, INRAP.

Fig. 1. — Rescue archaeology excavation at Havrincourt, site 2 (Pas-de-Calais) © Denis GLIKSMAN, INRAP.

BIBLIOGRAPHIE

- ANTOINE P. (1989). — Le complexe de sols de St-Saufieu (Somme), micromorphologie et stratigraphie d'une coupe type du Début Weichselien. *Publication du Centre d'Etude et de Recherches préhistoriques*, **1** : 51–59.
- ANTOINE P. (1990). — *Chronostratigraphie et environnement du Paléolithique du bassin de la Somme*. Université de Lille-Flandre-Artois, *Publication du Centre d'Etude et de Recherches préhistoriques*, **2** : 233 p.
- ANTOINE P., BAHAIN J.-J., AUGUSTE P., FAGNART J.-P., LIMONDIN-LOZOUET N. & LOCHT J.-L. (2010). — Quaternaire et préhistoire dans la vallée de la Somme : 150 ans d'histoire commune. In : HUREL A. & COYE N. (coord.), *Dans l'épaisseur du temps- Archéologues et géologues inventent la préhistoire*. Publications scientifiques du Muséum, collection Archives, Paris: 341-381.
- ANTOINE P., GOVAL E., JAMET G., COUTARD S., MOINE O., HÉRISSON D., AUGUSTE P., GUÉRIN G., LAGROIX F., SCHMIDT E., ROBERT V., DEBENHAM N., MESZNER S. & BAHAIN J.-J. (2014). — Les séquences loessiques pléistocène supérieur d'Havrincourt (Pas-de-Calais, France) : stratigraphie, paléoenvironnements, géochronologie et occupations paléolithiques. *Quaternaire*, **25** (4) : 321-368.
- AUGUSTE P., SOMME J. & VALLIN L. (2014). — Le rôle de la Société Géologique du Nord et de ses publications dans l'évolution des connaissances sur le Quaternaire. *Mémoires de la Société Géologique du Nord*, **XVII** : 129-138.
- BOUCHER DE PERTHES J. (1847). — *Antiquités Celtiques et antédiluviennes : Mémoire sur l'industrie primitive et les arts à leur origine*. Paris, Treuttel et Wurtz, libraires, rue de Lille, et Berache, libraire, rue de Bouloy, vol. **1** : 628 p.
- COMMENT V. (1909). — Saint-Acheul et Montières. Notes de géologie, de paléontologie et de préhistoire. *Mémoires de la Société Géologique du Nord*, **VI** (3) : 68 p.
- COUTARD S., ANTOINE P. & LOCHT J.-L. (2012). — Géologie et préhistoire dans les loess de la Somme et des régions voisines. *Géologues*, **173** : 33-37.
- LADRIERE J. (1890). — Etude stratigraphique du terrain quaternaire du Nord de la France. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **XVIII** : 93-149 et 205-276.
- LOCHT J.-L., dir. (2002). — Bettencourt-Saint-Ouen ; cinq occupations paléolithiques au début de la dernière glaciation. *Document d'Archéologie Française*, **90** : 169 p.
- LOCHT J.-L., SELLIER N., COUTARD S., ANTOINE P. & FERAY P. (2010). — La détection de sites du Paléolithique ancien et moyen dans le nord de la France : une approche particulière. In : DEPAEPE P. & SEARA F. eds., *Le diagnostic des sites paléolithiques et mésolithiques*. *Les Cahiers de l'Inrap*, **3** : 108 p.
- SOMME J. (1975). — *Les plaines du Nord de la France et leur bordure. Etude géomorphologique*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris I, éd. 1977, Paris et Lille, 2 vol. : 810 p., 184 fig.

IMPACT TAPHONOMIQUE DES PHENOMENES PERIGLACIAIRES : L'EXEMPLE DES PIPKRAKES OU AIGUILLES DE GLACE

Taphonomic impact of periglacial processes : the example of pipkrakes (ice needles)

par Luc VALLIN (*) & Bertrand MASSON (*)

Mots clés. – Processus post-dépositionnels, périglaciaire, pipkrake, archéologie expérimentale, cycles gel-dégel.
Key words. – *Post-depositional processes, periglacial, pipkrake, experimental archaeology, freeze-thaw cycles.*

Les pipkrakes sont des aiguilles ou des colonnettes de glace fibreuse formées à la surface du sol, dans de petites fissures ou sous un élément grossier qu'elles soulèvent progressivement au fur et à mesure de leur croissance, jusqu'à la fusion qui entraîne la chute de l'élément soulevé. Les pipkrakes se forment en quelques heures, mais peuvent montrer une stratification due à une croissance polycyclique. Leur genèse est conditionnée par les différences de conductivité thermique au sein du substrat ; les conditions favorables à la formation de pipkrakes sont un gradient thermique élevé entre un sol (meuble) chaud et gorgé d'eau et un air modérément froid. Expérimentalement, un modèle a été reproduit au Centre de Géomorphologie du CNRS à Caen ; il a permis de mettre en évidence les déplacements de cailloux suscités par la croissance et la fonte des pipkrakes (Van Vliet-Lanoë, 1988). Sur le terrain, des mesures ont montré que le bilan des mouvements vers l'aval des pentes (combiné à d'autres processus) pouvait atteindre plusieurs décimètres par an, en particulier dans les zones élevées des basses latitudes (Höllermann, 1978, cité par Bertran, 2004, p. 88 ; Francou, 1989 ; Francou & Bertran, 1997). Le processus inclut un certain tri granulométrique, le déplacement des pierres étant inversement proportionnel à leur taille. Ces observations posent la question de l'impact des pipkrakes sur la distribution spatiale des vestiges au sein des sites archéologiques soumis aux climats froids.

Certains archéologues, particulièrement ceux qui travaillent dans les hautes latitudes, se sont penchés dès les années 1970 sur cette problématique taphonomique, par l'installation *in vivo* de diverses cellules expérimentales en Alaska ; des déplacements d'artefacts lithiques variant en moyenne de 4,0 cm/an (Bowers *et al.*, 1983) à 31,8 cm sur trois ans (Hilton, 2002, 2003) ont été mesurés ; ils ont provoqué une rapide destruction de la disposition originelle des objets. L'action (parfois contraire) du vent et des pipkrakes a été évoquée comme principale cause

de ces mouvements. Ces données actualistes peuvent, avec une approximation satisfaisante, être transposées aux paléoclimats froids du Pléistocène, et donc à la plupart des sites paléolithiques européens de plein air.

Une expérience, conduite en plein air à Villeneuve d'Ascq (Nord) entre 2004 et 2010, nous a permis d'observer des pipkrakes, d'étudier les conditions climatiques de leur formation et de mesurer leur impact sur le déplacement d'objets lithiques au sein d'un amas de débitage reconstitué *in situ* sur un substrat limoneux nu (Fig. 1). L'exploitation des données météorologiques d'une station proche a permis d'établir une corrélation entre le nombre annuel de gels favorables à la formation de pipkrakes et la médiane des déplacements des éclats pointés. L'observation du soulèvement des artefacts et de leur basculement lors de la fusion des colonnettes de glace a montré que le sens du déplacement est déterminé par la microtopographie plus que par la pente générale. En effet les pipkrakes se sont formés essentiellement dans les boursoufflures limoneuses formées par les déjections de lombrics, en périphérie immédiate des concentrations. L'absence ou la rareté de la végétation est sans doute une condition nécessaire. Il est donc peu vraisemblable que les pipkrakes aient, dans des conditions normales, une action notable en milieu tempéré, en dehors des zones montagneuses ou, ponctuellement, de sols dénudés (piétinés par exemple). En revanche, dans les conditions que nous avons maintenues artificiellement, les résultats obtenus sont cohérents avec ceux des expériences conduites en milieu périglaciaire. La dynamique induite par les pipkrakes n'est donc pas seulement restreinte, en théorie, aux climats les plus froids ; mais en milieu périglaciaire son rôle de transfert des vestiges peut être notable, d'autant qu'il rentre en interaction avec d'autres phénomènes (sols polygonaux, solifluxion,...).

(*) Service Régional de l'Archéologie-DRAC du Nord – Pas-de-Calais, 3 rue du Lombard, TSA 50041, 59049 Lille cedex ; luc.vallin@culture.gouv.fr, bertrand.masson@culture.gouv.fr

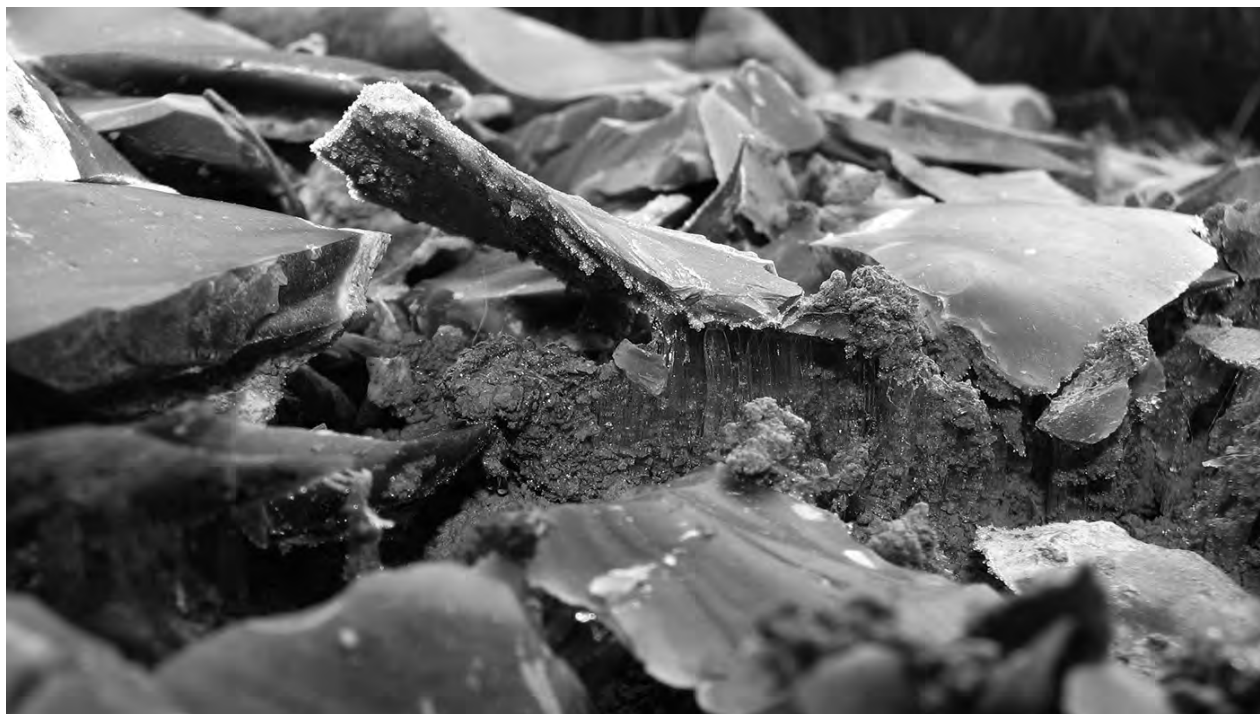


Fig. 1. — Eclat de silex soulevé par des pipkrakes dans un amas expérimental à Villeneuve d'Ascq (Nord).

Fig. 1. — Flint lift by pipkrakes in an experimental flake scatter at Villeneuve d'Ascq (northern France).

BIBLIOGRAPHIE

- BERTRAN P. ed. (2004). — Dépôts de pente continentaux. Dynamique et faciès. *Quaternaire*, hors-série, **1** : 260 p.
- BOWERS P.M., BONNICHSEN R. & HOCH D.M. (1983). — Flake dispersal experiments : noncultural transformation of the archaeological record. *American Antiquity*, **48** (3) : 553-572.
- FRANCOU B. (1989). — Régime thermique des sols et rôle du gel dans la dynamique des versants d'un milieu subéquatorial d'altitude : les Andes centrales du Pérou. *Géographie Physique et Quaternaire*, **43** (1) : 97-112.
- FRANCOU B. & BERTRAN P. (1997). — A multivariate analysis of clast displacement rates on stone-banked sheets, Cordillera Real, Bolivia. *Permafrost and Periglacial Processes*, **8** : 371-382.
- HILTON M.R. (2002). — *Evaluating Site Formation Processes at a Higher Resolution : An Archaeological Case Study in Alaska Using Micromorphology and Experimental Techniques*. Ph.D. dissertation, University of California, Los Angeles : 381 p.
- HILTON M.R. (2003). — Quantifying Postdepositional Redistribution of the Archaeological Record Produced by Freeze-Thaw and Other Mechanisms : An Experimental Approach. *Journal of Archaeological Method and Theory*, **10** (3) : 165-202.
- HÖLLERMANN P. (1978). — Soil movements in the subtropical mountain environment of high Tenerife (Canary Islands). In : *Le périglaciaire d'altitude du domaine méditerranéen et abords*. Association Géographique d'Alsace, Strasbourg : 91-112.
- VAN VLIET-LANOË B. (1988). — *Le rôle de la glace de ségrégation dans les formations superficielles de l'Europe de l'Ouest*. *Processus et Héritages*. Thèse de doctorat d'Etat, Université de Paris I-Sorbonne (1987), Editec édit., Caen (1988), 2 vol. : 854 p.

LES RESSOURCES EN SILEX ET EN GRES DANS LE NORD DE LA FRANCE : EXPLOITATION AU III^e MILLENAIRE AVANT NOTRE ÈRE

The resources in flint and sandstone in northern France : exploitation in the IIIrd mill. BC

par Emmanuelle MARTIAL (*)

Mots clés. – Silex, grès, lithothèque, outillage lithique, Nord - Pas-de-Calais, Néolithique final.
Key words. – *Flint, sandstone, geological sources, stone tools, Nord - Pas-de-Calais, Late Neolithic.*

L'identification et l'étude de l'origine des matériaux constituant les outils en pierre préhistoriques s'inscrivent dans une large perspective de recherche sur les comportements socio-économiques des communautés humaines concernées. Au III^e millénaire BC, l'outillage lithique et macrolithique des populations du nord de la France repose essentiellement sur l'exploitation des roches sédimentaires (silex et grès) locales et régionales. La caractérisation des territoires d'acquisition des matériaux lithiques au Néolithique final fait l'objet de travaux menés, d'une part, dans le cadre du PCR « Géoarchéologie du silex de la craie dans le nord-ouest de la France » [Programme Collectif de Recherche conduit par Jacques FABRE, retraité de l'Université de Picardie - Laboratoire de Géologie, entre 2002 et 2006] (Allard *et al.*, 2010) et, d'autre part, dans le cadre de la recherche collective pluriannuelle sur « Le Néolithique final dans le nord de la France : une approche pluri-disciplinaire du III^e millénaire avant notre ère, entre Deûle et Escaut » [Axe de Recherche Collective de l'INRAP initié en 2008, coordonné par Emmanuelle MARTIAL et Ivan PRAUD] (Martial & Praud, 2011). L'approvisionnement en silex se fait majoritairement en position primaire dans les affleurements des différents étages du Crétacé supérieur (Turonien et « Sénonien »). L'emploi d'altérites (silex récoltés sur gîte secondaire) est minoritaire. Ces silex, abondants et de qualité variable, sont employés pour une production d'éclats utilisés comme supports pour l'outillage

domestique (Fig. 1 : 1-3). Parallèlement, certains produits finis relevant de savoir-faire élevés, grandes lames (Fig. 1 : 4) et haches (Fig. 1 : 5), sont originaires d'ateliers spécialisés situés à plus ou moins longue distance. L'importance de ces importations et la diversité de leurs origines se sont accentuées au Néolithique final.

Le macro-outillage (Fig. 1 : 6) est lié aux activités de mouture (meules et molettes), d'abrasion (polissoirs), de broyage (broyons) et de débitage (percutés, enclumes) pour lesquelles divers faciès de grès aux propriétés mécaniques différentes (grès quartzites de forte cohésion majoritaires et grès fins moins compacts) ont été exploités (Martial *et al.*, 2011 ; Martial & Monchablon, 2010 ; Monchablon, 2014). Ils proviennent des formations sableuses éocènes du Landénien largement répandues dans la région, en bordure de la plaine de Flandre et du Bassin d'Orchies et au sommet de buttes « tertiaires » résiduelles. Il semble qu'à la fin du Néolithique, l'acquisition des blocs se fait par extraction sur gisement primaire (Bostyn *et al.*, 2014). Ainsi, outre les aspects techno-fonctionnels qui caractérisent les productions lithiques du Néolithique final du nord de la France, l'étude de ces assemblages alimente la réflexion sur les relations homme/milieu en abordant, en particulier, les modes d'exploitation et de gestion des ressources naturelles ainsi que le territoire des populations du III^e millénaire BC.

(*) INRAP Nord-Picardie, ZI La Pilaterie, 11 rue des Champs, 59650 Villeneuve d'Ascq / UMR 8215 Trajectoires, Nanterre ; emmanuelle.martial@inrap.fr

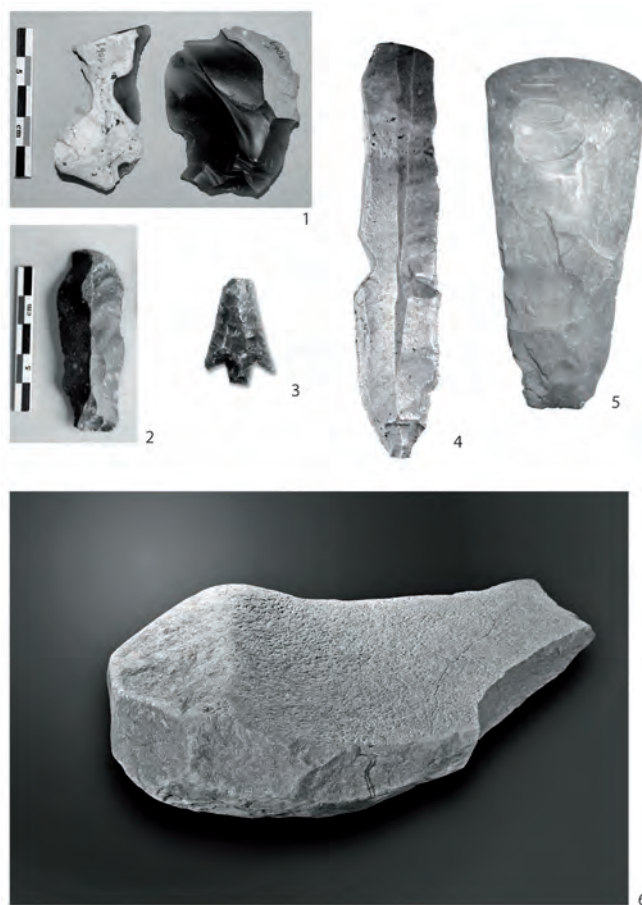


Fig. 1. — Echantillons de matières premières lithiques exploitées au Néolithique final dans le nord de la France. 1- Microdenticulés sur éclats en silex du Coniacien local du site d'Arleux « Chemin des Croix » ; 2- Microdenticulé sur éclat allongé en silex du Turonien supérieur de la vallée de l'Escaut (faciès typique) du site d'Arleux « Chemin des Croix » ; 3- Armature de flèche à pédoncule et ailerons (3 cm) en silex du Coniacien local du site de Houplin-Ancoisne « Rue Marx Dormoy » ; 4- Lame retouchée incomplète (15 cm) en silex du Campanien de Spiennes (Bassin de Mons, Belgique) du site d'Arleux « Chemin des Croix » ; 5- Lame de hache polie en silex crétacé d'origine indéterminée du site de Houplin-Ancoisne « Rue Marx Dormoy » ; 6- Meule à rebord (46 cm de long) en grès du Landénien du site de Carvin « ZI du Château » (clichés D. BOSSUT et E. MARTIAL, INRAP).

Fig. 1. — Samples of lithic raw materials used during Late Neolithic in northern France. 1- Microdenticated flakes in Coniacian local flint, Arleux "Chemin des Croix"; 2- Long flake with microdenticated edges in Late Turonian flint of Escaut valley (typical facies), Arleux "Chemin des Croix"; 3- Arrowhead (3 cm) in Coniacian local flint, Houplin-Ancoisne « Rue Marx Dormoy » ; 4- Incomplete retouched blade (15 cm long) in Campanian flint of Spiennes (Mons Basin, Belgium), Arleux "Chemin des Croix"; 5- Polished axehead in undetermined Cretaceous flint, Houplin-Ancoisne « Rue Marx Dormoy » ; 6- Edged quern (46 cm long) in Landenian sandstone from Carvin « ZI du Château » (photographs by D. BOSSUT and E. MARTIAL, INRAP).

BIBLIOGRAPHIE

- ALLARD P., BOSTYN F. & MARTIAL E. avec la collaboration de COLLET H., FABRE J. & VALLIN L. (2010). — Les matières premières siliceuses exploitées au Néolithique moyen et final dans le Nord et la Picardie (France). In : *Premiers Néolithiques de l'Ouest* (Actes du 28^e colloque interrégional sur le Néolithique, novembre 2007, Le Havre). Presses Universitaires de Rennes : 347-375.
- BOSTYN F., BEUGNIER V., MARTIAL E., MEDARD F., MONCHABLON C. & PRAUD I. (2014). — Habitat et économie au Néolithique final : l'exemple du site de Raillencourt-Sainte-Olle (Nord) entre activités domestiques et productions artisanales. *Bulletin de la Société Préhistorique française*, **111** (4) : 679-726.
- MARTIAL E., CAYOL N., HAMON C., MAIGROT Y., MEDARD F. & MONCHABLON C. (2011). — Production et fonction des outillages au Néolithique final dans la vallée de la Deûle (Nord - Pas-de-Calais, France). In : BOSTYN F., MARTIAL E. & PRAUD I. dir., *Le Néolithique du Nord de la France dans son contexte européen : habitat et économie aux 4^e et 3^e millénaires avant notre ère* (Actes du 29^e Colloque Interrégional sur le Néolithique, Villeneuve d'Ascq, 2-3 octobre 2009). *Revue Archéologique de Picardie*, n° spécial **28** : 365-390.
- MARTIAL E. & MONCHABLON C. (2010). — Les prospections des gîtes de grès. In : MARTIAL E. & PRAUD I. dir., *Le Néolithique final dans le Nord de la France : une approche pluri-disciplinaire des sites du III^e millénaire avant notre ère, entre Deûle et Escaut*. INRAP, Rapport d'activité 2010 : 18-39.
- MARTIAL E. & PRAUD I. (2011). — Une approche pluridisciplinaire des sites du Néolithique final entre Deûle et Escaut : premiers résultats et perspectives. In : BOSTYN F., MARTIAL E. & PRAUD I. dir., *Le Néolithique du Nord de la France dans son contexte européen : habitat et économie aux 4^e et 3^e millénaires avant notre ère* (Actes du 29^e Colloque Interrégional sur le Néolithique, Villeneuve d'Ascq, 2-3 octobre 2009). *Revue Archéologique de Picardie*, numéro spécial **28** : 575-583.
- MONCHABLON C. (2014). — Les meules de la fin du Néolithique dans le nord de la France : premiers résultats typo-chronologiques. In : LOUBOUTIN C. & VERJUX Ch. dir., *Zones de production et organisation des territoires au Néolithique* (Actes du 30^e Colloque interrégional sur le Néolithique, Tours - Le Grand-Pressigny, 7-9 octobre 2011). *Revue Archéologique du Centre de la France*, **51^e supplément** : 267-278.

LES MINIÈRES NÉOLITHIQUES DE SPIENNES. MODALITÉS D'EXPLOITATION D'UN GISEMENT DE SILEX EXCEPTIONNEL DU BASSIN DE MONS (HAINAUT, BELGIQUE)

Neolithic mines at Spiennes. Exploitation methods of an exceptional flint deposit in the Mons basin (Hainaut, Belgium)

par Hélène COLLET (*)

Mots clés. – Minières, silex, Néolithique, extraction souterraine, haches, lames.
Key words. – Mines, flint, Neolithic, underground mining, axes, blades.

Les minières néolithiques de silex de Spiennes sont situées dans une région riche en silex crétacés, le Bassin de Mons en Belgique. Celle-ci a vu naître et se développer sur son pourtour plusieurs sites spécialisés dans l'extraction et la taille du silex. Le plus connu d'entre eux, le plus vaste et le mieux investigué, est le site de Spiennes dont l'exploitation débute aux alentours de 4 300 ans avant notre ère, à l'époque de la culture de Michelsberg (4 300 à 3 600 ans avant notre ère) (Collet *et al.*, 2008 ; Collet, 2014). L'activité minière s'y poursuit ensuite, apparemment sans hiatus, jusqu'aux alentours de 2 900-2 700 ans avant notre ère. D'après les déchets de taille présents en surface, le site s'étend sur une centaine d'hectares. Il comprend trois secteurs miniers surplombant les vallées de la Trouille (Camp-à-Cayaux et Petit-Spiennes) et de la Wampe (Versant de la Wampe). Le nombre exact de structures d'extraction est inconnu mais s'élève certainement à plusieurs milliers. Leur type varie en fonction de facteurs géologiques ou des matériaux recherchés. Là où le silex est facilement accessible, de simples fosses et des exploitations

à flanc de vallée ont été creusées. Là où il est profondément enfoui, les mineurs ont foncé des puits d'accès étroits, de l'ordre d'un mètre de diamètre, qui s'enfoncent verticalement jusqu'à 6, 10 et même 16 m de profondeur. A leur base, se déploient de courtes galeries d'extraction, creusées à l'aide de pics en silex ou en bois de cerf (Fig. 1). La surface souterraine exploitée varie de 20 à 45 m². Dans le secteur du Camp-à-Cayaux, certains puits traversent plus de 15 bancs de silex, délaissés par des mineurs décidés à exploiter des dalles de silex massives situées à 16 m sous terre.

Comme dans les autres centres d'extraction et de taille, le silex extrait a servi à l'élaboration de produits spécifiques. A Spiennes, il s'agit de lames de hache et de lames, qui peuvent atteindre 25 cm de long. La diffusion extrarégionale de ces productions de grande qualité reste encore aujourd'hui une question ouverte, en raison de la difficulté à identifier l'origine géographique des silex du Crétacé. Il est cependant évident que de telles exploitations dépassaient largement les besoins locaux.

(*) Service public de Wallonie, Service de l'Archéologie en Hainaut - Minières néolithiques de silex de Spiennes, 52 rue d'Harmignies, B-7032 Spiennes (Belgique) ; helene.collet@spw.wallonie.be



Fig. 1. — Banc de silex tabulaire exploité dans la minière du Camp-à-Cayaux à Spiennes (Mons, Belgique). Photo M. Woodbury © SPW.

Fig. 1. — Tabular flint seam exploited in the mine of Camp-à-Cayaux at Spiennes (Mons, Belgium). Photograph by M. Woodbury © SPW.

BIBLIOGRAPHIE

COLLET H. DIR. (2014). — *Les minières néolithiques de silex de Spiennes. Patrimoine mondial de l'Humanité. Carnets du Patrimoine 126* ; Institut du Patrimoine wallon, Namur : 56 p.

COLLET H., HAUZEUR A. & LECH J. (2008). — The prehistoric flint mining complex at Spiennes (Belgium) on the occasion of its dis-

covery 140 years ago. In: ALLARD P., BOSTYN F., GILIGNY F. & LECH J., *Flint mining in Prehistoric Europe: Interpreting the archaeological records* (European Association of Archaeologists, 12th Annual Meeting, Cracow, Poland, 19-24 September 2006). *British Archaeological Records, International Series*, **1891**: 41-77; Oxford University Press, Oxford.

PALYNOLOGIE ET GEOARCHEOLOGIE : COMPLEMENTARITE POUR LA RESTITUTION DES PALEOENVIRONNEMENTS

Palynology and geoarcheology: complementarity for palaeoenvironmental reconstruction

par Muriel BOULEN (*)

Mots clés. – Palynologie, Végétation, Climat, Homme/milieu.
Key words. – *Palynology, Vegetation, Climate, Human/environment.*

Dès le XIX^e siècle, les géologues s'intéressent au pollen (Richard, 2005). La discipline se développe ensuite et la collaboration géologue/palynologue se généralise. L'analyse pollinique d'un échantillon prélevé dans un niveau donné permet de restituer une image de la végétation au moment du dépôt de cette couche. L'étude d'une séquence continue offre alors une vision dynamique du couvert végétal. Ces variations sont tout d'abord corrélées à des changements climatiques, qui vont ensuite se conjuguer à l'impact de l'homme sur son milieu.

Pour le Tardiglaciaire et l'Holocène, les grandes lignes de la dynamique de végétation sont maintenant bien connues

pour nos régions (Tableau 1). Aussi, une étude palynologique fournit rapidement une proposition d'attribution chronologique au géologue ainsi qu'à l'archéologue. Couplé aux résultats d'autres disciplines de la flore, de la faune et/ou du sol, le cadre environnemental proposé par la palynologie contribue à l'élaboration de synthèses régionales (Boulen *et al.*, 2012, 2014 ; Leroyer, 1997 ; Leroyer *et al.*, 2009 ; Boulen & Deschodt, 2015) permettant de mieux appréhender le rôle de l'homme sur son environnement et, inversement, l'incidence du milieu sur les implantations humaines.

(*) INRAP / UMR 7209 AASPE, 3 impasse du Commandant Gérard, 02200 Soissons ; muriel.boulen@inrap.fr

		Chronozone	BP	BC	Occupation	Climat	Végétation
H O L O C È N E	Subatlantique		1000	1000	Moyen -Age	Conditions plus océaniques avec phases de détérioration	Apparition de nouveaux taxons et accroissement de l'influence de l'homme
			2000	0	Antiquité		
					âge du Fer		
	Subboréal		3000	1000	âge du Bronze	Climat plus continental à l'est et relativement humide dans l'ouest, le Bassin parisien et le nord	Recul chênaie mixte contre chênaie/hêtraie (décalé suivant région)
			4000	2000			
	Atlantique		5000	3000	Néolithique	Chaud et humide avec phase d'optimum climatique	Chênaie mixte à Tilleul
			6000	4000			
			7000	6000			
	Boréal		8000	7000	Mésolithique	Amélioration jusqu'à chaud et sec	Noisetier + développement mésophiles
			9000	8000			
Préboréal			9000	Paléolithique final	Frais et humide	Suprématie du Pin	
		10000	10000				
PL É G L A C I A I R E	Tardi gla ci aire	Dryas récent	11000	11000	Paléolithique sup. (Magdalénien)	Sec et rigoureux	Recul des forêts. Steppes
		Allerød	12000	12000		Réchauffement	Forêts claires de Pins et Bouleaux
		Bølling	13000	13000		Froid. 1ère amélioration	Paysage ouvert (steppe)
		Dryas ancien	14000	14000		Alternance de phases glaciaires et interglaciaires	

Tableau 1. – Synthèse végétation/climat durant le Tardiglaciaire et l'Holocène. Les âges « BP » et « BC » sont donnés en années.

Table 1. – Vegetation/climate synthesis during the Lateglacial and Holocene. "BP" and "BC" ages are in years.

BIBLIOGRAPHIE

- BOULEN M. & DESCHODT L. (2015). — Climat et Végétation. In : PRAUD I. (dir.), BERNARD V., BOITARD E., BOULEN M., BRAGUIER S., CAYOL N., COUBRAY S., DESCHODT L., FECHNER K., HAMON C., LANCELOT S., MAIGROT Y., MARTIAL E., MÉDARD F., MONCHABLON C., PONEL P. & SELLAMI-DIETSCH M.-F., *Houplin-Ancoisne « Le Marais de Santes » : une implantation au bord de la Deûle au Néolithique final*. Co-édition INRAP/CNRS, coll. Recherches archéologiques, Paris : 15-72.
- BOULEN M., DESCHODT L. & HENTON A. (2014). — Evolution morpho-sédimentaire et enregistrement pollinique atlantique dans le nord de la France : la séquence de Valenciennes «le Vignoble» (vallée de l'Escaut, Nord). *Quaternaire*, 4 : 343-364.
- BOULEN M., FECHNER K., LOICQ S. & MATTERNE V. (2012). — Environnement et exploitation des sols autour des sites protohistoriques champenois. Première confrontation des résultats archéobotaniques, malacologiques et pédologiques. In : *L'âge du Fer entre la Champagne et la vallée du Rhin* (Actes du 34^e colloque de l'AFEAF, mai 2010, Aschaffenburg, Allemagne). Römisch-Germanischen Zentralmuseums : 41-76.
- LEROYER C. (1997). — *Homme, climat, végétation au tardi- et postglaciaire dans le Bassin parisien : Apports de l'étude palynologique des fonds de vallée*. Thèse de doctorat, Université de Paris I, 2 volumes : 786 p.
- LEROYER C., BOULEN M., MARGUERIE D., LORHO T., PRAT B., ARGANT J., avec les contributions de ALLENET DE RIBEMONT G., Aoustin D., DIOT M.-F., GAUDIN L., GUENET P., LATOUR-ARGANT C., MAREMBAT L., PERRIERE J., TIXIER C. & VIVENT D. (2009). — Base de données S.I.G. palynologiques sur l'Âge du Fer en France : une autre approche du paysage végétal et de son anthropisation. In : BERTRAND I., DUVAL A., GOMEZ DE SOTO J. & MAGUER P. (dir.), *Habitats et paysages ruraux en Gaule et regards sur d'autres régions du monde celtique* (Actes du XXXI^e colloque international de l'Association Française pour l'Etude de l'Âge du Fer, 17-20 mai 2007, Chauvigny). Mémoire XXXV, Tome II : 447-468.
- RICHARD H. (2005). — Palynologie et archéologie : le possible, le peut-être et l'impossible. In : PETIT C. (dir.), *Occupation et gestion des plaines alluviales dans le Nord de la France de l'âge du Fer à l'époque gallo-romaine* (Actes de la table ronde de Molesmes, 17-18 septembre 1999, Besançon). Presses Universitaires de Franche-Comté, Annales littéraires, 786, Série « Environnement, société et archéologie », 8 : 15-19.

L'EVOLUTION DIFFERENTIELLE DES SOLS ET DE L'EROSION DEPUIS 6 000 ANS EN NORD – PAS-DE-CALAIS (FRANCE) ET EN MOYENNE BELGIQUE : ETUDES ARCHEOPEDOLOGIQUES APPLIQUEES AUX SUIVIS DE FOUILLES PREVENTIVES SUR LIMONS DE PLATEAU

Differential evolution of soil formation and erosion since 6000 years in the Nord – Pas-de-Calais (France) and Middle Belgium: Archaeopedological studies of preventive archaeological excavations on silty plateau soils

par Kai FECHNER (*)

Mots clés. – Archéologie, Holocène, pédologie, pédogenèse, érosion, colluvions.
Key words. – Archaeology, Holocene, soil science, pedogenesis, erosion, colluvium.

I. — INTRODUCTION

Profitant du suivi de nombreuses fouilles préventives, on peut tenter un bilan des phénomènes pédologiques holocènes observés dans les stratigraphies. Il s'agit ici de l'étude des sols des sites de plateaux, de versants et de vallons secs sur limons décarbonatés, des périodes historiques, protohistoriques et néolithiques du Nord – Pas-de-Calais et de Moyenne Belgique, plus rarement des régions voisines.

II. — OBJECTIFS

L'objectif de cette contribution est la prise en compte des conditions pédologiques tardiglaciaires et holocènes initiales et des modifications intervenues depuis, dans l'étude de l'état actuel des sols de Nord - Pas-de-Calais et des régions limitrophes. Les sols reflètent en outre les liens entre évolution de l'environnement et impact sur et par les activités de l'homme du passé et des végétaux et animaux liés à celles-ci. Les matériaux les plus superficiels et les pédogenèses récentes sur plateaux et versants constituent aussi le point de départ et de référence pour bon nombre d'activités humaines étudiées par les archéologues, historiens et géographes. A long terme, le but est de contribuer à la création d'un cadre pédologique pour les occupations humaines des 6 000 dernières années, pour les sites de versants et de plateau, enfin de vallons secs. Quel a été le rythme des changements locaux, observables et datables grâce aux fouilles ? Y a-t-il des tendances à plus grande échelle, une fois ces résultats comparés entre eux et avec les recherches hors sites ?

III. — MATERIAUX ET METHODES

Deux sites, à Houplin-Ancoisne « Rue Marx-Dormoy » (Nord, resp. E. MARTIAL) et à Erre « Rue Condorcet et Hubert Parent » (Pas-de-Calais, resp. B. BEHAGUE) illustrent le mieux ce propos grâce à la richesse de leurs litho- et pédostatigraphies. Un grand nombre d'autres sites ont été traités à l'aide d'analyses granulométriques et chimiques, parfois de lames minces, depuis 1992. A côté de ces cas, on a par ailleurs pu proposer des cartes de répartition de certains des phénomènes anthropiques les plus intéressants, par phénomène (horizon de surface, enclos,...) , par époque et par interprétation, révélant leur évolution sur 6 000 ans (Fechner *et al.*, 2014).

IV. — PROCESSUS DOMINANTS ET DATATION

Dans les stratigraphies sur limon étudiées en Nord – Pas-de-Calais et dans les régions limitrophes, on note avant tout la forte intervention de phénomènes pédologiques tels que la bioturbation, l'anthropisation, les labours et l'érosion-sédimentation. Pourtant, sur les sites aux sédiments non-calcaires, décalcifiés ou décarbonatés, le lessivage des argiles est considéré comme le principal processus pédologique au sein de ce qu'on appelle parfois, par convention, le « sol holocène », formant le sol brun lessivé. Pour sa formation, il importe avant tout que l'acidité soit compatible avec la migration d'argile (p. ex. Schroeder, 1992, p. 60-1, 93-4) et qu'il n'y ait ni nappe phréatique, ni roche peu ou non perméable à ce niveau. En cas

(*) INRAP Nord-Picardie, UMR 7041 ARSCAN (équipe "Archéologies environnementales"), associé à l'UMR 7362 LIVE (équipe « Dynamique des paysages »), Centre de recherches archéologiques de la Pilaterie, 11 rue des Champs, 59650 Villeneuve d'Ascq ; Kai.Fechner@inrap.fr

de limon plus profondément décarbonaté, on y observe des horizons bien différenciés tels que, de haut en bas, le « B dark » ou « B sombre », le « B_{2,t} » et le « B_{3,t} », dits « à doublets » (fig. 1-2). Sur d'autres matériaux parentaux de la région que les limons, la pédogenèse est parfois apparentée mais moins marquée. Sur les sites étudiés, ce processus de lessivage des argiles s'avère systématiquement antérieur à la période traitée ici (voir aussi Van Vliet-Lanoë, 1990 ; Van Vliet *et al.*, 1992). Un site stratifié du Mésolithique ancien traité en Moyenne Belgique permet d'attribuer l'essentiel de cette pédogenèse à une phase située entre 15 000 et 10 000 B.P., avec un achèvement peu important du processus de formation au début de l'Holocène (Fechner *et al.*, 2007).

Par contre, dans les stratigraphies des derniers 6 000 ans, on note la forte intervention d'autres phénomènes pédologiques. Il s'agit de la bioturbation, de l'anthropisation et des phénomènes combinant pédologie et lithologie, à savoir l'érosion-sédimentation à différentes échelles spatiales et d'intensité et avec différents taux de pénétration verticale, par labours avec déplacements de sédiment, en nappe, en rigole, en ravin (Langohr, 1990). Les dépôts de colluvions (fig. 1) sont actifs localement dès le Néolithique final (deux sites de Houplin-Ancoisne). Ils deviennent localement plus actifs à la Tène (p. ex. site d'Erre). A noter que ce phasage, s'il se confirme, serait semblable à ce que l'on observe en Champagne. Par contre, il serait décalé par rapport à certaines autres régions avoisinantes : la Moyenne Belgique limoneuse, au nord, ne connaîtrait de nettes attestations qu'à partir de l'époque gallo-romaine et certaines parties au moins d'Ile-de-France et de Moselle verraient le processus d'érosion-sédimentation être présent à de plus nombreux endroits dès l'âge du Bronze (Pastre

et al., 1997 ; Fechner *et al.*, 2014 ; Gebhardt *et al.*, 2014). En Picardie, un cas spectaculaire de colluvions en fond de vallée sec étudié à Saint-Quentin « Parc des Autoroutes » (Aisne) serait aussi du Bronze final. L'érosion aura tendance à remonter progressivement le long d'un versant, changeant le point d'inversion de sa courbe avec le temps, et donc aussi les endroits d'érosion maximale et de sédimentation (Langohr, 1990). Il s'agit aussi de tenir compte du fait que les dépôts colluviaux en fond de vallée ou en reprise alluviale peuvent parfois être décalés de plusieurs siècles par rapport au moment de leur érosion initiale comme le montrent les travaux menés dans la Limagne (Ballut, 2001).

V. — ANTHROPISATION PROGRESSIVE

La formation initiale (fig. 2), rencontrée par les occupants néolithiques, comprend le sol brun lessivé, uniquement marqué en surface par un horizon de surface très fin (il en reste 1 à 3 centimètres) et très peu humifère, résultat d'une bonne décomposition de la litière (p. ex. deux sites d'Houplin-Ancoisne (Nord), mais aussi de Carvin et de Verquin (Pas-de-Calais)). La bioturbation initiale est stationnelle, avant d'être accentuée avec le temps, renforcée entre autre par l'ajout d'engrais par l'homme. La bioturbation locale plus étendue, plus complète et profonde telle que définie comme sol anthropique ou *anthroposol* par Langohr (2001) apparaît notamment par endroits à Ribemont-sur-Ancre (Somme) dans un enclos laténien, à Bruyelle (Hainaut, Belgique), sous la cour de la *pars urbana* d'une villa, et un peu plus loin, à Saint-Brice-sous-Forêt (Val d'Oise), dans un enclos gallo-romain. La nette anthropisation par les mises en culture des sols apparaît aussi lorsqu'on compare les sites sous forêt et hors forêt sur et le long d'un tracé linéaire traversant la Moyenne Belgique, tel que le tracé belge du TGV entre Lille et Cologne.

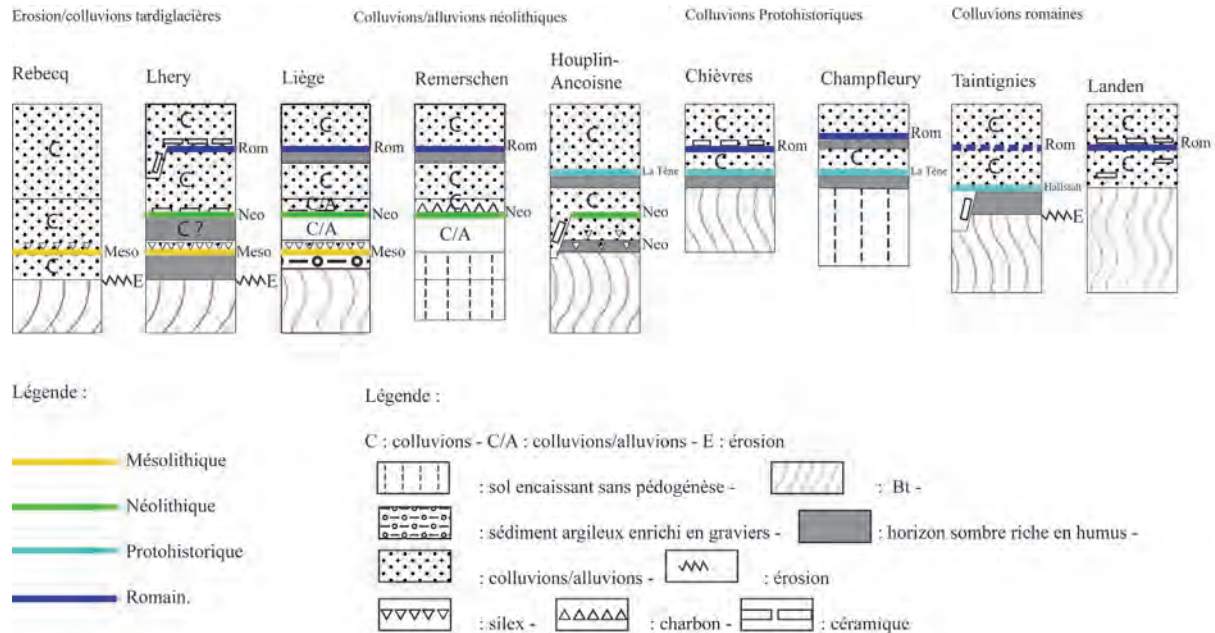


Fig. 1. — Colluvions et horizons de surface holocènes rencontrés en archéologie préventive. Juxtaposition de quelques-unes des séquences étudiées en Nord – Pas-de-Calais et dans des régions limitrophes (réal. C. LAURENT). Abréviations : Meso= Mésolithique, Neo= Néolithique, Rom= Romain.

Fig. 1. — Holocene colluvia and surface horizons found in survey archaeology. Juxtaposition of some of the sequences of Nord-Pas de Calais and surrounding regions (real. C. LAURENT). Abbreviations : Meso= Mésolithic, Neo= Néolithic, Rom= Romain.

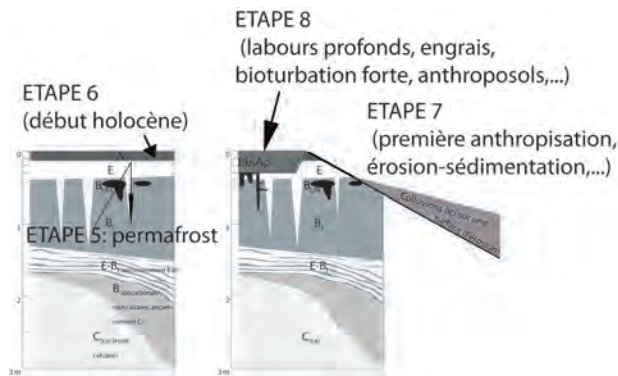


Fig. 2. Tentative de synthèse des processus holocènes dominants rencontrés pour les sites ruraux étudiés sur limons des plateaux, des versants et des vallées sèches de la région de l'étude (réal. K. FECHNER).

Fig. 2. — Attempted synthesis of the dominant Holocene processes found in rural sites on silty plateaus, slopes and dry valleys of the study area (réal. K. FECHNER).

Les sites hors forêt ou dans des forêts récentes s'y différencient non seulement par un pH redevenu neutre ou légèrement calcaire, mais aussi par un aplanissement du microrelief. Enfin, parmi les marques d'anthropisation les plus communes que l'on peut repérer et parfois dater sur les sites archéologiques, on signalera des phénomènes tels que les labours avec divers outils

aratoires et diverses méthodes d'amélioration des fertilités physique ou chimique, telle que, au contraire, la péjoration involontaire de ces fertilités, enfin telle que la pollution chimique, notamment par le phosphore. L'étude de ce dernier phénomène est particulièrement utile aux archéologues, lorsque sa corrélation spatiale et/ou stratigraphique avec un ensemble de structure(s) archéologique(s) permet d'attester d'une activité polluante plus ou moins précise, synchronique avec les occupations (Broes et al., 2013).

Les aspects liés aux cultures et aux occupations humaines ont aussi fait l'objet de cartographies par sujet et par époque dans le cadre du projet déjà mentionné (Fechner et al., 2014), mais dont il sera question ailleurs.

VI. — CONCLUSIONS

Le constat général qui ressort de ces études est la présence régulière dans les stratigraphies anciennes sur limon des derniers 6 000 ans, de phénomènes d'érosion et de bioturbation, de labours, de nivellements et de creusements anthropiques (fig. 2). Ce n'est donc pas le lessivage, phénomène pédologique post-dépositionnel surtout actif au Tardiglaciaire, mais l'érosion-sédimentation et la bio- et anthropo-turbation qui sont les plus présents, d'après les travaux de suivi des fouilles préventives. Ces dynamiques « récentes » se limitent avant tout à des phénomènes physiques, des modifications chimiques et à des phénomènes d'érosion et de sédimentation. Dans nos régions, la plupart sont étroitement liées à l'homme. Une étude plus approfondie des horizons de surface anciens et de leur utilisation agricole fera l'objet d'autres articles.

BIBLIOGRAPHIE

- BALLUT C. (2001). — Evolution géomorphologique et hydrologique dans les marais de Limagne au cours de la seconde moitié de l'Holocène (Massif Central, France). *Quaternaire* **12** (1-2) : 43-51.
- BROES F., CLAVEL V., DE CLERCQ W., FECHNER K., ROUPPERT V. & VANMOERKERKE J. avec la collaboration de CAMMAS C., CRÉTEUR Y., GAMBIER P., HULIN G., PRAUD I., VERDIN P. & ZECH-MATTERNE V. (2013). — A la recherche des espaces de stabulations. Étude pluridisciplinaire d'habitats de cas des périodes néolithique à médiévale dans le nord de la France, application du SIG. *Archéopages*, **35** : 6-17.
- FECHNER K., BAES R., LOUWAGIE G. & GEBHARDT A. avec la collaboration de DESCHODT L., BÉCU B. & SCHARTZ E. (2014). — Relic Holocene buried colluvial and alluvial deposition in the basins of the Scheldt, the Meuse, the Seine and the Rhine (Belgium, Luxembourg and Northern France). A prospective state of research in rescue excavations. In : MEYLEMANS E., POESEN J. & IN'T VEN I. eds., *The Archaeology of Erosion, the Erosion of Archaeology* (Conference, Brussels, 28-30 April 2008). *Relicta Monographien*, **9** : 147-190.
- FECHNER K., CLAVEL V., DEFLORENNE C. & CRÉTEUR Y. dir. (2014). — *Rapports 2011-2014 du projet PAS « Cartographie et base de données des structures et espaces interprétés de manière interdisciplinaire en Nord-Picardie. Un SIG pour les milieux ruraux de l'âge du Bronze au haut Moyen Âge en Nord-Picardie et dans les départements limitrophes »*. INRAP, Villeneuve d'Ascq : 151 p.
- FECHNER K., MESTDAGH H. & BOSQUET, D. avec la collaboration de HAESAERTS P., LANGOHR R., LOUWAGIE G. & SCHARTZ E. (2007). — Etude pédologique et micromorphologique. In : Bosquet D. dir., avec la collaboration de BEUGNIER V., COLLETTE O., FECHNER K., HEIM J., JADIN I. & MESTDAGH H., *Le site mésolithique ancien du « Spinoi » à Rebecq (Brabant wallon)*. Etudes et Documents—Archéologie, Service public de Wallonie, Namur : 26-41.
- GEBHARDT A., OCCHIETTI S. & FECHNER K. (2014). — Grandes phases de pédogenèse, d'érosion et d'anthropisation des sols au cours de la seconde moitié de l'Holocène en Lorraine [Soil anthropisation during the second half of the Holocene (Eastern France)]. *Archaeo-sciences*, **38** : 7-29.
- LANGOHR R. (1990). — L'homme et les processus d'érosion des sols limoneux de Belgique et du nord-ouest de la France. In : *Les Celtes en France du Nord et en Belgique, VIe - Ier s. av. J.C.* Catalogue de l'Exposition, Musée des Beaux Arts, Valenciennes : 211-222.
- LANGOHR R. (2001). — L'anthropisation du paysage pédologique agricole de la Belgique depuis le Néolithique ancien - Apports de l'archéopédologie. *Etude et gestion des sols*, **8** (2) : 103-118.
- PASTRE J.-F., FONTUGNE M., KUZUCUOGLU C., LEROYER C., LIMONDIN-LOZOUET N., TALON M. & TISNÉRAT N. (1997). — L'évolution tardi et postglaciaire des lits fluviaux au nord-est de Paris (France). Relations avec les données paléoenvironnementales et l'impact anthropique sur les versants. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, **3** (3-4) : 291-312.
- SCHROEDER W. E. H. (1992). — *Bodenkunde in Stichworten*. Hirt, Berlin & Stuttgart : 176 p.
- VAN VLIET-LANOË B. (1990). — The genesis and age of the argillic horizon in Weichselian loess of northwestern Europe. *Quaternary International*, **5** : 49-56.
- VAN VLIET B., FAGNART J.P., LANGOHR R. & MUNAUT A.V. (1992). — Importance de la succession des phases écologiques anciennes et actuelles dans la différenciation des sols lessivés de la couverture lœssique d'Europe occidentale : argumentation stratigraphique et archéologique. *Science du Sol*, **30** : 75-93.

ENVIRONNEMENT FONCTIONNEL D'HABITATS ANCIENS (NEOLITHIQUES, PROTOHISTORIQUES, GALLO-ROMAINS ET MEDIEVAUX) DU NORD DE LA FRANCE (PICARDIE, NORD - PAS-DE-CALAIS). APPROCHE PAR LA CARTOGRAPHIE DU PHOSPHORE

Functional environments of ancient settlements (Neolithic, Protohistoric, Roman and Medieval) in the north of France (Picardy, Nord - Pas-de-Calais). An approach based on phosphate mapping

par Frédéric BROES (*), Viviane CLAVEL (**), Kai FECHNER (***), avec la collaboration de Yves CRETEUR (**),
Guillaume HULIN (****), Cécile MAICHER & Matthieu LE BAILLY (*****)

Mots clés. – Archéologie, Holocène, pédologie, chimie, phosphates.
Key words. – Archaeology, Holocene, soil science, chemistry, phosphates.

La cartographie du phosphore s'est initialement développée (première moitié du XX^e siècle) comme une méthode de prospection, utilisée essentiellement dans les pays scandinaves. Cette approche a par la suite été appliquée aux surfaces décapées afin d'étudier l'environnement fonctionnel d'aménagements architecturaux (habitation, grenier, étables) et structuraux (zone de basse cour, zone de pacage, cultures) mis au jour lors de fouilles archéologiques. La concentration en phosphore du sédiment reflétant la hauteur des apports en matières organiques concentrées (excréments, végétaux), en cendres ou en ossements, cet élément a été privilégié comme indice de l'anthropisation d'un sol. Le phosphore est également un élément relativement stable dans le sol, ce qui explique qu'il nous est possible d'identifier des accumulations pouvant dater de plusieurs milliers d'années. L'origine ancienne d'un enrichissement doit évidemment être confirmée par la corrélation entre la répartition de l'accumulation de phosphore et le plan et/ou la stratigraphie archéologique.

Les paramètres à enregistrer, afin de permettre une interprétation valable des résultats d'analyse, lors de l'échantillonnage sont nombreux (Devos *et al.*, 2011). Le comportement du phosphore dans le sol est en effet fortement influencé par la nature du substrat (pH, drainage, capacité d'échange cationique, matière organique, texture, structure), le niveau de bioturbation ainsi que par le degré d'érosion. La campagne de prélèvement doit par conséquent être précédée par une étude pédologique rigoureuse de l'horizon à étudier. Une cartographie du phosphore vise à la différenciation fonctionnelle des espaces au sein des aménagements architecturaux et structuraux ainsi qu'à la détermination des relations fonctionnelles entre les aménagements et leur environnement proche. Ce type d'approche a

d'abord été mis en pratique en Belgique, au Luxembourg, en Lorraine, en Ile-de-France, dans le Nord – Pas-de-Calais et en Champagne - Ardenne (Fechner *et al.*, 2011 ; Fechner, 2011). L'étude répétée de bâtiments, d'enclos de formes différentes, de sols d'occupation, de fosses, de structures de combustion, de rejets d'incendie, de fossés et de levées de terre a permis d'y cerner avec précision les facteurs à prendre en considération lors de la réalisation d'une cartographie du phosphore sur un site archéologique. Les données recueillies ont également participé à l'élaboration d'un référentiel permettant l'interprétation des résultats de cartographie du phosphore en terme fonctionnel. Cette méthode a ensuite été affinée et systématisée sur les sites du tracé du Canal Seine-Nord-Europe (CSNE). La multiplication relative des échantillons y a permis le traitement statistique des données et l'interpolation des résultats afin de fournir aux archéologues des données plus pertinentes et plus facilement intelligibles (Broes *et al.*, 2013). Les données obtenues ont été confrontées aux cartographies de la susceptibilité magnétique (Hulin *et al.*, 2013), aux résultats des analyses parasitologiques (Maicher & Lebailly, 2014), phytolithiques (Chevalier, inédit), micromorphologiques et carpologiques/anthracologiques afin de proposer des hypothèses fonctionnelles pertinentes.

Ces années d'études permettent aujourd'hui de proposer une première hypothèse quant à la logique d'utilisation de ces divers aménagements à différentes périodes, de leur évolution fonctionnelle et de leur adaptation aux conditions pédologiques. Nous pouvons ainsi mentionner les sites néolithiques de Sauchy-Lestree "le Mont de Trois Pensées" (CSNE) et de Villers-Carbonnel (CSNE), les occupations protohistoriques de Glisy (80), Marquion (59), Eterpigny (80), Haspres (59), Ribemont-sur-Ancre (80), les

(*) INRAP - Canal Seine-Nord Europe, UGent HARG , 16 rue Général Leclerc, 80400 Croix Molineaux ; frederic.broes@inrap.fr

(**) INRAP Nord-Picardie, Centre de recherches archéologiques de la Pilaterie, 11 rue des Champs, 59650 Villeneuve ; viviane.clavel@inrap.fr / yves.creteur@inrap.fr

(***) INRAP Nord-Picardie, UMR 7041 ARSCAN (équipe "Archéologies environnementales"), associé à l'UMR 7362 LIVE (équipe « Dynamique des paysages »), Centre de recherches archéologiques de la Pilaterie, 11 rue des Champs, 59650 Villeneuve d'Ascq ; Kai.Fechner@inrap.fr

(****) INRAP - Centre-Ile-de-France , UMR 7619-Sisyphé, 148 avenue André Maginot, 37000 Tours ; guillaume.hulin@inrap.fr

(*****) Université de Franche-Comté, CNRS UMR 6249 Chrono-Environnement, 16 Route de Gray, 25030 Besançon cedex, France ; matthieu.lebailly@univ-fcomte.fr"

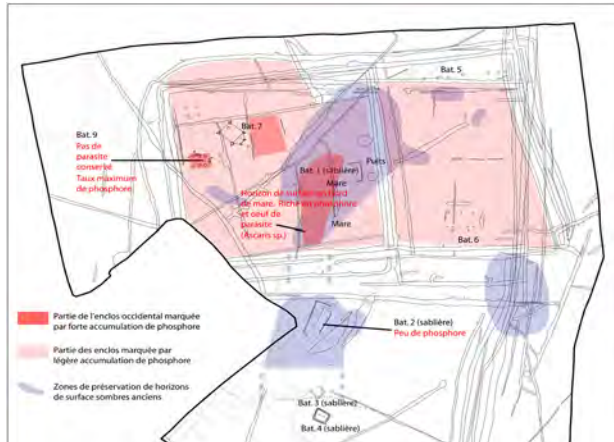
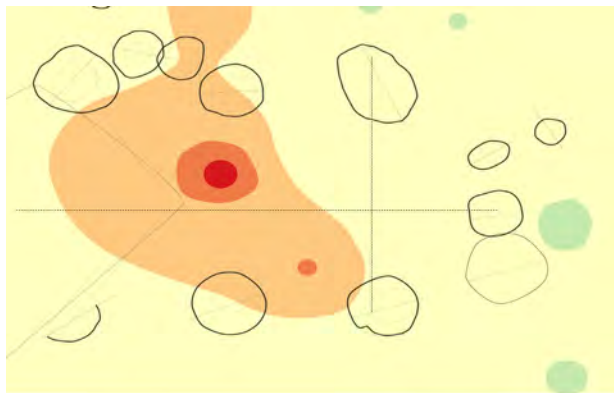


Fig. 1. — Plan simplifié des répartitions de phosphore dans les enclos gallo-romains de Lesquin, montrant que l'enclos occidental est plus riche en phosphore.

Fig. 1. — Simplified phosphate mapping of the roman enclosure of Lesquin, showing that the western enclosure is richer in phosphorus.



implantations gallo-romaines de Lesquin (59 : Fig. 1-2), Catigny (80), Allaines (80), Cizancourt (80), Noyon (80), Raillancourt-Sainte-Olle (62) et Nesle-Mesnil-Saint Nicaise (80), et enfin les sites médiévaux de Craywick, Loon-Plage (59), Couloisy (59) et Bierne (59). Ce tour d'horizon nous permet de lister les conditions minimales requises pour l'obtention de résultats pertinents et de présenter les sites ayant livré les données les plus intéressantes. Les études en cours sur les habitats étendus des sites de Marquion (59, protohistoire) et du vicus gallo-romain de Famars (59), aux sols d'occupation ("A") préservés ou peu arasés sur de larges surfaces, permettent également, de manière exceptionnelle, d'avoir accès aux accumulations de phosphore dans leur horizons d'origine. Il s'agit d'une opportunité nous permettant de corréliser les données récoltées sur surfaces décapées arasées ("Bt") aux résultats dans la surface d'occupations, puis à ceux obtenus sur des habitations ou lieux d'élevages récents. Le grand nombre d'études menées avec succès par l'équipe INRAP du CSNE et de Nord-Picardie est lié à la prise en compte, dès le terrain, des paramètres pédologiques. Cette optimisation des cartographies du phosphore explique l'intégration croissante de ce type d'approche dans l'étude d'un site archéologique. La synthèse des résultats est réalisée dans le cadre d'un projet SIG mis en place avec Y. Créteur de l'INRAP (projet PAS : Fechner *et al.*, 2014). Ce projet est également une plateforme permettant le croisement des données provenant des sciences naturelles (parasitologie, botanique, archéozoologie), des sciences humaines (ethnographie, typologie des bâtiments, textes des auteurs anciens) et de la géophysique (résistivité électrique, susceptibilité magnétique).

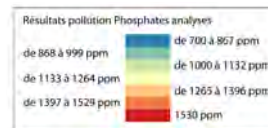


Fig. 2. — Plan Surfer de la petite étable supposée dans l'enclos occidental (responsable d'opération : C. DEFLORENNE, INRAP; réalisation : Y. CRETEUR).

Fig. 2. — Plan of the supposed stable in the western enclosure, produced with the Surfer software (responsible of the excavation: C. DEFLORENNE, INRAP; realisation: Y. CRETEUR).

BIBLIOGRAPHIE

- BROES F., CLAVEL V., DE CLERCQ W., FECHNER K., ROUPPERT V. & VANMOERKERKE J. avec la collaboration de CAMMAS C., CRETEUR Y., GAMBIER P., HULIN G., PRAUD I., VERDIN P. & ZECH-MATTERNE V. (2013). — A la recherche des espaces de stabulations. Étude pluridisciplinaire d'habitats de cas des périodes néolithique à médiévale dans le nord de la France, application du SIG. *Archéopages*, **35** [octobre 2012 : « Vivre avec les bêtes »] : 6-16.
- DEVOS Y., FECHNER K. & MIKKELSEN J.H. (2011). — The application of phosphorus cartography to archaeological structures: the development of a protocol. In : FECHNER K., DEVOS Y., LEOPOLD M. & VÖLKEL J. (eds.), *Archaeology, soil- and life sciences applied to enclosures and fields*. European Association of Archaeologists, 12th Annual Meeting (Krakow-Poland, 19-24 September 2006; First volume of the proceedings of the session 'From microprobe to spatial analysis – Enclosed and buried surfaces as key sources in Archaeology and Pedology'). *British Archaeological Records. International Series*, **2222**: 9-28.
- FECHNER, K. (2011). — Case studies of phosphorus mapping in Late La Tène to Roman enclosures and ponds between Rhine and Seine. In : FECHNER K., DEVOS Y., LEOPOLD M. & VÖLKEL J. (eds.), *Archaeology, soil- and life sciences applied to enclosures and fields*. European Association of Archaeologists, 12th Annual Meeting (Krakow-Poland, 19-24 September 2006; First volume of the proceedings of the session 'From microprobe to spatial analysis – Enclosed and buried surfaces as key sources in Archaeology and Pedology'). *British Archaeological Records. International Series*, **2222**: 29-64.
- FECHNER K., CLAVEL V., DEFLORENNE C. & CRÉTEUR Y. DIR. (2014). — *Rapports 2011-2014 du projet PAS « Cartographie et base de données des structures et espaces interprétés de manière interdisciplinaire en Nord-Picardie. Un SIG pour les milieux ruraux de l'âge du Bronze au haut Moyen Âge en Nord-Picardie et dans les départements limitrophes »*. INRAP édit., Villeneuve d'Ascq : 151 p.
- FECHNER K., DE LIL A., CLAVEL V., HUS J. & TEHEUX E. (2011). — Méthodes et résultats de la cartographie du phosphore dans des bâtiments allongés du Néolithique dans le nord de la France et en Wallonie. In : BOSTYN F., MARTIAL E. & PRAUD I. (eds.), *Le Néolithique du nord de la France dans son contexte européen : habitat et économie aux 4e et 3e millénaires avant notre ère* (Actes du 29e Colloque interrégional sur le Néolithique, Villeneuve d'Ascq, 2-3 octobre 2009). *Revue archéologique de Picardie*. N° spécial **28** : 275-297.
- HULIN G., BROES F. & FECHNER K. (2012). — Caractérisation de phénomènes anthropiques par la mesure de paramètres magnétiques sur surface décapée. Premiers résultats sur le projet canal Seine-Nord Europe. *Archéosciences*, **36** : 61-70.
- MAICHER C. & LEBAILLY M. (2014). — *Sites étudiées dans le cadre du projet PAS 2712 de l'INRAP – Compte-rendu de l'analyse paléoparasitologique*. Rapport, Université de Besançon : 13 pages.

GEOARCHEOLOGIE ENTRE ZONES LITTORALES ET SYSTEMES CONTINENTAUX (MER DU NORD – MANCHE, NORD DE LA FRANCE)

Geoarchaeology between coastal and continental zones (Northern Sea – English Channel, Northern France)

par Murielle MEURISSE-FORT (*)

Mots clés. – Paléoenvironnement, littoral, plaine alluviale, base de données géoarchéologique, Nord de la France.
Key words. – *Palaeoenvironment, coastal zone, alluvial plain, geoarchaeological database, Northern France.*

I. — INTRODUCTION

L'archéologie se nourrit d'une documentation variée, faite d'artefacts et d'écofacts pour partie potentiellement issus du milieu naturel. La géoarchéologie propose une reconstitution du paysage dans lequel évoluaient les populations humaines. Elle permet également de mieux appréhender les traces d'activités humaines, participant à une meilleure évaluation et compréhension des sites. Ainsi, les interactions possibles entre l'homme et son milieu sont mieux définies, avec des investigations adaptées aux différentes périodes culturelles traitées. Pour y parvenir, ces études volontairement interdisciplinaires s'appuient sur des informations aussi bien archéologiques et géologiques, que géomorphologiques ou écologiques, avec une approche croisée des données.

II. — CONTEXTE

Le Nord de la France est un territoire varié du point de vue géomorphologique, avec une succession d'estrans sableux, baies, caps, dunes, estuaires, marais maritimes, fleuves, vallées et versants. Ces paysages sont bordés par la Mer du Nord et la Manche, reliées par le détroit du Pas de Calais, avec une double exposition vers le nord et l'ouest. La focalisation des études paléoenvironnementales récentes autour de cette zone fait écho à la qualité et au potentiel d'information disponible : les faciès sédimentaires sont bien préservés tandis que la multiplication des sites archéologiques toutes périodes culturelles confondues permet de compléter finement les données purement géologiques et de prendre la mesure des interactions entre l'occupation du territoire et son évolution environnementale. Ces nouvelles recherches s'inscrivent dans la ligne directrice de travaux menés ces dernières années sur le littoral (plaine maritime flamande, Boulonnais et sud-Boulonnais) (par ex. Gandouin, 2003 ; Meurisse-Fort, 2009), tout en élargissant la zone d'étude au domaine fluvial. Cet élargissement s'inscrit dans une logique de continuité, puisque les systèmes fluviaux sont à l'interface entre la zone littorale profondément mouvante à l'Holocène et la zone continentale de prime abord plus stable mais néanmoins dynamique (colluvions, pédogenèse, aménagements...). C'est cette complexité microtopographique que nous cherchons désormais à modéliser, tant elle s'avère primordiale pour la compréhension des implantations anthropiques et des aménagements associés.

Les travaux présentés se concentrent sur les systèmes littoraux et fluviaux de la Mer du Nord et de la Manche à l'Holocène

(Mésolithique – Bas Moyen Âge). Dans ce contexte, les études s'étendent prioritairement depuis la plaine maritime flamande jusqu'au nord du bassin-versant de l'Authie. Néanmoins, des corrélations ponctuelles sont également posées avec les zones internes où les modifications paysagères des plaines alluviales (Aa, Canche) sont en cours d'étude. Le but est de caractériser des liens éventuels entre l'intérieur des terres et le littoral et de parfaire les méthodologies employées (Bruniaux, 2014 ; Masse *et al.*, 2011, 2012, 2014 ; Masse & Meurisse-Fort, 2013).

III. — METHODOLOGIE

Les études géoarchéologiques sont réparties autour de trois approches complémentaires : la géologie, la pédologie et la paléoécologie. Les études stratigraphiques fines (coupes, sondages, tranchées et fouilles archéologiques, carottages) sont complétées par des datations (14C, OSL, mobilier archéologique) pour fournir un cadre chronostratigraphique argumenté et fiable. Celui-ci est ensuite étayé par un ensemble raisonné d'études paléoenvironnementales (paléobotanique, archéozoologie, micromorphologie et phosphates). Ces informations préférentiellement issues d'opérations archéologiques sont également combinées à des données géomatiques ou à d'autres travaux de recherche (BRGM, données géotechniques et historiques, mémoires universitaires). Ainsi, les facteurs qui ont modelé le paysage, qu'ils soient naturels ou anthropiques, sont directement intégrés dans les reconstitutions proposées. Une impulsion supplémentaire a été donnée grâce au développement de deux bases de données (« géologique » et « géoarchéologique »). Celles-ci viennent notamment compléter deux bases archéologiques en cours d'évolution : la Carte archéologique nationale gérée par le Service Régional de l'Archéologie et le Système d'Information Archéologique développé par le Centre départemental d'Archéologie du Pas-de-Calais (CDA62). La base de données géologique a été initiée dès 2010 à partir d'études concentrées autour de la Canche. Le but est de faciliter les restitutions cartographiques paléoenvironnementales en posant les limites spatiales et temporelles des différentes formations superficielles inventoriées. Les données (Banque du Sous-Sol - BSS du BRGM, études universitaires, opérations d'archéologie préventive du CDA62, sondages géotechniques) ont d'abord été synthétisées dans un tableau puis combinées à des outils SIG libres (SQLite, Qgis) pour permettre l'exploitation cartographique des informations (Bruniaux, 2014 ; Marcucci & Meurisse-Fort, 2010).

(*) Centre départemental d'Archéologie du Pas-de-Calais, Conseil départemental du Pas-de-Calais, Hôtel du Département, rue Ferdinand Buisson, 62018 Arras cedex 9 ; Meurisse.fort.murielle@pasdecalais.fr

IV. — RESULTATS

Les études géoarchéologiques menées contribuent à poser les bases d'un système chronostratigraphique argumenté, continuellement amendé grâce aux opérations archéologiques notamment préventives. L'évolution paléoenvironnementale séquencée proposée intègre non seulement les variations eustatiques mais aussi les fluctuations climatiques (notamment les tempêtes) et les interactions anthropiques potentielles (Meurisse-Fort, 2009 ; Meurisse-Fort & Philippe, 2012). Des corrélations interrégionales élargies à la Mer du Nord et à la Manche favorisent aussi l'incorporation des données nouvelles dans le cadre nord-ouest européen. L'étude conjointe de ces données souligne déjà le lien indéniable existant entre l'évolution littorale et la dynamique d'occupation des sites. De nombreux points restent néanmoins à préciser tels que l'impact de la géomorphologie, les taux de compaction des sédiments ou des strates organiques (par ex. Griffiths *et al.*, 2015) ou même les pourcentages d'érosion. Concernant les relations Homme – milieu, les interactions commencent à se matérialiser même si les relations de cause à effet demeurent complexes et difficiles à établir (Meurisse-Fort & Philippe, 2012 ; Meurisse-Fort, sous presse). L'analyse croisée des données s'est donc poursuivie, matérialisée notamment par la création de bases de données communes. Principalement testée pour les bassins-versants de la Canche (Bruniaux, 2014 ; Marcucci & Meurisse-Fort, 2010) et de la Liane (Meurisse-Fort & Bruniaux, 2014), elle continue aujourd'hui d'être alimentée en fonction des opérations réalisées. Cette base vise à référencer l'ensemble des sondages géologiques effectués sur le territoire du Pas-de-Calais et ses alentours, tout opérateur, institution et discipline confondus (archéologie, géologie, géotechnique). Elle comprend une *table sondages* et une *table niveaux*. La *table sondages* reprend, outre la localisation du sondage (géoréférencement, coordonnées en Lambert 93, commune...), des informations sur l'auteur du sondage, l'année de réalisation, la fiabilité des données et bien évidemment les identifiants des sondages et leurs correspondances (identifiant unique attribué pour chaque sondage, idsd). Les sondages non fiables ou non utilisables sont ainsi éliminés de la chaîne de traitement. La *table niveaux* permet d'individualiser

toutes les unités stratigraphiques relevées dans un sondage (niveaux), représentées chacune par une ligne. Chaque ligne contient des informations sur l'environnement de dépôt, la période géologique de formation et les altitudes du toit et de la base de l'unité. Un identifiant unique est attribué à chaque ligne-niveau (idnx) et tous les niveaux sont associés à leur sondage grâce à son identifiant unique (idsd). L'essentiel des données traitées est issu de la BSS du BRGM, ce qui a permis de commencer à recenser les informations disponibles sur un secteur relativement large (BRGM-Infoterre, 2014). Cependant, les informations recueillies se sont avérées lacunaires, tant en termes stratigraphiques qu'en termes chronologiques. En effet, même si certains sondages permettent d'avoir une idée un peu plus précise des formations superficielles, l'absence de datation directe des unités identifiées rend toute corrélation fiable quasiment impossible en l'état. Le recensement de ces données permet néanmoins de poser, a minima, les bases d'une reconstitution du toit du substrat.

V. — PERSPECTIVES

Les fondations d'une base de données géoarchéologique ont été posées depuis 2012 au CDA62, venant compléter d'autres travaux menés sur ce secteur d'étude. Son évolution, en partenariat désormais avec différentes institutions et opérateurs archéologiques, favorisera l'interdisciplinarité. Les travaux de recherche proposés conjointement mettent l'accent sur deux thématiques spécifiques, mêlant étroitement données archéologiques et paléoenvironnementales : l'évolution holocène du littoral et des systèmes fluviaux associés ainsi que l'étude des ressources naturelles disponibles.

Remerciements. — Les résultats présentés sont la synthèse de travaux menés notamment au CDA62 mais également dans le cadre de divers projets de recherche dont les PCR Quentovic et Boulogne Antique. Je tiens donc à remercier M. Marcucci, J.-R. Morreale, A. Masse, J.-L. Marcy, E. Panloup, L. Verslype, I. Leroy, A. Trentesaux, E. Armynot du Châtelet, E. Gandouin, B. Van Vliet-Lanoë, D. Cense-Bacquet, G. Bruniaux, A. Demon, O. Blamangin et toutes les équipes qui ont contribué à ces travaux.

BIBLIOGRAPHIE

- BRGM-INFOTERRE (2014). — Site Infoterre : portail géomatique d'accès aux données géoscientifiques du Bureau des Recherches Géologiques et Minières (BRGM). World Wide Web address : <http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do> (consulté le 19 février 2015).
- BRUNIAUX G. (2014). — *Etude des fonds de vallée dans le Pas-de-Calais et corrélations avec des fouilles mésolithiques*. Université de Rennes 1 et Centre départemental d'Archéologie du Pas-de-Calais, Mémoire de Master 2 « Préhistoire, paléontologie et paléoenvironnement – Spécialité Archéologie préhistorique » : 48 p.
- GANDOUIN E. (2003). — *Enregistrement paléoclimatique de la transgression Holocène : signature paléoenvironnementale des Chironomidae (Diptères) du bassin de Saint-Omer (France)*. Thèse de doctorat. ANDRA éditions, Paris : 256 p.
- GRIFFITHS S., STURT F., DIX J. K., GEAREY B. & GRANT M. J. (2015). — Chronology and palaeoenvironmental reconstruction in the sub-tidal zone: a case study from Hinkley Point. *Journal of Archaeological Science*, **54** : 237-253.
- MARCUCCI M. & MEURISSE-FORT M. (2010). — *Reconstitution cartographique du paléoenvironnement estuarien de la Canche durant l'Holocène*. Université de Bourgogne et Centre départemental d'Archéologie du Pas-de-Calais, Mémoire de Master 2 « Archéoscience et Géo-environnement » : 58 p.
- MASSE A., MERKENBREACK V., MEURISSE-FORT M., LACHAUD C., WILKET L. & MARCY J.-L. (2012). — *Zone d'expansion de crues de l'Aa, Verchocq/Rumilly (Pas-de-Calais), « Prés de Verchocq »*. Rapport final d'opération, diagnostic. Centre départemental d'Archéologie du Pas-de-Calais, Arras : 77 p.
- MASSE A. & MEURISSE-FORT M. (2013). — *Zone d'expansion de crues de l'Aa, Seninghem (Pas-de-Calais), « Prés de Bayenghem »*. Rapport final d'opération, diagnostic. Centre départemental d'Archéologie du Pas-de-Calais, Arras : 50 p.
- MASSE A., MEURISSE-FORT M., AGOSTINI H. & WILLOT J.-M. (2014). — *Zone d'expansion de crues de l'Aa, Saint-Martin-d'Hardinghem, « barrage Legrand »*. Rapport final d'opération, diagnostic. Centre départemental d'Archéologie du Pas-de-Calais, Arras : 114 p.
- MASSE A., TACHET N. & MEURISSE-FORT M. (2011). — Un atelier de saunier gaulois d'arrière pays à Gouy-Saint-André "Le Rossignol" (Pas-de-Calais) : présentation générale. *Revue du Nord*, **93** (393) : 13-36.
- MEURISSE-FORT M. (2009). — *Enregistrement haute résolution des massifs dunaires ; Manche, mer du Nord et Atlantique - Le rôle des tempêtes*. Université de Lille1, Thèse de Doctorat en géologie, EPU-Publibook edit., Paris : 310 p.
- MEURISSE-FORT M. (sous presse). — L'environnement littoral du Pas-de-Calais à l'Holocène. In : VERSLYPE L. ed., *Culture des littoraux (Actes de la table ronde internationale de Boulogne s/Mer, 2010)*. *Revue du Nord – Hors-série Art et Archéologie*.
- MEURISSE-FORT M. & BRUNIAUX G. (2014). — Traitement des données géologiques dans le cadre du PCR Boulogne Antique. In : DEMON A. & BLAMANGIN O. eds, *PCR Atlas Topographique de la Ville Antique de Boulogne-sur-Mer*. Rapport d'activité 2014. Villeneuve d'Ascq : 47-54.
- MEURISSE-FORT M. & PHILIPPE M. (2012). — Environnement et navigation maritime en Manche-Mer du Nord : une longue histoire. In : LEHOËRFF A., BOURGEOIS J., CLARK P. & TALON M. eds, *Par-delà l'Horizon, Sociétés en Manche et Mer du Nord il y a 3 500 ans* (Catalogue d'exposition, projet européen Interreg IVa). Somogy éditions d'Art, Paris : 16-21.

LA GEOARCHEOLOGIE EN WALLONIE

Geoarchaeology in Wallonia

par Olivier COLLETTE (*)

Mots clés. – Géoarchéologie, travail de terrain, analyses spatiales, analyse paysagère.
Key words. – *Geoarchaeology, fieldwork, spatial analysis, landscape analysis.*

Les scientifiques qui orientent une partie de leurs recherches vers l'archéologie sont nombreux et issus de disciplines variées. Il s'agit généralement de collaborations occasionnelles répondant à des questions spécifiques. Les sciences de la Terre y occupent une place privilégiée, se concrétisant généralement par des assistances assidues et établies à long terme. En effet, l'archéologue qui explore le passé à travers des traces inscrites dans le sous-sol, le sol ou le paysage a régulièrement besoin d'éclairages adaptés pour comprendre ces contextes et les transformer en connaissance. En Wallonie, la direction de l'archéologie a compris cette situation et a développé depuis de nombreuses années de telles collaborations. En 2009, le Service Public de Wallonie a ainsi intégré au sein de son administration deux géologues. L'un (Stéphane PIRSON) est engagé en tant que spécialiste de la stratigraphie et de la genèse des sites préhistoriques, en particulier en contextes loessiques et karstiques tandis que l'autre (Olivier COLLETTE) est engagé comme géo-pédologue. Ces spécificités les portent vers des sites et des thèmes d'étude assez différents, le premier consacre la majorité de son temps aux époques préhistoriques, alors que les époques historiques sont plutôt du ressort du deuxième. Leurs pratiques géoarchéologiques varient fort en fonction des interventions, des découvertes et des publications. Cette diversité leur permet difficilement d'approfondir des connaissances spécifiques. Loin d'en faire des scientifiques frustrés, le fait de rendre utiles des connaissances issues des sciences de la Terre et de voir certaines questions archéologiques résolues entretiennent leur motivation.

Globalement, les géoarchéologues manipulent les mêmes matériaux, les mêmes outils et les mêmes données que les archéologues mais avec un angle de vue spécifique. Les opérations de terrain consistent principalement en la description et l'interprétation de sédiments tant naturels qu'anthropiques. Ce sont les vestiges archéologiques qui sont

concernés mais leurs pratiques les amènent souvent à des changements d'échelle, tant macro- que microscopiques, ce qui offre des mises en perspectives intéressantes. Les principales questions portent sur le taux d'érosion, la stratigraphie relative, les processus sédimentaires, l'identification de phénomènes géo-pédologiques et de leurs liens avec des occupations anciennes, et la reconstitution du contexte géomorphologique. Les « géodonnées » sont régulièrement intégrées à un système d'information géographique. Récemment, des analyses spatiales ont été menées afin d'identifier des éléments géomorphologiques du territoire wallon sur base de critères archéologiques. Les applications sont nombreuses, elles permettent notamment d'estimer des surfaces concernées par des découvertes ponctuelles, de mettre en évidence des potentiels d'occupation du sol, voire la présence de sites. Le caractère prédictif des couches produites exige malgré tout de la prudence car les analyses se fondent sur des connaissances établies, excluant par conséquent le potentiel et l'inconnu.

Contrairement à une idée généralement véhiculée, nos paysages ne résultent pas du contexte naturel mais sont le résultat du travail de l'homme sur son environnement. Le paysage tel qu'il nous est accessible est constitué d'une série de traces plus ou moins diffuses, témoins d'occupations anciennes du territoire. Le géoarchéologue a la possibilité de mettre en évidence certaines traces du paysage. Un tel exercice, qualifié d'analyse paysagère, est présenté brièvement pour la ville de Mons (Fig. 1). La géoarchéologie occupe une place privilégiée au sein de l'archéologie wallonne. Les collaborations sont nombreuses et variées. Par les liens de complémentarité et de synergie elles sont amenées à se développer dans le futur. Quels que soient les exemples abordés l'objectif du spécialiste est de donner accès aux informations issues des sciences de la Terre pour qu'elle se transforme en connaissance archéologique.

(*) Service Public de Wallonie, DGO4, Direction de l'Archéologie, Rue des Brigades d'Irlande, 1, B-5100 Namur (Belgique) ; olivier.collette@spw.wallonie.be



Fig. 1. — Illustration de l'analyse paysagère de la ville de Mons (dessinatrice : Aude VAN DRIESSCHE).

Fig. 1. — Picture of the landscape analysis of the city of Mons (draftswoman : Aude VAN DRIESSCHE).

PAUL SARTENAER (1925 - 2015)

par Denise BRICE (*)

Le premier juillet 2015, la Communauté scientifique perdait un éminent chercheur qui a consacré soixante années de sa vie à l'étude systématique des rhynchonellides et des spiriférides (Brachiopodes) à l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique à Bruxelles. Ses recherches visaient à définir des taxons susceptibles de fixer des limites stratigraphiques et d'établir des corrélations dans le Dévonien et le Carbonifère inférieur de nombreuses régions du monde. Paul Sartenaer est né à Bruxelles et il y a vécu avec sa famille principalement place Sainte Catherine située au centre de la ville. Etudiant au Collège Royal Marie-Thérèse de Herve, il fit ses études supérieures dans les Ecoles spéciales des Mines, du Génie civil, des Arts et Manufactures, d'Architecture et d'Electricité à l'Université Catholique de Louvain où il acquit son diplôme d'Ingénieur civil des Mines en 1948 suite à son engagement dans la Résistance en 1944 (service actif) comme volontaire de guerre en 1948. Il fut licencié en Sciences géologiques et minéralogiques en 1950. Sa carrière scientifique s'est déroulée à l'Institut royal des Sciences naturelles



de Belgique où il sera d'abord naturaliste stagiaire puis naturaliste avant de devenir Sous-Directeur de Laboratoire (1958), Directeur de Laboratoire (1965), Chef du département de la Section des Invertébrés primaires (1969) puis Chef du département de Paléontologie et Chef de département honoraire en 1990.

En évoquant sa carrière, nous verrons qu'il assumait conjointement toutes ces fonctions avec une recherche intensive. Ainsi, dès 1955, il souligne la confusion entre deux genres de brachiopodes rhynchonellides (*Nudirostra*, *Camarotoechia*) et précise leurs caractères externes et internes basés sur des sections séréées de *Nudirostra*. Il sera le premier à appliquer cette méthode des sections séréées à l'étude des brachiopodes, méthode à laquelle de nombreux chercheurs (dont je suis) s'initieront dans son laboratoire. En 1956, il considère comme erronées les interprétations de Forir (1895-1901 ; Forir *et al.*, 1900) basées sur des espèces de rhynchonelles *dumonti*, *omaliusi*, *triaequalis* et de spirifère *Cyrtiopsis purchisonanus* du Famennien inférieur de Belgique et, la même année, il crée deux biozones dans le Famennien inférieur de Belgique basées sur la distribution de deux espèces de rhynchonelles (dont une nouvelle) de *Pugnoides* Weller. En 1957, il franchit une étape supplémentaire en publiant une esquisse de la biozotation des dépôts famenniens et démontre l'intérêt mondial que représentent cinq espèces de rhynchonelles famenniennes : deux de l'ouest canadien, deux des Etats-Unis d'Amérique et une de Belgique, pour l'améliorer. Il consacre une note à chacune en précisant leurs caractères externes et internes et crée pour elles, en 1961, ses cinq premiers nouveaux genres.

Soulignons l'originalité de ce chercheur qui s'intéressait assez à l'actuel pour effectuer, en 1959, une plongée en scaphandre autonome dans le golfe de Fos afin de découvrir les faunes sous-marines. Il publiera, en 1963, dans « *Ecologie des Brachiopodes paléozoïques à la lumière de l'écologie actuelle* » et « *Nos yeux sous la mer* », ses réflexions sur nos connaissances sous-marines en paléocéologie. Son intérêt pour la stratigraphie du Dévonien supérieur en Belgique l'a conduit à démontrer, en 1974, les confusions résultant de l'emploi d'expressions telles que : « Schistes de Matagne, Schistes de Barvaux... » faute de définition claire de ces unités. Dès 1970, il rappelle que les limites d'étages, telle que celle Frasnien/Famennien, sont fixées par la faune et rappelle, en 1973, que cette limite à Senzeilles, définie par Gosselet (1877), est basée sur l'apparition du spirifère *Cyrthia purchisoniana*, espèce qu'il rattachera, en 1956, au genre *Cyrtiopsis* abondamment représenté dans le Famennien inférieur de Belgique. En 1985, il donnera la distribution mondiale des genres de rhynchonellides aux limites Givétien/Frasnien et Frasnien/Famennien correspondant aux zones à conodontes.

(*) Université Catholique de Lille, 48 Bd. Vauban, F-59046 Lille Cedex ; d.brice@isa-lille.fr

Membre titulaire puis correspondant de la SDS (Subcommission on Devonian Stratigraphy : <http://unica2.unica.it/sds/>), et de l'International Working Group on the Devonian-Carboniferous boundary, Paul Sartenaer, polyglotte, a participé activement à de nombreux « meetings », réunions organisées dans différents pays, où étaient et sont discutées par des spécialistes, depuis 1955, la terminologie stratigraphique et les limites possibles des séries, étages et sous-étages dévoniens, à proposer à l'approbation de l'IUGS (International Union of Geological Sciences : <http://www.iugs.org>). Ces propositions de limites sont généralement basées sur des fossiles pélagiques (à large distribution), conodontes ou goniatites, jamais sur des brachiopodes, considérés comme des fossiles à distribution limitée car vivant généralement dans des mers peu profondes (plates-formes). On peut penser qu'il ne partageait pas cette opinion et qu'il a voulu montrer l'intérêt des brachiopodes, notamment des rhynchonellides, capables de servir à fixer des limites dans des séries dépourvues de faunes pélagiques en de nombreuses régions du monde. Son intervention référencée, relative au « Strunien » (SDS à Rochester, 1997), dans la discussion relative aux sous-étages possibles du Famennien terminal est remarquable. Alors que ces dépôts en Avesnois ne semblaient pas retenir l'attention, il a rappelé ses publications relatives au Calcaire d'Etrœungt (Sartenaer, 1964, 1965) et précisé que des dépôts analogues existent dans quatre vingt-cinq bassins sédimentaires, vingt-cinq pays et cinq continents, et « qu'il ne se passe pas une semaine ou un mois sans que les couches d'Etrœungt ou le Strunien ne soit mentionnés dans une publication ». Suite à de multiples visites d'affleurements et rencontres avec des paléontologues (allemands, américains, australiens, britanniques, canadiens, français, indiens, italiens, russes ou avec des spécialistes de faunes d'Afghanistan, Iran, Maroc...), il crée, en 1970, quatorze nouveaux genres de rhynchonellides d'âge silurien à carbonifère-pennsylvanien en précisant leur distribution géographique et stratigraphique: Silurien supérieur-Dévonien inférieur ? (1 genre), Siegénien moyen-Eifélien (1), Eifélien supérieur-Givétien inférieur (1), Givétien inférieur-moyen (2), Givétien moyen-supérieur (1), Frasnien inférieur (2), Famennien (1), Famennien supérieur (3), Tournaisien inférieur (1), Pennsylvanien moyen (1). Ses soixante dernières publications à partir de 1984 concernent presque exclusivement la systématique de rhynchonellides. On peut sans doute lui reprocher d'avoir multiplié le nombre de genres de rhynchonellides dévoniens, mais suite à ces critiques, il analyse en 1986 les causes de cette tendance et pose la question : « rapprochons-nous d'une image plus fidèle de la réalité ou à des

structures artificielles ? » Il conclut qu'il adhère résolument à la première hypothèse. En 2005, il réalise la révision systématique de rhynchonellides en provenance de l'Emsien supérieur – Eifélien inférieur d'Europe, d'Afrique du Nord et d'Asie (Altaï SW) attribués au genre *Uncinulus*, et fonde la famille des Nucinulidae qui regroupe quatre nouveaux genres : *Lapinulus*, *Oligodesmmerhynchus*, *Palinulus* et *Cuninulus* dans lesquels il range de nombreuses espèces connues. Il crée quatre espèces de *Cuninulus*, permettant ainsi de préciser la stratigraphie de l'Emsien supérieur – Eifélien inférieur du Bassin de Dinant, de l'Eifel, de la Cordillère Cantabrique, des plaines du Dra en Algérie et Mauritanie, et des Monts Sainte-Croix en Pologne.

En soixante années de labeur acharné, il définira plus de cent quarante nouveaux taxons de brachiopodes rhynchonellides : quatre-vingt quatorze genres - deux carbonifères, les autres dévoniens : trente six famenniens, vingt-cinq frasnien, sept givétiens, trois eiféliens, trois emsiens, les autres présents sur deux étages - et cinquante espèces. Son but était de préciser la stratigraphie du Dévonien en Belgique et dans le monde, en permettant surtout de dater les séries sédimentaires de plate-forme dépourvues de faunes pélagiques (conodontes et/ou ammonoïdés). Certains de ses travaux, telle que la note écrite en collaboration avec Errera et Mamet (Errera *et al.*, 1972) intitulée « *Le Calcaire de Givet et le Givétien à Givet* », est remarquable de précision et mérite l'attention de tout scientifique intéressé par le Givétien, qui y trouvera des données relatives aux multiples travaux qui lui ont été consacrés, accompagnés d'une bibliographie très élaborée. Il a aussi consacré une partie de ses recherches aux spiriférides du Dévonien (quatre cyrtospiriférides frasnien, deux *Cyrtiopsis* communs dans le Famennien inférieur de Belgique) et du Carbonifère inférieur (trois genres concernant le Carbonifère-Tournaisien de Belgique et le Pennsylvanien). Notons également d'autres articles importants telle que la découverte de la zone à *Cheiloceras* (goniatite) dans le Famennien inférieur du Massif de la Vesdre en Belgique et celle d'un niveau à plantes dans l'Elbourz central (Iran). En découvrant sa bibliographie, le lecteur remarquera que un peu plus de cent sur plus de cent cinquante de ses publications sont consacrées aux rhynchonellides.

Remerciements. — J'ai contracté une importante dette envers le Dr. Maria Hecker, épouse de Paul Sartenaer, qui m'a envoyé un choix de photos de son mari, communiqué de précieuses informations le concernant et des données complémentaires relatives à sa bibliographie. Qu'elle veuille bien trouver ici l'assurance de ma très profonde reconnaissance.

REFERENCES CITEES

- FORIR H. (1895). — Sur la présence de *Rhynchonella dumonti* et de *Cyrtia Murchisoniana* dans les schistes de Matagne. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **23** : 25-28.
- FORIR H. (1896). — *Rhynchonella dumonti* et *Cyrtia Murchisoniana* dans les schistes de Matagne. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **24** : 7-9.
- FORIR H. (1897). — Les schistes de Matagne dans la région de Sautour-Surice. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **25** : 41-48.
- FORIR H. (1900). — *Rhynchonella Omaliusi* et *Rhynchonella Dumonti* ont-elles une signification stratigraphique ? *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **27** : 33-47.
- FORIR H. (1901). — La prétendue faille de Haversin. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **28** : 183-197.
- FORIR H., SOREIL G. & LOHEST M. (1900). — Compte-rendu de la session extraordinaire de la Société Géologique de Belgique tenue à Hastière, à Beauraing et à Houyet, le 31 août et les 1^{er}, 2 et 3 septembre 1895. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **26** : 41-56.
- GOSSELET J. (1877). — Note (1^{re}) sur le Famennien : Quelques documents pour l'étude des schistes de Famenne. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **4** : 303-320.

BIBLIOGRAPHIE de PAUL SARTENAER

- SARTENAER P. (1952). — Les mouvements eustatiques. *Union des Ingénieurs sortis des Ecoles spéciales de Louvain, Bulletin technique*, **1** : 32-41.
- SARTENAER P. (1954). — Deux *Camarotoechia* de la base de l'assise de Senzeille (Famennien inférieur). In : Volume jubilaire Victor VAN STRAELEN, **1**: 195-214.
- SARTENAER P. (1955a). — Redescription du genre *Nudirostra* et considérations sur la validité du genre « *Calvinaria* » (Rhynchonellacea). *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **31** (6) : 1-12.
- SARTENAER P. (1955b). — Considérations sur le stegidium (Brachiopodes). *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **31** (79) : 1-12.
- SARTENAER P. (1956a). — A propos de certaines interprétations stratigraphiques erronées basées sur des fossiles du Famennien inférieur. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **32** (12) : 1-23.
- SARTENAER P. (1956b). — Signification et importance du genre *Cyrtiopsis* dans les dépôts famenniens inférieurs. Première Note : *Cyrtiopsis murchisoniana* (De VERNEUIL, E., 1845). *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **32** (28) : 1-19.
- SARTENAER P. (1956c). — Signification et importance du genre *Cyrtiopsis* dans les dépôts famenniens inférieurs. Deuxième Note: *Cyrtiopsis seneciliae*, nov. sp. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **32** (40) : 1-12.
- SARTENAER P. (1956d). — Deux zones fossilifères nouvelles du Famennien inférieur. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **32** (56) : 1-36.
- SARTENAER P. (1957a). — De l'importance stratigraphique des rhynchonelles famenniennes situées sous la Zone à *Camatotoechia omaliusi* (GOSSELET, J., 1877). Première Note : *Camarotoechia lentiformis* (NALIVKIN, D., 1930). *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **33** (1) : 1-19.
- SARTENAER P. (1957b). — Esquisse d'une division nouvelle des dépôts du Famennien inférieur du Bassin de Dinant. *Bulletin de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, **65** (3) : 421-446.
- SARTENAER P. (1957c). — De l'importance stratigraphique des rhynchonelles famenniennes situées sous la Zone à *Camatotoechia omaliusi* (Gosselet, J., 1877). Deuxième Note : Le groupe de la *Camarotoechia triaequalis*. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **33** (20) : 1-32.
- SARTENAER P. (1957d). — La découverte, en Belgique de la zone à *Cheiloceras*. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **80** : B 463-B 470.
- SARTENAER P. (1957e). — Signification et importance du genre *Cyrtiopsis* dans les dépôts famenniens inférieurs. Troisième Note : *Cyrtiopsis graciosa* GRABAU, A. W., 1923. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **33** (40) : 1-14.
- SARTENAER P. (1957f). — A propos d'un faciès particulier du niveau de Souverain-Pré (Famennien). *Bulletin de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie*, **65** (1) : 138-153.
- SARTENAER P. (1958a). — Problèmes soulevés par la prétendue faille de Haversin. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **34** (9) : 1-18.
- SARTENAER P. (1958b). — A propos de certaines couches à inclusions calcaires du Famennien inférieur. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **81** : B 295-B 309.
- SARTENAER P. (1958c). — De l'importance stratigraphique des rhynchonelles famenniennes situées sous la Zone à *Camatotoechia omaliusi* (GOSSELET, J., 1877). Troisième Note : Le groupe de la *Camarotoechia nux*. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **34** (23) : 1-32.
- SARTENAER P. (1959a). — Das Tauchen mit dem Freitauchgerät im Dienste der Palökologie. *Freiberger Forschungshefte C75, Geologie*, **57**: 86-98.
- SARTENAER P. (1959b). — La plongée en scaphandre autonome au service de la Taphonomie. *Bulletin de l'Institut océanographique*, **1159** : 1-14.
- SARTENAER P. (1959c). — *Leiorhynchus* or *Nudirostra*. *Journal of Paleontology*, **33** (5) : 964-965.
- SARTENAER P. (1959d). — Premières recherches taphonomiques, en scaphandre autonome, portant sur le faciès à *Turritella tricarinata* forme *communis* de la Vase molle terrigène du golfe de Fos. *Travaux Station marine d'Endoume*, **16** (26) : 15-38.
- SARTENAER P. (1959e). — Diving with S.C.U.B.A. at the Service of Taxonomy. *International Oceanographic Congress, 31 August – 12 September, 1959*. Preprints, 351-352.
- SARTENAER P. (1959f). — De la non-mention des couches famenniennes les plus anciennes sur de nombreuses planchettes de la carte géologique de Belgique. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **35 b** : 1-19.
- SARTENAER P. (1959g). — La plongée en scaphandre autonome au service de la taphonomie. *Bulletin de l'Institut océanographique*, **1159** : 1-14.
- SARTENAER P. (1960). — Visage 1960 de la « tranchée de Senzeilles » (partie famennienne). *Bulletin de la Société Belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrogéologie*, **68** (3) : 430-442.
- SARTENAER P. (1961a). — Note nomenclatoriale : *Yunnanella* GRABAU, *Yunnanellina* GRABAU, *Nayunnella* nom. nov. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **37** (2) : 1-3.
- SARTENAER P. (1961b). — Redescription of *Leiorhynchus quadracostatus* (VANUXEM) type species of *Leiorhynchus* HALL, 1860 (Rhynchonellacea). *Journal of Paleontology*, **35** (5) : 963-976.
- SARTENAER P. (1961c). — Etude nouvelle en deux parties, du genre *Camarotoechia* HALL et CLARKE, 1893. Première partie : *Atrypa congregata* CONRAD, Espèce-type. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **37** (22) : 1-11.
- SARTENAER P. (1961d). — Late Upper Devonian (Famennian) Rhynchonelloid Brachiopods. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **37** (24) : 1-10.
- SARTENAER P. (1961e). — Etude nouvelle en deux parties, du genre *Camarotoechia* HALL et CLARKE, 1893. Deuxième partie : *Cupularostrum recticostatum* n. gen., n. sp. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **37** (25) : 1-15.
- SARTENAER P. (1962a). — A propos de l'espèce-type du genre *Yunnanella* GRABAU, A. W. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **38** (19) : 1-3.
- SARTENAER P. (1962b). — Méthodes modernes de prospections géologiques au Canada. *Science et Nature*, 20-29.

- SARTENAER P. (1963a). — Ecologie des Brachiopodes paléozoïques à la lumière de l'écologie actuelle. In : Colloque sur l'écologie (Ruel, 25 et 26 février 1963), 47-60.
- SARTENAER P. (1963b). — Nos yeux sous la mer. Le point de vue d'un paléontologue. *Les naturalistes belges, Bulletin*, **44** : 197-223.
- SARTENAER P. (1964a). — Refonte du genre *Pugnoides* WELLER, S., 1910 (Rhynchonelloidea). *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **40** (12) : 1-10.
- SARTENAER P. (1964b). — Rhynchonelloidea de Shogran et Kuragh (Chitral). Italian Expedition to the Karakorum (K2) and Hindu Kush. Leader: A. DESIO. *Scientific Reports. IV - Paleontology - Zoology - Botany*, **1** : 51-62.
- SARTENAER P. (1964c). — Découverte d'un niveau à plantes d'âge Famennien supérieur dans l'Elbourz central (Iran). *Rivista Italiana di Paleontologia*, **70** (4) : 651-655.
- SARTENAER P. & MAMET B. (1964). — Le Calcaire d'Etrœungt à Etrœungt. *C. R. 5^{ème} Congrès International de Stratigraphie et de Géologie du Carbonifère* (Paris, 9-13 septembre 1963), **2** : 755-761.
- SARTENAER P. (1965a). — Signification et importance du genre *Cyrtiopsis* dans les dépôts famenniens inférieurs. Quatrième Note. Position systématique et stratigraphique du lectotype de l'espèce *Spirifer Murchisonianus* DE VERNEUIL, E., 1845. *Bulletin de la Société belge de Géologie, Paléontologie, Hydrogéologie*, **73** (3) : 366-392.
- SARTENAER P. (1965b). — Comment on the type species of *Stenosisma* CONRAD, 1839. *Bulletin of Zoological Nomenclature*, **22** (1) : 13-14.
- SARTENAER P. (1965c). — Le genre canadien *Greenockia* BROWN R.A.C., 1952 synonyme du genre russe *Hemiplethorhynchus* von PEETZ H., 1898 (Rhynchonelloidea). *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **41** (2) : 1-9.
- SARTENAER P. (1965d). — Trois nouveaux genres de brachiopodes rhynchonellides du Famennien. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **41** (3) : 1-12.
- SARTENAER P., MAMET B. & MORTELMANS G. (1965). — Réflexions à propos du Calcaire d' Etrœungt. *Bulletin de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrogéologie*, **74** (1) : 41-51.
- SARTENAER P. & ROZMAN Kh. S. (1965). — O edinom komplekse famenskikh rinkhonellid Severnoi Ameriki i Ourala (Sur un complexe de rhynchonellides famenniens de l'Amérique du Nord et de l'Oural). *Paleontologicheskii Zhurnal*, **1** : 148-150. [En Russe]
- SARTENAER P. (1966a). — *Ripidiorhynchus*, nouveau genre de Brachiopode Rhynchonellide du Frasnien. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **42** (30) : 1-15.
- SARTENAER P. (1966b). — Frasnian Rhynchonellida from the Ozbak-Kuh and Tabas regions (East Iran). *Reports of the Geological Survey of Iran Reports*, **6** (2) : 25-54.
- AGER D.V. & SARTENAER P. (1967). — *Bicornes* SCHUCHERT and LEVENE 1929 (Brachiopoda): proposed suppression under the plenary powers Z.N.(S.) 1781. *Bulletin of Zoological Nomenclature*, **24** (2) : 96-97.
- SARTENAER P. (1967a). — Essay Review. Brachiopoda, Part H of Treatise on Invertebrate Paleontology edited by Raymond C. Moore, p. XXXII, 927, 5198 figs, New York, 1965 (The Geological Society of America). *American Journal of Science*, **265** (5) : 442-448.
- SARTENAER P. (1967b). — De l'importance stratigraphique des Rhynchonelles famenniennes situées sous la Zone à *Ptychomaletoechia omaliusi* (GOSSELET, J., 1877). Quatrième Note: *Tenuisinostrum* n. gen. [*T. crenulatum* (GOSSELET, J., 1877)] = espèce-type. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **43** (32) : 1-20.
- SARTENAER P. (1967c). — De la présence du genre *Evanesirostrum* SARTENAER, P., 1965 dans le Famennien inférieur d'Europe occidentale. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **43** (41) : 1-15.
- SARTENAER P. (1967d). — Commentaires sur le genre nominal *Adolfia* GÜRICH, G., 1909 et sur le nom générique *Guerichella* (Brachiopoda, Spiriferacea). *Société Belge de Géologie, Paléontologie et Hydrogéologie*, **75** (3) : 380-389.
- SARTENAER P. (1967e). — Famennian rhynchonellid brachiopod genera as a tool for correlation. In: OSWALD D. (ed.), International Symposium on the Devonian System (Calgary, Canada). *Alberta Society Petroleum Geology, Memoir* **14** (2) : 1043-1060.
- SARTENAER P. (1968a) (ed.). — C.R.B. Belgian Fellows Biographical Directory.
- SARTENAER P. (1968b). — *Stenaulacorhynchus*, nouveau genre de Brachiopode Rhynchonellide du Famennien Inférieur de l'Iran Oriental. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **44** (30) : 1-14.
- SARTENAER P. (1968c). — De la validité de *Caryorhynchus* CRICKMAY, C. H. 1952, genre de Brachiopode Rhynchonellide et de sa présence dans le Frasnien supérieur d'Europe occidentale. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **44** (34) : 1-21.
- SARTENAER P. (1968d). — *Cyrtospirifer malaisei* (J. Gosselet, 1894) synonyme de *Cyrtospirifer bisinus* (H. LE HON, 1870). *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **44** (37) : 1-12.
- SARTENAER P. (1968e). — *Eurycolorhynchus* nouveau genre de Brachiopode Rhynchonellide du Givétien supérieur. *Senckenbergiana lethaea*, **49** (5-6) : 565-574.
- SARTENAER P. (1968f). — De l'importance stratigraphique des rhynchonelles famenniennes situées sous la Zone à *Ptychomaletoechia omaliusi* (Gosselet, J., 1877). Cinquième Note: *Paromoeopygma* n. gen. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **44** (42) : 1-26.
- SARTENAER P. (1968g). — De l'importance stratigraphique des rhynchonelles famenniennes situées sous la Zone à *Ptychomaletoechia omaliusi* (Gosselet, J., 1877). Sixième Note: *Pampoecilorhynchus* n. gen. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **44** (43) : 1-32.
- SARTENAER P. & ROZMAN Kh. S. (1968). — *Physetorhyncha* -novyi rod pozdnefamenskikh rinkhonellid (*Physetorhyncha* - new genus of Late Famennian rhynchonellids). *Paleontologicheskii Zhurnal*, **2** : 137-139. [En Russe]
- SARTENAER P. (1969). — Late Upper Devonian (Famennian) Rhynchonellid Brachiopod from Western Canada. *Geological Survey of Canada, Bulletin*, **169** : 1-269.
- SARTENAER P. (1970a). — *Physetorhyncha* SARTENAER & ROZMAN, 1968 (Brachiopoda) dans le Famennien supérieur des Monts de Sainte-Croix, Pologne. *Acta Palaeontologica Polonica*, **15** (1) : 19-32.
- SARTENAER P. (1970b). — Nouveaux genres Rhynchonellides (Brachiopodes) du Paléozoïque. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique*, **46** (32) : 1-32.
- SARTENAER P. (1970c). — Le contact Frasnien-Famennien dans la région de Houyet-Han-sur-Lesse. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **92** (3) : 345-357.
- SARTENAER P. (1971a). — Redescription of the Brachiopod Genus *Yunnanella* GRABAU, 1923 (Rhynchonellida). *Smithsonian Contributions to Paleobiology*, **3** : 203-218.

- SARTENAER P. (1971b). — Genres Rhynchonellides (Brachiopodes) nouveaux. *Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Bulletin*, **47** (4) : 1-7.
- ERRERA M., MAMET B. & P. SARTENAER (1972). — Le Calcaire de Givet et le Givétien à Givet. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **48** (1) : 1-59.
- SARTENAER P. (1972). — De l'importance stratigraphique des rhynchonellides famenniens situées au-dessus de la zone à *Ptychomaletoechia dumonti* (Gosselet, J., 1877). Première Note: *Cavatisinurostrum* n. gen. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **48** (2) : 1-22.
- SARTENAER P. (1973). — Réflexions à propos de la limite entre les étages frasnien et famennien fixée depuis près d'un siècle dans la « Tranchée de Senzeilles ». *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **49** (4) : 1-11.
- SARTENAER P. (1974a). — La Zone à *Caryorhynchus tumidus*, zone nouvelle de la partie supérieure du Frasnien. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **50** (1) : 1-11.
- SARTENAER P. (1974b). — Adieu F2a, F2b, etc.... *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **50** (3) : 1-18.
- SARTENAER P. (1974c). — Que sont les Schistes de Matagne ? *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **50** (4) : 1-43.
- SARTENAER P. (1974d). — Que sont les Schistes de Barvaux-sur-Ourthe ? *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **50** (5) : 1-18.
- SARTENAER P. (1974e). — Signification stratigraphique du « niveau des monstres » du Frasnien franco-belge. *Bulletin de l'Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique*, **50** (7) : 1-19.
- SARTENAER P. & SANDBERG, C. A. (1974). — New North American species of Upper Famennian rhynchonellid genus *Megalopterorhynchus* from Lost River Range, Idaho. *Journal of Paleontology*, **48** (4) : 756-765.
- SARTENAER P. (1975a). — Rhynchonellides du Famennien supérieur du Sahara occidental (Algérie). *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **51** (5) : 1-12.
- SARTENAER P. (1975b). — *Eumetabolotoechia* nouveau genre Rhynchonellide (Brachiopode) du Givétien d'Amérique du Nord. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **51** (6) : 1-8.
- SARTENAER P. & PLODOWSKI G. (1975). — Importance stratigraphique et répartition géographique du genre rhynchonellide *Araratella* n. gen. du Famennien supérieur. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **51** (8) : 1-34.
- SARTENAER P. (1977). — Un nouveau genre de Rhynchonellidé de la fin du Frasnien. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **97** (1) : 67-76.
- SARTENAER P. (1979a). — Deux nouveaux genres de Rhynchonellides frasnien précédemment inclus dans le genre *Calvinaria* (Brachiopoda). *Géobios*, **12** (4) : 535-547.
- SARTENAER P. (1979b). — *Parvultarostrum* genre Rhynchonellide (Brachiopode) nouveau du Frasnien de l'Australie de l'Ouest. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **51** (16) : 1-4.
- SARTENAER P. (1980a). — De l'importance stratigraphique des rhynchonellides famenniens situées sous la zone à *Ptychomaletoechia omaliusi* (Gosselet, J., 1877). Septième Note: *Dimensionaequalirostrum* n. gen. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **52** (4) : 1-13.
- SARTENAER P. (1980b). — Appartenance de l'espèce *Terebratula formosa* de l'Eifel au genre *Phlogoiderhynchus* du début du Frasnien. *Senckenbergiana lethaea*, **61** (1-2) : 17-43.
- BULTYNCK P., GODEFROID J. & SARTENAER P. (1982). — Brachiopody i konodonty progranitnykh Ems-Kouvenskikh otlojenii Belgiiskikh Ardenn (Brachiopods and conodonts from the transitional Emsian-Couvinian deposits of the Belgian Ardennes). *In*: SOKOLOV B.S. & RJONSNITZKAIA M.A. (eds): Biostratigrafia pogranitnykh otlojeni nijnego i srednego devona. *Trudy polevoi sessii Mejdunarodnoi podkomissii po stratigrafii devona*, Samarkand, 1978: 31-37. [En Russe]
- SARTENAER P. (1982a). — The presence and significance of *Spirifer bisinus*, *S. malaisi*, *S. supradisjunctus*, and *S. seminoi* in early Frasnian beds of western Europe. *In*: SARTENAER P. (ed.), Papers on the Frasnian-Givetian boundary. *Geological Survey of Belgium*: 122-196.
- SARTENAER P. (1982b). — Znatchenie rodov rinkhonellid dlia oppredelenia granits ot delov devona (The significance of rhynchonellid genera at the boundaries of the Devonian Series). *In*: SOKOLOV B.S. & RJONSNITZKAIA M.A. (eds): Biostratigrafia pogranitnykh otlojeni nijnego i srednego devona (Trudy olevoi sessii Mejdunarodnoi podkomissii po stratigrafii devona, Samarkand, 1978) : 130-133. [En Russe]
- GODEFROID J. & SARTENAER P. (1983). — Extension de genres Rhynchonellides et Spiriférides caractéristiques du Dévonien et du Carbonifère inférieur. — *In*: ROBASZYNSKI F. & DUPUIS C. : *Guides Géologiques Régionaux*, Belgique : 191, 193.
- SARTENAER P. (1983a). Introduction; Stratigraphic location of the proposed boundary stratotype; Geographic location of the proposed boundary stratotype; Recognition of the boundary stratotype on the southern flank of the Dinant Basin in Belgium and France; The stratigraphic significance of the rhynchonellid genera at the Givetian/Frasnian boundary; Brachiopods (Spiriferids); Conservation of the boundary stratotype. *In*: SARTENAER P. (ed.): Proposal for an international stratotype for the Middle Devonian (Givetian) – Upper Devonian (Frasnian) boundary (Lower *Polygnathus asymmetricus* Zone) in the neritic facies on the southern flank of the Dinant Basin. Document submitted to the SDS at its Montpellier business meeting on September 23, 1983: 1-4; 5-9; 10-12; 13; 38-47; 48; 64.
- SARTENAER P. (1983b). — Proposal for an international decision on the Frasnian-Famennian boundary (Middle *Palmatolepis triangularis* Zone). *In*: SDS meeting 1983, Montagne Noire : 14 p. [inédit]
- SARTENAER P. (1984a). — *Perrarisinurostrum* genre Rhynchonellide (Brachiopode) nouveau du début du Famennien. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **55** (6) : 1-19.
- SARTENAER P. (1984b). — Deux genres Rhynchonellides nouveaux de la fin du Frasnien. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **55** (8) : 1-16
- BENSAÏD M., BULTYNCK P., SARTENAER P., WALLISER O.H. & ZIEGLER W. (1985). — The Givetian-Frasnian Boundary in pre-Sahara Morocco. *In*: ZIEGLER W. & WERNER R. (eds): Devonian Series Boundaries—Results of world-wide Studies. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, **75** : 287-300.
- SARTENAER P. (1985a). — Two new middle Givetian rhynchonellid genera, Pine Point Formation, Great Slave Lake, District of Mackenzie. *Current Research, Part B, Geological Survey of Canada, Papers*, **85-1B** : 217-221.
- SARTENAER P. (1985b). — The biostratigraphical significance of rhynchonellid genera at the Givetian-Frasnian boundary. *In*: ZIEGLER W. & WERNER R. (eds), Devonian Series Boundaries. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, **75** : 311-318.
- SARTENAER P. (1985c). — The Stratigraphic Significance of rhynchonellid genera at the Frasnian-Famennian boundary. *In*: ZIEGLER W. & WERNER R. (eds), Devonian Series Boundaries – Results of world-wide series. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, **75** : 319-330.

- SARTENAER P. (1985d). — The stratigraphic significance of rynchonellid genera at the Givetian-Frasnian boundary. In: BULTYNCK P., CASIER J.-G., COEN M., COEN-AUBERT M., GODEFROID J., JACOBS L., LOBOZIAK S., SARTENAER P. & STREEL M.: Pre-Congress excursion to the Devonian stratotypes in Belgium. *Bulletin de la Société belge de Géologie*, Centenaire, Livret-Guide. Stratotypes carbonifères et dévoniens en Belgique, **96** (3) : 272-273.
- SARTENAER P. (1986a). — A new late Eifelian rynchonellid genus from western North America. *Current Research, Part B, Geological Survey of Canada, Papers*, **86-1B** : 489-491.
- SARTENAER P. (1986b). — Présence de la Zone à *Basilicorhynchus basilicus gerardimontis* (zone à rynchonellides de la partie supérieure du Famennien inférieur) dans le Bassin de Namur. *Aardkundige Mededelingen*, **3** : 191-200.
- SARTENAER P. (1986c). — *Hadrotatorhynchus*, genre Rynchonellide (Brachiopode) nouveau de la fin du Givétien. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **56** : 137-143.
- SARTENAER P. (1986d). — L'accroissement du nombre de genres Rynchonellides dévoniens traduit-il une nécessité ou une option ? *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **56** : 145-150.
- SARTENAER P. (1987a). — *Insignitisinurostrum*, genre Rynchonellide (Brachiopode) nouveau de la partie moyenne du Famennien du Nouveau-Mexique. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **57** : 83-89.
- SARTENAER P. (1987b). — *Stenometoporphynchus* genre Rynchonellide (Brachiopode) nouveau de la partie inférieure du Frasnien. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **57** : 125-134.
- SARTENAER P. (1987c). — *Evanidisinurostrum*, nouveau genre Rynchonellide (Brachiopode) de la partie inférieure du Famennien. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **57** : 135-138.
- SARTENAER P. (1987d). — Re-examination of the *castanea* versus *hippocastanea* problem in the District of Mackenzie, and establishment of a new early-middle Givetian rynchonellid genus. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **57** : 139-147.
- SARTENAER P. (1987e). — Introduction; Stratigraphic location of the proposed boundary stratotype; Geographic location of the proposed boundary stratotype; Brachiopods (Rynchonellids): The stratigraphic significance of rynchonellid genera at the Givetian/Frasnian boundary; Brachiopods (Spiriferids); Conservation of the auxiliary boundary stratotype. — In: SARTENAER P. (ed.), Auxiliary stratotype for the Middle Devonian (Givetian)–Upper Devonian (Frasnian) boundary (Lower *Polygnathus asymmetricus* Zone) in the neritic facies on the southern flank of the Dinant Basin. *Guidebook, Centenary Symposium, Société belge de Géologie* : 1-3; 4-5; 6; 21; 22-22; 37.
- SARTENAER P. (1988a). — Description nouvelle de *Calvinaria megistana* (LE HON, 1870) et fixation de la position stratigraphique de ce Rynchonellide de la fin du Frasnien en Belgique. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **58** : 33-57.
- SARTENAER P. (1988b). — *Illopsyrhynchus*, nouveau genre Rynchonellide du début du Givétien. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **58** : 59-69.
- SARTENAER P. (1988c). — Description d'une nouvelle espèce du genre Rynchonellide *Perrarisinurostrum* SARTENAER, 1984 de la partie moyenne du Famennien du Tafilalt, au Maroc pré-saharien. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **58** : 71-78.
- SARTENAER P. (1988d). — A second North American representative of the middle Frasnian Rynchonellid genus *Caryorhynchus* CRICHMAY C. H., 1952. *Journal of Paleontology*, **62** (4): 539-546.
- SARTENAER P. & XU Han-kui (1989a). — The Upper Famennian Rynchonellid genus *Planovatirostrum* SARTENAER, 1970 from Africa, China, Europe and the USSR. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **59** : 37-48.
- SARTENAER P. & XU Han-kui (1989b). — Upper Famennian Rynchonellid genus *Trifidorostellum* SARTENAER, 1961 from China, North America and the USSR. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **59** : 49-59.
- SARTENAER P. (1989). — Deux genres Rynchonellides nouveaux d'âge frasnien moyen et supérieur résultant du brisement de *Calvinaria* STAINBROOK, 1945. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **59** : 61-77.
- SARTENAER P. & XU Han-kui (1991). — Two new Rynchonellid (Brachiopod) species from the Frasnian Shetienchiao (1) Formation of central Hunan, China. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **61** : 123-133.
- NORRIS A.W., UYENO T.T., SARTENAER P. & TELFORD P.G. (1992). — Brachiopod and conodont faunas from the uppermost Williams Island Formation and lower Long Rapids Formations (Middle and Upper Devonian), Moose River Basin, northern Ontario. *Bulletin of the Geological Survey of Canada*, **434** : 1-133.
- SARTENAER P. & HARTUNG W. (1992). — Die Biozonierung der Oberen Frasnies-Stufe (Frasnes-Knollenkalke und Frasnies-Schiefer) and Nord-Abfall des Hohen Venns mit Hilfe von Rynchonelliden. *Senckenbergiana lethaea*, **72** : 49-60.
- SARTENAER P. & RACKI G. (1992). — A new late Givetian rynchonellid species from the Holy Cross Mountains, Poland, and its relevance to stratigraphical and ecological problems near the Givetian/Frasnian boundary. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **62** : 61-73.
- SARTENAER P. (1993). — *Tomestenoporphynchus* nouveau genre Rynchonellide (Brachiopode) du Frasnien inférieur de la Plate-forme Russe. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **63** : 13-23.
- SARTENAER P. (1994a). — *Tiocyrpsis* a new Late Frasnian cyrtiopsid genus from Germany and Belgium. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, **169** : 29-43.
- SARTENAER P. (1994b). — *Canavirila* nouveau genre calvinariide (Rynchonellide Brachiopode) de la partie moyenne du Frasnien. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **64** : 97-108.
- SARTENAER P. & ERLANGER O.A. (1995). — Presence of the middle Famennian Brachiopod genus *Perrarisinurostrum* SARTENAER, 1984 in the Pechora Basin (Russia). [Nakhodka srednefamenskogo roda brachiopod *Perrarisinurostrum* SARTENAER, 1984 v Pechorskom bassejne (Rossiya)]. *Paleontological Journal*, **29** (4) : 142-151.
- SARTENAER P. (1995). — *Yocrarhynchus* new "lower-middle" Frasnian rynchonellid brachiopod genus from China and Russia. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **65** : 117-126.
- SARTENAER P. (1996a). — Two new North American Givetian Rynchonellid (Brachiopod) Zones. *Annales de la Société Géologique de Belgique*, **117** (1) : 245-257.
- SARTENAER P. (1996b). — *Momarhynchus*, new Lower Famennian rynchonellid Brachiopod genus from Yakutia. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **66** : 37-42.

- SARTENAER P. (1996c). — *Pripyatspirifer*, a new Lower Famennian genus from Belarus. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **66** : 43-51.
- SARTENAER P. (1996d). — Are all species of the Main Devonian Field assigned to the genus *Ripidiorhynchus* SARTENAER, P. 1966 valid? *In: The Third Baltic Stratigraphical Conference* (Tallinn, October 8-10, 1996.), Abstracts: 57-58.
- SARTENAER P. & PLODOWSKI G. (1996). — Restatement of the Late Tournaisian *Spirifer tornacensis* de Koninck, 1883 on the base of the original collection. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **66** : 53-71.
- SARTENAER P. (1997a). — Are all species of the Main Devonian Field assigned to the genus *Ripidiorhynchus* SARTENAER, P. 1966 valid? *Eesti Teaduste Akadeemia Toimetised, Geoloogia*, **46** (3) : 146-149.
- SARTENAER P. (1997b). — *Novaplattrostrum*, late Famennian rhynchonellid brachiopod genus from Sauerland and Thuringia (Germany). *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **65** : 25-37.
- SARTENAER P., PUSHKIN V. I. & KOTLYAR O. (1997). — Two early Famennian rhynchonellid species from the Pripyat (Belarus) and Dnepr-Donets (Ukraine) Depressions. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **67** : 39-55.
- SARTENAER P. (1998a). — The presence in Morocco of the late Famennian genus *Hadyrhyncha* HAVLIČEK, 1979 (rhynchonellid, brachiopod). *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **68** : 115-120.
- SARTENAER P. (1998b). — *Leptoterorhynchus*, new middle Famennian rhynchonellid genus from Poland and Germany. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **68** : 121-128.
- SARTENAER P., RACKI G. & SZULCZEWISKI M. (1999). — The late Frasnian rhynchonellid genus *Pammegetherhynchus* (brachiopod) in Poland, and its relevance to the Kellwasser Crisis. *Acta Palaeontologica Polonica*, **43** (2) : 379-394.
- BOULVAIN F., BULTYNCK P., COEN M., COEN-AUBERT M., LACROIX D., LALOIX M., CASIER J.-G., DEJONGHE L., DUMOULIN V., GHYSEL P., GODEFROID J., HELSEN S., MOURAVIEFF N.A., SARTENAER P., TOURNEUR, F. & VANGUESTAINE M. (1999). — Les Formations du Frasnien de la Belgique. *Memoirs of the Geological Survey of Belgium*, **44** : 1-127.
- SARTENAER P. (1999a). — A new rhynchonellid (brachiopod) genus from the middle Frasnian of the Dinant Basin (Belgium). *Senckenbergiana lethaea*, **79** (1) : 275-279.
- SARTENAER P. (1999b). — A new mid-Famennian rhynchonellid (brachiopod) genus from the Canning Basin, western Australia. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **7** (2^e série) : 79-84.
- SARTENAER P. (1999c). — *Tetragonorhynchus*, new late Famennian rhynchonellid genus from Maïder, southern Morocco, and Tetragonorhynchidae n. fam. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **69** : 67-75.
- SARTENAER P. (1999d). — *Tenticospirifer* TIEN, 1938, an important but poorly defined and misunderstood middle Frasnian Cyrtospiriferid genus from the Main Devonian Field. *In: 4th Baltic Stratigraphical Conference* (Jurmala, Latvia, September-October 1999). Abstracts: 93.
- SARTENAER P. (2000). — *Phacoiderhynchus*, a new middle Famennian rhynchonellid genus from the Anti-Atlas, Morocco, and Phacoiderhynchidae n. fam. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **70** : 75-88.
- SARTENAER P. (2001). — Revision of the rhynchonellid brachiopod genus *Ripidiorhynchus* SARTENAER. *Geologica Belgica*, **3** (3-4) : 191-213.
- SARTENAER P. & PLODOWSKI G. (2001). — Significance of the Strunian genus *Araratella* ABRAHAMIAN, PLODOWSKI & SARTENAER 1975 in the northern Gondwanaland. *In: 15th International Senckenberg Conference* (Frankfurt am Main, May 11-21, 2001). Abstracts: 86.
- SARTENAER P. (2002). — Description of *Mesochorispira konincki* (DEWALQUE, 1895), a spiriferid brachiopod from the Belgian Upper Tournaisian. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **72** : 69-84.
- SARTENAER P. (2003a). — *Tullypothyridina*, new late Givetian rhynchonellid (brachiopod). *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **73** : 29-51.
- SARTENAER P. (2003b). — *Gesoriacorostrum*, a new middle Frasnian rhynchonellid (brachiopod) genus from Boulonnais (N France). *Geologica Belgica*, **6** (3-4) : 181-192.
- SARTENAER P. & PLODOWSKI G. (2003). — Reassessment of the Strunian genus *Araratella* ABRAHAMIAN, PLODOWSKI & SARTENAER in the northern Gondwanaland (Rhynchonellida, Brachiopoda). *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, **242** : 329-348.
- SARTENAER P. (2004a). — *Cherryvalleyrostrum*, a new late Eifelian rhynchonellid (brachiopod) genus from North America. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **74** : 5-18.
- SARTENAER P. (2004b). — Restatement of *Terebratula Orbignyana* de Verneuil, 1850 on the basis of the original collection. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **74**-supplement : 81-88.
- SARTENAER P. (2004c). — Rozmanariidae, a family with problems. *In: Devonian Neritic-Pelagic Correlation and Events. International Meeting on Stratigraphy* (Rabat, March 1-10, 2004). Abstracts: 38.
- SARTENAER P. (2005). — New middle and late Emsian, and early Eifelian rhynchonellid (brachiopod) genera of the family Nucinulidae SARTENAER, 2004. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences Naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **75** : 25-52.
- SARTENAER P. (2006). — *Parallelepipedorhynchus*, a new late Frasnian rhynchonellid (brachiopod) from the Dinant Basin, Belgium, and Parallelepipedorhynchidae n. fam. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **76** : 53-65.
- SARTENAER P. (2007). — *Sapphicorhynchus* a new early Givetian rhynchonellid (Brachiopod) genus from western New York State, USA, and Sapphicorhynchidae, n. fam. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **77** : 41-61.
- SARTENAER P. & EBBIGHAUSEN V. (2007). — The Late Eifelian rhynchonellid (Brachiopod) genus *Isopoma* TORLEY, 1934 and Isopomidae n. fam. *Senckenbergiana lethaea*, **87** (1) : 41-69.
- SARTENAER P. (2008). — *Parallelepipedorhynchus castellum*, a new late Frasnian rhynchonellid brachiopod species from Trélon (Dinant Basin, France). *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **78** : 67-73.
- SARTENAER P. (2009). — Two new Emsian rhynchonellid (brachiopod) genera from the Eifel area (Germany). *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **79** : 27-42.
- SARTENAER P. (2010). — Re-examination of the Late Emsian rhynchonellid (brachiopod) *Terebratula Daleidensis* Roemer, 1844 from the Eifel area, and of some related species. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **80** : 47-84.

- SARTENAER P. (2012). — *Meduanorostrum*, a new middle Pragian rhynchonellid (brachiopod) genus from the Armorican Massif, NW France, and Meduanorostridae nov.fam. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **19** (2^e série) : 157-169.
- SARTENAER P. (2014a). — *Jacoburostrum*, a new middle Famennian rhynchonellid (brachiopod) genus from southwestern New York State. *Bulletin of Geosciences*, **89** (3) : 607-616.
- SARTENAER P. (2014b). — Reconsideration of the systematics and distribution of the rhynchonellid brachiopod *Atrypa mesacostale* Hall, 1843 from the Late Givetian and Early Frasnian of New York. *Geologica Belgica*, **17** (3-4) : 276-292.
- SARTENAER P. (in press). — Revision of the family Hebetoechiidae Havlicek, 1960 and proposal of three new rhynchonellid (brachiopod) families. *Rivista Italiana di Paleontologia e Stratigrafia*.

EVOLUTION POLYPHASEE DU MASSIF GRANITIQUE DE LA MALADETA (PYRENEES CENTRALES ESPAGNOLES) - SYNTHESE DES DONNEES PETROGRAPHIQUES

Multiphase evolution of the granitic Maladeta Massif (Central Pyrenees, Spain) - Synthesis of the petrographic data

par Jean Marie CHARLET (*) & Abdellah EL HAJI (**)

Résumé. – Une synthèse des données pétrographiques acquises par l'étude des roches intrusives du massif de la Maladeta et de son encaissant métamorphique conduit à retracer les grandes étapes de la mise en place des granites et à les discuter à la lumière des résultats des études structurales. Les types pétrographiques sont replacés dans une chronologie relative au sein des unités pétrostructurales qui se sont individualisées précocement et se sont juxtaposées selon de grands couloirs tectoniques. Ils montrent que la mise en place des roches basiques a été précédée d'un dôme thermique marqué par une paragenèse à grenat almandin. Finalement le métamorphisme et le plutonisme témoignent d'une évolution dans le temps et l'espace associée à une tectonique hercynienne polyphasée.

Abstract. – *The synthesis of the relevant petrographic data obtained from the study of intrusive rocks of the Maladeta massif located in the Spanish Pyrenees, and particularly of its metamorphic host rock, allows to recreate the main stages for the on-site formation of this granitic structure and to discuss these in the light of the structural studies. The petrographic types are placed in a relative chronological sequence inside their respective petrostructural units: these units have developed an early individuality and are disposed next to each other following large tectonic elements. It is also shown that the formation of the first basic rocks has been preceded by a thermal dome characterized by a paragenesis with almandine garnet. Finally, metamorphism and plutonism show an evolution in space and time linked with a hercynian polyphased tectonics.*

Mots clés. – Roches granitiques, polymétamorphisme au contact, Pyrénées, Massif de la Maladeta, uranium.
Key words. – *Granitic rocks, contact polymetamorphism, Pyrenees, Maladeta Massif, uranium.*

I. — INTRODUCTION

Au cours de la période 1970-1985, le Massif de la Maladeta fut l'objet d'une étude géologique et pétrographique exhaustive (Charlet, 1968, 1977, 1979, 1983, 2002 ; Bourke, 1979) fixant un cadre général à des études ultérieures plus spécifiques, en vue de retracer l'évolution géodynamique de ce complexe granitoïde et de le replacer dans l'histoire géologique de la chaîne pyrénéenne (Lamouroux, 1986, 1991 ; Evans *et al.*, 1998 ; Leblanc *et al.*, 1994). On peut encore citer, à partir de 1992, les études de l'Université de Saragosse (Arranz *et al.*, 1992, 1995). Constituant le massif le plus élevé et le plus étendu (400 km²) de la Haute Chaîne, il se prête particulièrement bien aux observations sur le terrain grâce à une géomorphologie héritée de la dernière glaciation.

Une étude générale du complexe granitoïde de la Maladeta au sens large était présentée en 1979 par Charlet. Elle mettait en évidence une disposition complexe constituée de plusieurs

unités pétrographiques (Fig. 1) séparées par de grandes zones mylonitiques. Les études ultérieures ont confirmé l'existence de plusieurs unités distinctes, une unité occidentale (unité du Nethou) à disposition concentrique des types pétrographiques, et des unités orientales beaucoup plus complexes dans la répartition des types pétrographiques avec suivant les auteurs des nuances dans la définition des sous-unités ou blocs (Lamouroux, 1986, 1991 ; Leblanc *et al.*, 1994). Nous distinguerons dans la suite trois unités (Fig. 1) : les unités du Nethou (N), de Bohi (B) et de Capdella (C) qui correspondent aux unités Aneto, Colomers et Saburo de Lamouroux (1986, 1991), unités séparées par deux grandes zones mylonitisées : la zone de la Noguera Ribagorzana de direction générale N-S (Fig. 1, NR) et la zone du Rio San Nicolau de direction NE-SW (Fig. 1, SN). Les relations entre la succession des phases de déformation qui ont affecté la chaîne et les étapes de mise en place des granitoïdes ont fait l'objet de nombreuses discussions (Rios, 1984 ; Evans *et al.*, 1998 ; Laumonier *et al.*, 1997 ; Garcia-Belles *et al.*, 1998). Nous nous proposons d'apporter des éléments nouveaux dans cette

(*) 10 Avenue Albert Elisabeth, B-7030 St Symphorien ; jeanmariecharlet@gmail.com

(**) 69 Bd Dolez, B-7000 Mons ; abdellah.elhaji@umons.ac.be

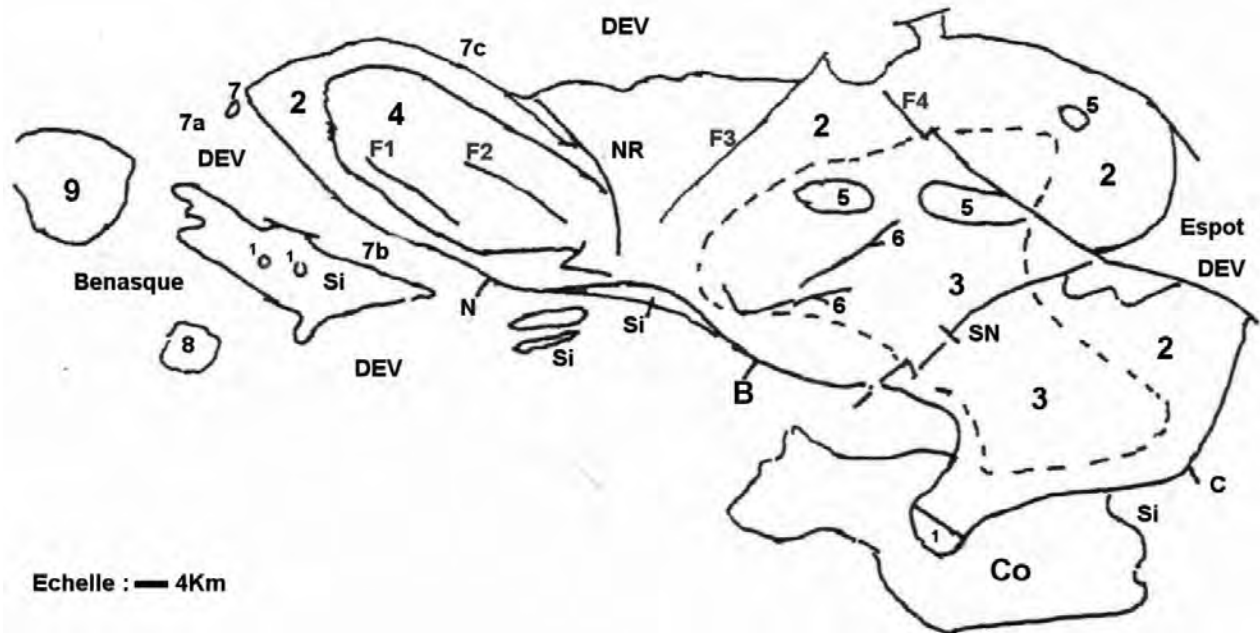


Fig. 1. — Le complexe granitique de la Maladeta et le contexte géologique régional. Abréviations : C-O- Cambro-Ordovicien, Si- Silurien, Dev- Dévonien ; N- Unité du Nethou, B- Unité de Bohi, C- Unité de Capdella ; NR- Zone mylonitisée de la Noguera Ribagorzana, SN- Zone mylonitisée du Rio San Nicolau ; F1- Faille de Llosas, F2- Faille des Salenques, F3- Faille des Banos, F4- Faille de la Ratera ; 1- Roches basiques ; 2- Granodiorite à biotite et amphibole, 3- Granite porphyroïde à biotite et grain grossier ; 4- Granite à biotite, cordiérite et muscovite de l'unité du Nethou , 5- Granite à biotite et cordiérite de l'unité de Bohi, 6- Complexe aplitique à tourmaline et cordiérite du barrage de Cavallers, 7- Grenat almandin dans les cornéennes du Dévonien, 8- Complexe rhyodacitique de Cerler, 9- Granite des Posets.

Fig. 1. — The Maladeta granitic complex and the regional geological framework. Abbreviations : C-O- Cambro-Ordovician, Si- Silurian, Dev- Devonian; N- Nethou Unit, B-Bohi Unit, C- Capdella Unit ; NR- Mylonitic Zone of the Noguera Ribagorzana, SN- Mylonitic Zone of the Rio San Nicolau ; F1- Llosas fault, F2- Salenques fault, F3- Banos fault, F4- Ratera fault; 1- Basic rocks, 2- biotite and amphibole granodiorite, 3- Biotite granite with coarse grain, 4- Biotite, cordierite and muscovite granite of the Nethou unit, 5- Biotite and cordierite granite of the Bohi unit, 6- Aplitic complex with tourmaline and cordierite of the Cavallers dam, 7- Almandin garnet in the Devonian hornfels, 8- Cerler rhyodacitic complex, 9- Posets granite.

discussion par une synthèse actualisée des faits d'observations accumulés sur plusieurs dizaines d'années et le travail d'El Haji (2005) sur le métamorphisme au contact du massif.

II. — LES PHASES SUCCESSIVES DE MISE EN PLACE DES GRANITOÏDES

On peut reconnaître trois grandes séries pétrographiques avec au sein de chacune d'elles des modalités de variations dans le temps et l'espace témoignant d'une histoire polyphasée en relation avec l'évolution structurale de la région :

Une série précoce M1 (Fig. 1 : 1) constituée de roches basiques à grain fin (gabbro, diorite quartzite), bien représentée dans la partie orientale de l'Unité de Capdella sous forme du massif de Tahull, nettement intrusif dans le Cambro-Ordovicien, mais aussi présente en bordure de l'unité du Nethou ou dans les ampélites du Silurien (Si) de la Sierra Negra sous forme de petits corps intrusifs.

Une série M2 majoritairement représentée dans les unités orientales et constituée de granodiorites à biotite et amphibole (Fig. 1 : 2) passant à des monzogranites porphyroïdes à biotite au cœur de l'unité (Fig. 1 : 3). Dans l'unité du Nethou, cette série forme la partie externe du massif (Fig. 1 : 2), le cœur étant occupé par les granites de la série M3 (Fig. 1 : 4). En

plusieurs endroits du massif on observe des masses de roches basiques à grain fin recoupées ou lardées par des filons de granodiorites et passant localement à des champs d'enclaves basiques, les enclaves devenant plus abondantes que la matrice granodioritique. Dans celles-ci, les relations mutuelles acide-basique témoignent d'une mise en place sub-contemporaine (enclaves hybridisées, parfois déformées plastiquement au sein de la granodiorite). On peut ainsi y voir une certaine continuité entre la mise en place de M1 et de M2. Enfin les granitoïdes montrent en bordure sud du massif, une orientation marquée par la disposition des mégacristaux de feldspath alcalin, des minéraux ferromagnésiens ou des enclaves basiques soulignant l'individualisation précoce des unités occidentale et orientale sous l'effet d'une déformation plastique. Cette disposition en unités distinctes bien marquée par la disposition des faciès orientés fut confirmée et précisée par les études menées à partir de la mesure des caractéristiques (intensité et anisotropie) de la susceptibilité magnétique des roches (Leblanc *et al.*, 1994).

Une série M3 plus tardive, alumineuse, manifestement étalée dans le temps et caractérisée d'une manière générale par la présence de muscovite, cordiérite et (ou) tourmaline et fréquemment par la présence d'enclaves de schistes cristallins à biotite, muscovite, grenat, cordiérite et sillimanite (Fig. 1 : 4-5).

La répartition de ces trois grands ensembles pétrographiques permet de caractériser les unités précédemment définies :

L'unité du Nethou (Fig. 1 : N) avec une disposition concentrique des ensembles M1-M2-M3 ;

L'unité de Bohi (Fig. 1 : B) avec dans un ensemble M2 une série intrusive M3 : granites des cirques encapuchonnés par M2 (Fig. 1 : 5) et aplitopegmatites en lames subhorizontales (Fig. 1 : 6). M1 n'y est représenté que sous forme de masses basiques hectométriques passant à des champs d'enclaves ;

L'unité de Capdella (Fig. 1 : C) marquée par la présence des gabbros M1 et l'absence des ensembles pétrographiques M3.

III. — LES CHAMPS FILONIENS, LEURS ENSEIGNEMENTS

L'examen des champs filoniens intrusifs dans le massif précise les conditions de mise en place qui sont largement étalées dans le temps depuis au moins les phases principales de déformation varisque dont le rôle sera précisé par l'étude du métamorphisme au contact jusqu'aux phases distensives plus tardives.

L'unité du Nethou est caractérisée par la fréquence, dans sa partie centrale, de filons de microgranites, parfois épais de quelques dizaines de mètres, de direction méridienne. Ils affleurent de la bordure septentrionale à la bordure méridionale en passant par les sommets du massif. C'est aussi la direction des filons mixtes diabase-aplite, épais d'une dizaine de mètres. La présence d'enclaves de schistes cristallins et de cordiérite dans les microgranites traduit leur filiation avec l'ensemble des granitoïdes M3. Une bordure aphanitique témoigne d'une mise en place tardive dans un granite refroidi. Le jeu successif des failles (comme celle de Llosas, Fig. 1 : F1) est notamment marqué par un décalage des filons qui va s'atténuant dans le temps : +/- 100 m pour le filon hétérogène diabase-aplite, +/- 10 m pour les microgranites plus tardifs.

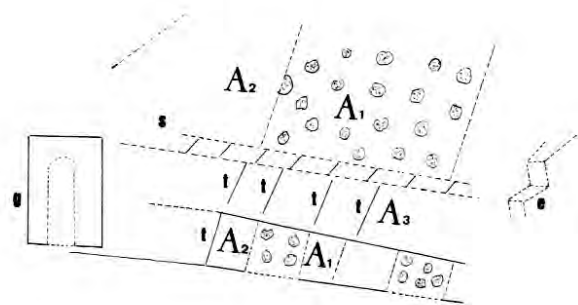


Fig. 2. — Affleurement d'un complexe filonien au barrage de Cavallers (Unité de Bohi), relation schématique avec la fracturation. Longueur de l'affleurement : 5 mètres. Abréviations : g- galerie, e- escalier, A1- Association roche aplitique et basique, A2- Aplite à taches de tourmaline, A3- Aplite à taches de tourmaline post-A2, S- Stockscheider, t- Joints de tourmaline.

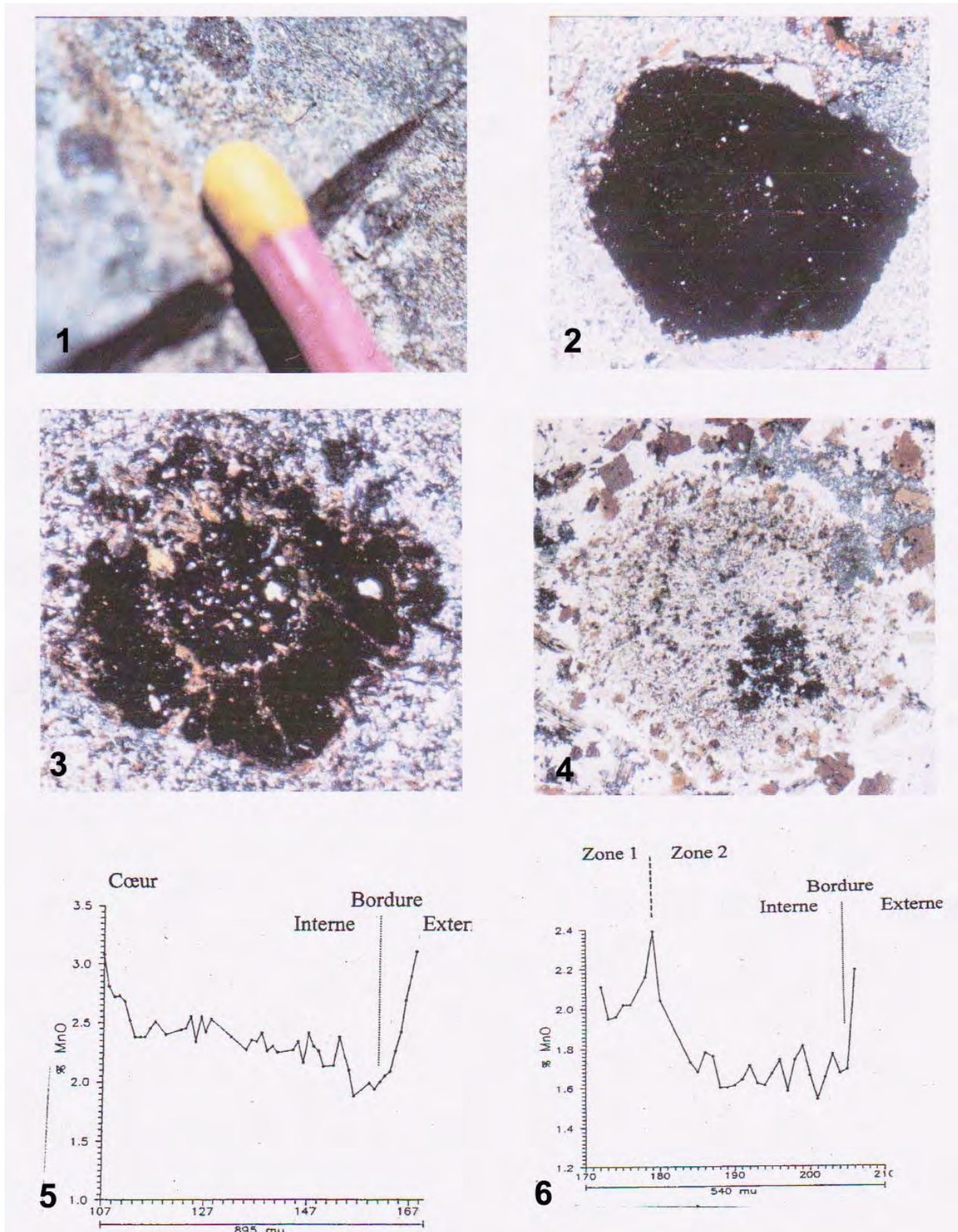
Fig. 2. — Outcrop dyke complex of the Cavallers dam (Bohi unit), schematic connection with the fracturation. Length of the outcrop : 5 meters. Abbreviations: g- gallery, e- stairs, A1- Relation aplitic and basic rock, A2- Aplite with tourmaline spots, A3- Post-A2 aplite with tourmaline spots, S- Stockscheider, t- Tourmaline joints.

L'Unité de Bohi est caractérisée par l'important complexe aplitopegmatitique du Barrage de Cavallers (Fig. 1 : 6) parallèle à la « Shear Zone » du Rio San Nicolau (Fig. 1 : SN), cicatrice majeure dont la signification d'accident précoce a été précisée par Leblanc *et al.* (1994). Ces auteurs considèrent que le couloir du Rio San Nicolau a joué dès le stade magmatique avant la cristallisation complète du granite. Ainsi il pourrait être, pour nous, responsable d'une première phase aplitopegmatite (aplite à nodules de tourmaline, aplites à cordiérite ...) malgré une série de jeux plus tardifs. Un exemple de ses relations complexes est donné à la figure 2 (barrage de Cavallers). On note, dans un premier temps, la mise en place d'un faciès basique-acide, enclaves basiques dans une matrice acide (A1) résultant de la montée simultanée des deux phases magmatiques. Elle est en contact net avec une aplite à taches de tourmaline (Fig. 2 : A2). L'ensemble est décalé par une faille (rejet un mètre). Dans un deuxième temps une aplite A3 à taches de tourmaline s'est mise en place dans cette zone en extension. Le contact A1-A3 est souligné par un « stockscheider » de 5-6 cm d'épaisseur à grandes lamelles de muscovite et tourmaline. Comme dans l'Unité du Nethou, certains faciès témoignent d'une mise en place dans un granite refroidi : « stockscheider » au contact des granites à cordiérite de la partie centrale de l'Unité, enclaves de granodiorite dans les granites à cordiérite, filons de granite à cordiérite dans les tonalites, structure microgranitique rappelant les microgranites de l'Unité du Nethou (Charlet & Dupuis, 1982).

En conclusion, à propos des champs filoniens, les granitoïdes de la Maladeta et les satellites filoniens montrent clairement l'existence d'une mise en place qui s'est étalée dans le temps. Mis en évidence dès 1979 par Charlet, le caractère polydiapirique du massif granitoïde de la Maladeta fut confirmé et précisé par Leblanc *et al.* (1994). La différence du contenu minéralogique des séries pétrographiques M1/M2 et M3 fut précisée sur le plan chimique dans la synthèse géologique et géophysique des Pyrénées (Charlet, 1996). La série M2 est métalumineuse à peralumineuse pour le cœur de l'unité de Bohi, essentiellement peralumineuse pour la série M3. En outre pour Charlet (1979) la présence de septas de schistes métamorphiques essentiellement localisés dans la série M3 jointe à ses caractéristiques chimico-minéralogiques suggère la contribution d'au moins deux magmas différents, l'un d'origine mantellique (séries M1 et M2), l'autre d'origine plus crustale (série M3). Ce point de vue fut corroboré par Michard-Vitrac *et al.* (1980) sur base de l'étude des isotopes de l'oxygène et rejoint les études effectuées par d'autres auteurs sur les relations granites-enclaves (Bussy, 1990).

IV. — LE POLYMETAMORPHISME AU CONTACT DES GRANITOÏDES DE LA MALADETA

En 2005, El Haji défendait sa thèse sur les relations entre les paragenèses de métamorphisme au contact du massif et les déformations en tant qu'éléments de compréhension de la mise en place polydiapirique des granitoïdes de la Maladeta. Nous porterons notre attention sur les séries pélitiques du Dévonien et ampélitiques du Silurien. En effet les séries carbonatées du Dévonien sont affectées par des phénomènes de skarnification qui masquent les relations entre paragenèses de métamorphisme et déformation en bordure du massif. En outre en sélectionnant les séries dévonienne et silurienne on peut comparer le métamorphisme au contact des unités du Nethou et de Bohi, les séries du Cambro-Ordovicien étant essentiellement localisées en bordure de l'unité orientale de Capdella.



Le Silurien est classiquement représenté dans toute les Pyrénées par un faciès « Black Shale » qui se distingue des pélites du Dévonien par une plus grande richesse en Al et des teneurs plus faibles en Fe–Mg, ce qui dans un diagramme A-C-F les place, en mésosome, vers le pôle andalousite –sillimanite

(Charlet, 1977). Les paragenèses des séquences pélitiques du Dévonien sont plus diversifiées (biotite-muscovite-andalousite-cordiérite) mais ce qui les caractérise d'avantage est l'apparition d'un grenat de type almandin au contact des roches basiques de bordure de l'unité du Nethou.

Fig. 3. — Les almandins. De l'aspect macroscopique à la microsonde. 1- Aspect macroscopique, dimension des porphyroblastes d'almandin : 0,3 cm ; 2- Porphyroblaste de grenat almandin dans une cornéenne (dimension : 0,3 cm), lame mince, lumière polarisée analysée ; 3- Zonage dans un porphyroblaste de grenat almandin dans une cornéenne (dimension : 0,3 cm), lame mince, lumière polarisée non analysée ; 4- Almandin dans une roche basique, rétrotransformé en un amas de quartz-biotite (dimension : 0,3 cm), lame mince, lumière polarisée analysée ; 5- Profil Mn au travers d'un grenat almandin (voir Fig. 3 : 2), analyse à la microsonde ; 6- Répartition zonaire du Mn dans un grenat almandin (voir Fig. 3 : 4), analyse à la microsonde.

Fig. 3. — Almandins. From the macroscopic aspect to the microprobe. 1- Macroscopic aspect, size of the almandin porphyroblasts : 0,3 cm ; 2- Almandin porphyroblast in an hornfels (size 0,3 cm), thin section, cross polar light; 3- Zoning in a almandin porphyroblast (size 0,3 cm) in an hornfels, thin section, cross polar light; 4- Almandin in a basic rock retrotransformed in a quartz-biotitic mass (size 0,3 cm), thin section, cross polar light; 5- Section across an almandin (see Fig. 3 : 2), profile of Mn, microprobe analysis; 6- Zoning of Mn in an almandin (see Fig. 3 : 4), microprobe analysis.

1) L'hydrothermalisme en bordure du massif

Son importance apparaîtra dans une série de séquences de rétrotransformisme qui affectent les paragéneses à grenat almandin du Dévonien ou à andalousite-sillimanite du Silurien. L'intervention des fluides issus du magma granitique fut mise en évidence grâce aux isotopes C-O des séquences carbonatées du Dévonien (Delgado *et al.*, 1996). Pour nous elle se marque par la généralisation, sur toute la bordure du massif, d'une minéralisation à tourmaline-muscovite dans les cornéennes du Dévonien (Charlet, 1997 ; El Haji, 2005) mais aussi d'une minéralisation à Au-As (Delgado *et al.*, 1996) ou uranifère (Charlet, 1992).

2) La paragénesis à grenat almandin

Elle apparaît exclusivement en bordure de l'unité du Nethou dans des cornéennes du Dévonien au contact des roches basiques de type M1. Trois secteurs d'affleurements ont été signalés par Charlet (1977) et El Haji (2005) : à l'extrémité occidentale du massif (route Benasque-Plan de l'Hospital, Fig. 1 : 7a), au sud dans la haute vallée de Vallibierne (Fig. 1 : 7b), au nord dans la zone de Mulleres (Fig. 1 : 7c). Si elle fut mise en évidence dès 1977 par l'un de nous et signalée également par Debon (1975) dans le massif de Cauterets, leur présence ne fut pas reprise dans les études ultérieures d'Evans (1993) et Evans *et al.* (1998). Cependant elle permet d'argumenter sur l'existence d'un dôme thermique précurseur de la mise en place des granitoïdes sens large, le grenat almandin étant remanié en xéno-cristaux dans les roches basiques.

Macroscopiquement, les grenats, en plages de 0,3 à 1 cm de diamètre maximum sont souvent entourés d'une auréole blanchâtre, quartzreuse (Fig. 3 : 1). En lames minces les almandins présentent des aspects qui vont des cristaux automorphes entourés d'une couronne de quartz (Fig. 3 : 2) à une rétrotransformose complète conduisant au remplacement par un amas quartz-biotite respectant toutefois le contour initial du minéral (Fig. 3 : 4). L'évolution complexe du grenat est encore marquée, au cours de sa formation, par une zonation optique soulignée par une couronne interne de quartz et biotite (Fig. 3 : 3). Enfin la disposition des inclusions de biotite permet de discuter des relations entre le développement des grenats et la déformation. On peut reconnaître la présence de structure sigmoïde à la fig. 4 : 1 alors que le développement du grenat apparaît antérieure à la schistosité principale S2 à la fig. 4 : 2. L'étude à la microsonde a d'abord permis de préciser le chimisme des grenats : suivant les échantillons, 70 à 77 % d'almandin -14 à 22 % de pyrope - 4 à 5% de spessartine et d'andradite + grossulaire, ce qui les placerait dans la zone à sillimanite de haute température-basse pression (Sturt, 1962).

Les profils au MEB montrent d'une manière générale un zonage complexe mais caractérisé par une augmentation de la teneur en Mn et une chute de la teneur en Mg du cœur vers les bordures des cristaux (Fig. 3 : 5). Cette allure a été discutée par El Haji (2005). Elle est interprétée par de nombreux auteurs comme une phase rétrotransformose postérieure à la croissance prograde du grenat. En outre l'un des échantillons a montré le même type de zonage inverse au sein du cristal, permettant de distinguer deux zones dans sa croissance et que l'on pourrait interpréter comme liée à une phase intercalaire de rétrotransformose dans l'évolution prograde du cristal (Fig. 3 : 6). L'étude des grenats de type almandin nous permet ainsi de caler les stades de métamorphisme par rapport à la mise en place des granitoïdes et des déformations. Le développement des grenats s'étale au cours des stades principaux des déformations varisque, et apparaît comme annonçant la mise en place des roches basiques. L'histoire du développement des grenats de type almandin est donc très complexe. Des phases rétrogrades s'intercalent parfois dans un métamorphisme prograde étalé dans le temps. Finalement un épisode hydrothermal conduit à

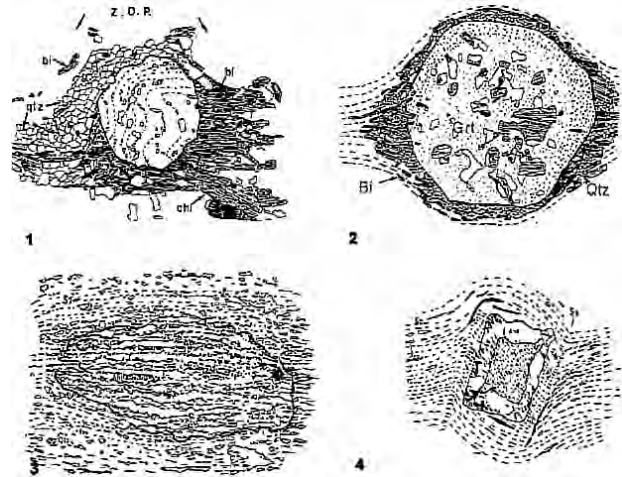


Fig. 4. — Relation métamorphisme-déformation. 1- Allure sigmoïdale dans un porphyroblaste de grenat almandin ; 2- Porphyroblaste d'almandin anté-schistosité principale S2 ; 3- Porphyroblaste d'andalousite post-schistosité S2 ; 4- Porphyroblaste d'andalousite, relation avec la schistosité S2 et la phase S3 marquée par un clivage de crénulation.

Fig. 4. — Relation between metamorphism and deformation. 1- Sigmoidal arrangement in a almandin porphyroblast; 2- Almandin porphyroblast, ante-main schistosity S2; 3- Andalousite porphyroblast post-schistosity S2; 4- Andalousite porphyroblast, relation with the main schistosity S2 and the phase S3 marked by a cleavage of crenulation.

la déstabilisation des grenats et se caractérise par la présence de feldspaths alcalins à macles quadrillées et de tourmaline soit dans les roches basiques, soit dans les amas quartzo-biotitiques provenant de la rétrochorde du grenat.

3) Les silicates d'alumine

Les silicates d'alumine sont fréquents dans les ampélites du Silurien de l'auréole au contact des granitoïdes. Leur étude a permis de mettre en évidence le polymétamorphisme au contact des granitoïdes de la Maladeta et leur relation avec la déformation et le polydiapirisme (El Haji, 2005).

Pour l'unité du Nethou : en relation avec les intrusions basiques de la Sierra Negra, El Haji (2005) a signalé la présence de sillimanite en fibres ne présentant aucune relation avec la foliation et que l'on peut considérer comme liée à la même étape que celle qui a conduit au développement des almandins dans les cornéennes du Dévonien. Cependant le minéral de métamorphisme largement dominant dans ces ampélites est l'andalousite dont la répartition forme une auréole développée sur plus de 4 km. Les relations avec la déformation (El Haji, 2005) montrent ainsi que la formation des andalousites s'est largement étalée dans le temps, couvrant les différentes phases de déformation des mouvements varisques avec un développement important au cours de la phase responsable de la schistosité principale S2 que l'on peut considérer comme contemporaine de la mise en place des granitoïdes. Ces relations sont illustrées (Fig. 4 : 3-4) par une andalousite qui s'est développée postérieurement à S2 et une andalousite subcontemporaine à S2 et qui a tourné dans la schistosité de crénulation S3. Lorsque les ampélites du Silurien sont en contact avec les granitoïdes se développe un métamorphisme prograde à sillimanite. Elle remplace l'andalousite en bordure du pluton.

Dans l'unité de Bohi, les observations permettent de préciser d'avantage les conditions de métamorphisme, le Silurien étant fréquemment en contact avec les granitoïdes. On peut y noter, comme pour l'unité du Nethou, que la sillimanite développée en bordure du massif au cours de la phase principale de déformation a été précédée par une andalousite qu'elle pseudomorphose. Ainsi cette andalousite précoce aurait cristallisé lors de la montée du flux thermique précédant la mise en place du pluton. On retrouve donc des conclusions analogues à celles développées à partir de l'étude des grenats de type almandin. Enfin il apparaît parfois au contact immédiat du pluton une zone à muscovite-quartz qui pseudomorphose la sillimanite et témoigne d'un rétrochorde lié à une phase hydrothermale. Les grandes lamelles de muscovite non orientées soulignent cette phase tardive, postcinématique, responsable du métamorphisme rétrograde. Cette phase se marquerait également par la présence, dans la région d'Espot, de minéralisations uranifères (Charlet, 1992) liées à la mobilisation du stock en uranium des faciès « Black Shale » du Silurien (Charlet, 1989).

V. — CONCLUSIONS GENERALES

Les relations entre les types pétrographiques, les corps filoniens associés, le métamorphisme au contact et les phases de déformation permettent de retracer la succession des événements :

Mise en place précoce de roches basiques précédée par un métamorphisme de haute température à almandin (zone de transition sillimanite-andalousite) dans les cornéennes du Dévonien ou à sillimanite-andalousite dans le Silurien. On

peut considérer que la mise en place des roches basiques s'est prolongée dans le temps, passant à des relations basique-acide lors de la mise en place des granodiorites. On les assimilerait aux massifs basiques de Pouget *et al.* (1989) d'autant que le massif de Tahull a une individualisation très marquée au sud de l'unité de Capdella. En outre la comparaison pourrait être établie avec le granite du Mt Blanc dont la mise en place est, selon Bussy (1990), favorisée par l'intrusion d'un magma basique d'origine mantellique en contexte distensif. En effet les roches basiques du massif de la Maladeta, précoces et précédées par une anomalie thermique, pourraient être liées à une phase distensive pré-varisque (anté D1-S1) que nous pourrions mettre en relation avec un volcanisme du Viséen (Navidad & Carreras, 1995) et le magmatisme rhyodacitique du pic Cerler au sud de l'Unité du Nethou et attribué au Dévonien par Rios (2002) Elle serait ainsi responsable de la fusion partielle d'une croûte continentale métapélitique, modèle proposé par Michard-Vitrac *et al.* (1980) à la lumière de l'étude des isotopes de l'oxygène.

Mise en place d'un ensemble granodioritique-granite monzonitique en disposition zonale concentrique dont la consolidation est synchrone des phases de raccourcissement des mouvements varisques. Elle se traduit dans l'encaissant par un métamorphisme prograde avec les andalousites dans la partie externe de l'auréole et la sillimanite en bordure du pluton et dont le développement couvre les phases de déformation responsables des schistosités S2-S3.

Mise en place d'une série magmatique plus tardive, hyperalumineuse où la source est à rechercher dans une composante crustale plus marquée, liée à la fusion partielle de l'ensemble silico-alumineux en relation avec l'intrusion des roches basiques. Elle débute par les granites du cœur de l'unité du Nethou en disposition zonale concentrique avec la série précédente de type granodioritique et se poursuit par la mise en place de corps granitiques ou aplito-pegmatite en relation avec les phases de déformation tardive (« shear zone » du Rio San Nicolau) ou distensive (granites des cirques de l'unité de Bohi, microgranite de l'unité du Nethou).

Par ailleurs les relations géométriques entre les nombreux filons acide-basique qui lardent le massif témoignent de phases distensives successives que nous considérerions comme tardi-hercyniennes. Cette dernière série présenterait de fortes analogies avec les massifs décrits par Pouget *et al.* (1989) et notamment ceux du complexe de Gavarnie considérés comme tardifs dans l'évolution de la chaîne varisque. Enfin un métamorphisme rétrograde responsable de la déstabilisation du grenat de type almandin ou de la sillimanite et la mise en place d'une minéralisation uranifère découverte à l'extrémité orientale du massif (Charlet, 1992) est liée à une phase hydrothermale-pneumatolytique tardive. Ainsi au polydiapirisme argumenté par la distribution des types pétrographiques (Charlet, 1979, 1983), par les études structurales (Leblanc *et al.*, 1994) et l'étude du métamorphisme de contact (Rios, 1984 ; Evans *et al.*, 1998 ; El Haji, 2005) se superpose l'intervention parfois précoce de structures tectoniques qui entraînent une mise en place des granitoïdes étalée dans le temps.

Le secteur de Benasque, à la partie occidentale du Massif de la Maladeta, est particulièrement exemplaire à cet égard. Les manifestations magmatiques s'étaleraient depuis le complexe rhyodacitique de Cerler (Fig. 1 : 8) considéré comme Dévonien par Rios (2002) jusqu'à la mise en place du granite des Posets (Fig. 1 : 9), syn-phase de déformation D3 (Rios, 1984) en passant par le complexe plutonique de la Maladeta dont la mise en place est liée à la phase principale D2 et se poursuit jusqu'aux phases cassantes ultérieures. Pour nous, il apparaît en outre que les unités principales reconnues dans le massif

et qui sont bien caractérisées par des traits pétrographiques et structuraux distincts étaient individualisées dès les premiers stades de mise en place des granitoïdes de la Maladeta. Les couloirs tectoniques (voir la « shear zone » du Rio San Nicolau)

ont pu fonctionner très tôt malgré un jeu plus tardif lors de la tectogénèse alpine à laquelle Lamouroux (1986) attribue de son côté la division du massif en unités.

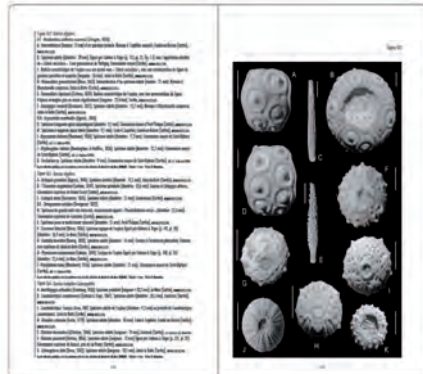
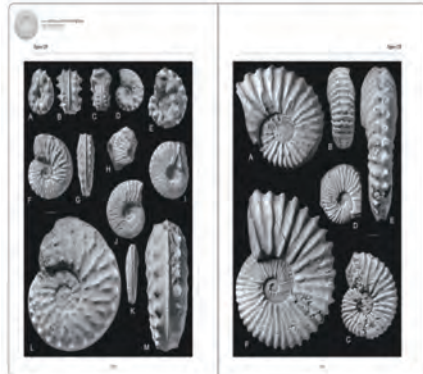
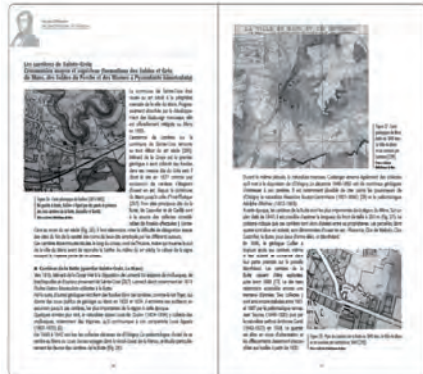
BIBLIOGRAPHIE

- ARRANZ R., LAGO M. & CORRETGE L.G. (1995). — Composición e implicaciones barométricas de los anfíboles en el Complejo Plutónico de la Maladeta (Pirineos Centrales, Huesca-Lérida). *Cuad. Lab. Xeoloxico Laxe, Coruña*, **20** : 167-179.
- ARRANZ E., LAGO M. & POCOVI J. (1992). — Petrologia de los granitoïdes de la Maladeta en su sector de Tahull y lago Negro (Lerida). *Cuad. Lab. Xeoloxico Laxe, Coruña*, **17** : 159-171.
- BOURKE D. (1979). — *Etude géologique de la terminaison orientale du massif de la Maladeta et de ses abords, région d'Espot*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Techniques de Lille : 69 p. et 21 pl.
- BUSSY F. (1990). — *Pétrogenèse des enclaves microgrenues associées aux granitoïdes calco-alkalins : exemple des massifs varisques du Mont Blanc et miocène du Monte Capanne*. Thèse de doctorat, Université de Lausanne : 309 p.
- CHARLET J.-M. (1968). — Étude préliminaire du massif granitique de la Maladeta (Pyrénées centrales espagnoles). *Ann. Soc. géol. Nord*, **88** : 65-75.
- CHARLET J.-M. (1977). — Le métamorphisme au contact des granitoïdes entre les vallées de l'Esera et de la Noguera Ribargozana (Pyrénées centrales espagnoles). *Ann. Soc. géol. Nord*, **97** : 165-177.
- CHARLET J.-M. (1979). — Le massif granitique de la Maladeta. Synthèse des données géologiques. *Ann. Soc. géol. Belgique*, **202** : 313-323.
- CHARLET J.-M. (1983). — Los granitos ligados a la orogenesis hercinica. In : MARTINEZ DIAZ C. (coord.), *Carbonifero y Permico de España*. IGME publ.: 315-328.
- CHARLET J.-M. (1989). — Découverte d'anomalies uranifères dans le Silurien des Pyrénées centrales espagnoles. *Ann. Soc. géol. Nord*, **58** : 187-194.
- CHARLET J.-M. (1992). — Découverte d'indices uranifères à l'extrémité orientale du massif granitique de la Maladeta. Contexte géologique et métallogénique. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **314**, Série 2 : 683-690.
- CHARLET J.-M. (1996). — Complexe plutonique de la Maladeta. In : DEBON F., ENRIQUE P. & AUTRAN A. (coord.), *Magmatisme hercynien* ; in : BARNOLAS A. & CHIRON J.C. (eds), *Synthèse géologique et géophysique des Pyrénées* (Tome I, Cycle hercynien). BRGM, Orléans & ITGE, Madrid édit. : 427-429.
- CHARLET J.-M. (2002). — El macizo granítico de la Maladeta. In : *Livret guide de la carte géologique d'Espagne, feuille de Benasque*. Institut géologique et minier d'Espagne : 50-60.
- CHARLET J.-M. & DUPUIS C. (1982). — Observations nouvelles dans le massif de la Maladeta. *Pirineos*, **116** : 69-78.
- DEBON F. (1975). — Les massifs granitoïdes à structure concentrique de Cauterets-Panticosa (Pyrénées occidentales) et leurs enclaves. *Sciences de la Terre, Nancy, Mémoire* **33** : 420 p.
- DELGADO J., SOLER A. & ARCOS D. (1996). — El metamorfismo de contacto e hidrotermalismo asociados al batolito de la Maladeta. *Geogaceta*, **20** : 1578-1581.
- EL HAJI A. (2005). *Le métamorphisme au contact des granitoïdes de la Maladeta (Pyrénées centrales espagnoles) - Relations métamorphisme-déformations en tant qu'éléments de compréhension de la mise en place polydiapirique des granitoïdes*. Thèse de doctorat en Sciences appliquées, Faculté Polytechnique de Mons : 487 p.
- EVANS N.G. (1993). — *Deformation during the emplacement of the Maladeta granodiorite, Spanish Pyrenees*. Ph.D. thesis, University of Leeds (London) : 284 p.
- EVANS N.G., GLEIZES G., LEBLANC D. & BOUCHEZ J.L. (1998). — Syntectonic emplacement of the Maladeta granite (Pyrenees) deduced from relationships between Hercynian deformations and contact metamorphism. *Jl. Geol. Soc., London*, **155** (1) : 209-220.
- GARCIA-BELLES J., ARRANZ E., LAGO M. & VALENZUELA J. (1998). — Emplazamiento tardihercinico de diques relacionadas con el complejo plutónico de la Maladeta. *Geogaceta*, **24** : 131-134.
- LAMOUREUX C. (1986). — *Les mylonites des Pyrénées. Classification, mode de formation et évolution*. Thèse de doctorat-ès-Sciences, Université de Toulouse : 552 p.
- LAMOUREUX C. (1991). — Les mylonites des Pyrénées. Classification. Mode de formation. Evolution. *Soc. géol. Nord, Publication* **19** : 371 p.
- LAUMONIER B., GARCIA-SANSEGUNDO J., POBLET J., GLEIZES G. LEBLANC D. & BOUCHEZ J.L. (1997). — Variscan granites of the Pyrenees revisited: their role as syntectonic markers of the orogen - Comments and reply. *Terra Nova*, **9** (3) : 144-157.
- LEBLANC D., GLEIZES G., LESPINASSE P., OLIVIER P.H. & BOUCHEZ J.L. (1994). — The Maladeta granite polydiapir, Spanish Pyrenees: a detailed magneto-structural study. *Jl. Struct. Geol.*, **16** (2) : 223-235.
- MICHARD-VITRAC A., ALBAREDE F., DUPUIS C. & TAYLOR H.P. (1980). — The genesis of Variscan (Hercynian) plutonic rocks : Interferences from Sr, Pb and O studies on the Maladeta igneous complex, Central Pyrenees (Spain). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **72** : 57-72.
- NAVIDAD M. & CARRERAS J. (1995). — Pre-Hercynian magmatism in the eastern Pyrenees and the geochemical setting. *Geologie en Mijnbouw*, **74** : 65-77.
- POUGET P., LAMOUREUX C., DAHMANI A., DEBAT P., DRIOUCH Y., MERCIER A., SOULA J.C. & VEZAT R. (1989). — Typologie et mode de mise en place des roches magmatiques dans les Pyrénées hercyniennes. *Geol. Rundschau*, **78** (2) : 537-554.
- RIOS L.M. (1984). — Reflexions sobre las relaciones del encajante paleozoico con los granitos Ejemplo de los Pirineos de Benasque, provincia de Huesca. In : *Actas del 1º Congreso Español de Geologia (Segovia)*, t. **5** : 313-332.
- RIOS L.M. (2002). El complejo de riodacitas de Cerler. In : *Livret guide de la carte géologique d'Espagne, feuille de Benasque*. Institut géologique et minier d'Espagne : 63-64.
- STURT B.A. (1962). — The compositions of garnets from pelitic schists in relation to the grade of regional metamorphism. *Jl. Petrol.*, **3** (2) : 181-191.

MUSÉUM

NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE

..... Patrimoine géologique



Collection **Patrimoine géologique**,
tome 6
165 x 240 mm broché / *paperback*
texte en français / *text in french*
384 p., 274 figures coul., 11 tableaux
CD-ROM (contenu paléontologique
et chapitres complémentaires)
ISBN 978-2-85653-775-6
Prix 35,90€ TTC (34,03€ HT)

Publié le 25 septembre 2015

STRATOTYPE CÉNOMANIEN

Nicolas Morel, coordinateur

L'AUTEUR

Nicolas Morel, géologue de formation, attaché de conservation du patrimoine, est le responsable du Muséum Vert, Muséum d'Histoire naturelle du Mans Il a en charge la conservation et la valorisation d'importantes collections paléontologiques historiques liées au Cénomanien et participe à l'étude scientifique de ce patrimoine.

LE LIVRE

La région du Mans (*Cenomanum*) a été choisie par Alcide d'Orbigny en 1847 comme le type d'un nouvel étage géologique du Crétacé qui constitue aujourd'hui la référence internationale de l'étage Cénomanien. L'ambition de cet ouvrage est dans un premier temps de faire découvrir l'histoire de l'étude du Cénomanien. Les sites historiques, dont la plupart sont aujourd'hui inaccessibles sont également décrits. Dans un deuxième temps, la région stratotypique est décryptée afin de comprendre l'enchaînement des formations géologiques qui constituent le Cénomanien local puis de les replacer au sein du Bassin parisien, voire plus largement à l'échelle mondiale. Une part importante de ce volume est consacrée à la paléontologie du stratotype qui est en grande partie à l'origine de sa sélection par d'Orbigny. Certains groupes fossiles, notamment les mollusques, les crustacés et les échinodermes, sont d'une richesse exceptionnelle. Enfin, le stratotype Cénomanien, par ses sites et ses collections, est un élément indiscutable du patrimoine géologique national.

LA COLLECTION

Le temps du géologue est divisé en étages définis par les fossiles qu'ils contiennent. Afin d'établir des références universelles, certains sites où les couches géologiques correspondant à ces étages affleurent ont été qualifiés de « stratotypes ». La collection *Patrimoine géologique* a pour objet de publier des synthèses sur chacun des stratotypes situés en France.

Commandes et renseignements

Muséum national d'Histoire naturelle
Publications scientifiques
Case postale 41 • 57 rue Cuvier
75 231 Paris cedex 05

Tél. 01 40 79 48 05 • Fax 01 40 79 38 40
diff.pub@mnhn.fr



SCIENCEPRESS.MNHN.FR

UN NUCINULIDE (BRACHIOPODA, RHYNCHONELLIDA) NOUVEAU DE L'EMSIEN (DEVONIEN) DU MASSIF ARMORICAIN (FRANCE)

A new nucinulid (Brachiopoda, Rhynchonellida) from the Emsian (Devonian) of the Armorican Massif (France)

par Denise BRICE (*) & Bernard MOTTEQUIN (**)

Résumé. – Le nucinulide *Palinulus armoricanus* nov. sp. (brachiopode rhynchonellide) est abondant au sein du membre inférieur de la Formation des Marettes qui était autrefois exposée au sein d'une tranchée temporaire à La Lézais (Gahard), au nord de Rennes dans le Synclinorium du Ménez Bélaïr (Massif Armoricain). Les conodontes, brachiopodes et autres faunes associées indiquent un âge emsien supérieur (partie inférieure). *Palinulus armoricanus* nov. sp. a de nombreux caractères communs avec deux espèces reconnues dans l'Emsien de la partie septentrionale du Gondwana, à savoir *Palinulus zairensis* Sartenaer, 2005 de l'Anti-Atlas marocain et *Palinulus saharensis* Brice et al., 2011 du Maroc oriental (Tafilalt), ainsi qu'une espèce non formellement dénommée et identifiée sous le nom d'« *Uncinulus pila* (Schnur, 1851) » par Schumann (1965) qui provient du Nord de l'Espagne (Chaîne Cantabrique). Cela conforte les reconstitutions paléogéographiques qui soulignent des liens étroits entre l'Afrique du Nord, le Massif Armoricain ainsi que la Péninsule Ibérique : domaine Ibarmaghien = domaine Ibérique-Armoricain-Maghrébin *sensu* Plusquellec (1997).

Abstract. – *The nucinulid* *Palinulus armoricanus* nov. sp. (rhynchonellid brachiopod) is abundant in the lower part of the Les Marettes Formation, which was exposed formerly in a temporary trench at La Lézais (Gahard), north of Rennes (Ménez Bélaïr Synclinorium, Armorican Massif). Conodonts, brachiopods and other associated faunas indicate a Late Emsian age (lower part). *Palinulus armoricanus* nov. sp. displays characters in common with two species recognized in the Emsian of North Gondwana, namely *Palinulus zairensis* Sartenaer, 2005, from the Moroccan Anti-Atlas and *Palinulus saharensis* Brice et al., 2011 from eastern Morocco (Tafilalt), as well as a not formally named species identified as “*Uncinulus pila* (Schnur, 1851)” by Schumann (1965) from northern Spain (Cantabrian Mountains). This reinforces the palaeogeographic reconstructions that display close relationships between North Africa and the Armorican Massif as well as the Iberian Peninsula : Ibarmaghian Domain = Iberian-Armorican-Maghrebin Domain *sensu* Plusquellec (1997).

Mots clés. – Brachiopodes, rhynchonellides, Massif Armoricain, Dévonien inférieur, Emsien supérieur.
Key words. – Brachiopods, rhynchonellids, Armorican Massif, Lower Devonian, Upper Emsian.

I. — INTRODUCTION

Le Dévonien inférieur est une période marquée par une grande diversification chez les brachiopodes, avec une hausse continue du nombre de genres durant l'intervalle Lochkovien-Emsien (Curry & Brunton, 2007). Au Dévonien, la diversité générique maximale est d'ailleurs enregistrée au cours de l'Emsien qui est caractérisé par un haut degré de provincialisme des faunes benthiques (par ex. Boucot *et al.*, 1969 ; Boucot & Blodgett, 2001), probablement en lien avec l'apparition de barrières physiques restreignant les voies de communication dans les zones de basses latitudes (Boucot, 2007). De surcroît, une hausse constante de la diversité générique est observée chez les rhynchonellides au cours du Dévonien inférieur, mais elle demeure moindre que celle des spiriférides (Curry & Brunton, 2007). Outre les rhynchonellides investigués par Brice (1980, 1981, 1991), l'ensemble des brachiopodes éodévoniens du Massif Armoricain (Ouest de la France), qui ont fait l'objet de nombreux

travaux (parmi lesquels Rachebœuf, 1981 ; Gourvenec, 1989 ; Lecomte *et al.*, 1998) au cours des dernières décennies, figurent parmi les mieux documentés d'Europe occidentale.

L'objectif de cette note est la révision et la description d'une des espèces de rhynchonellides les plus abondantes au sein de la Formation des Marettes en Ille-et-Vilaine, identifiée sous le nom d'*Uncinulus pila* (Schnur, 1851) par Brice (1981). Celle-ci l'avait considérée comme étant proche de formes marocaines en provenance du Tafilalt (Le Maître, 1944) et du Maroc présaharien (Drot, 1964) qui avaient été attribuées par ces auteurs à l'espèce de Schnur. Signalons que cette dernière correspond à l'espèce-type du genre *Lapinulus* Sartenaer, 2005. Lors de sa révision partielle du groupe complexe que sont les rhynchonellides Nucinulidae, Sartenaer (2005) a inclus la forme d'Ille-et-Vilaine erronément attribuée à *Lapinulus pila* au sein de son nouveau genre *Palinulus*, mais sans se prononcer sur son identification spécifique. Suite à ces nouveaux éléments

(*) Université Catholique de Lille, Groupe ISA, 48 Boulevard Vauban, 59046 Lille cedex (France) ; e-mail : d.brice@isa-lille.fr

(**) Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, D.O. Terre et Histoire de la Vie, 29 rue Vautier, B-1000 Bruxelles (Belgique) ; e-mail : bmottequin@naturalsciences.be

taxinomiques, il convenait de décrire cette forme de manière détaillée et de discuter ses relations avec les espèces voisines décrites par Schumann (1965), Sartenaer (2005) et Brice *et al.* (2011) en provenance de la marge septentrionale du Gondwana (Maroc et Péninsule Ibérique).

II. — CADRE GEOGRAPHIQUE ET STRATIGRAPHIQUE

La coupe qui a livré le matériel de la présente étude était sise sur le territoire de la commune de Gahard en Ille-et-Vilaine. Elle

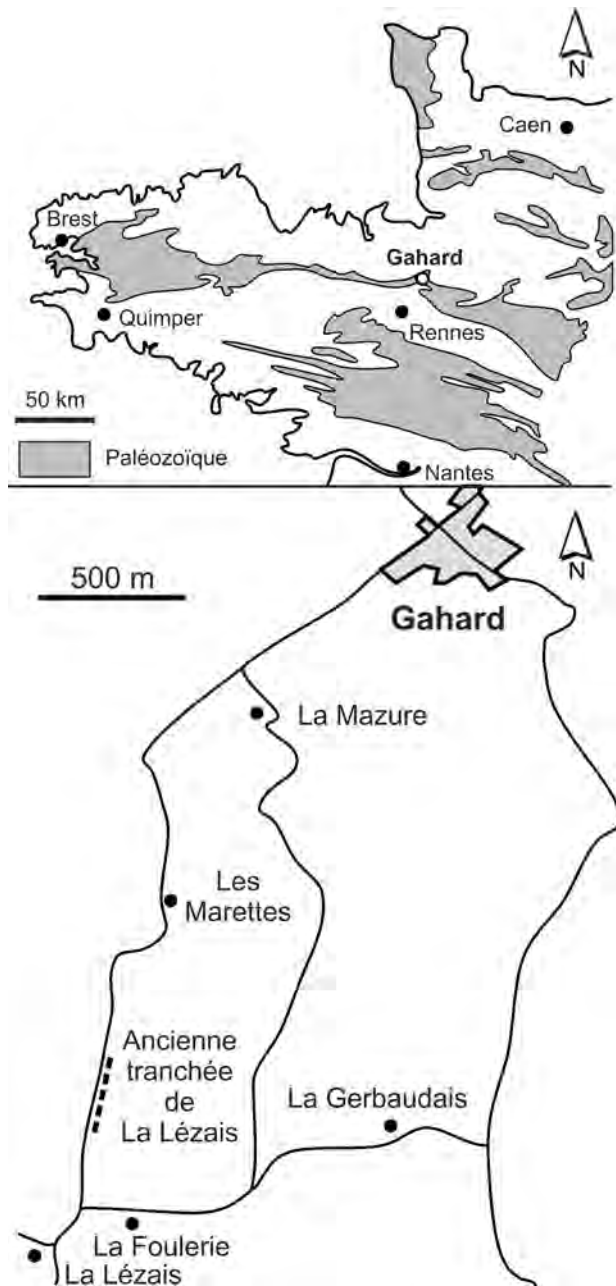


Fig. 1. — Localisation de l'ancienne tranchée de La Lézais, S-SW de Gahard (Ille-et-Vilaine) d'après Morzadec *et al.* (1973, fig. 1 modifiée).

Fig. 1. — Location of the former La Lézais trench, S-SW of Gahard (Ille-et-Vilaine) from Morzadec *et al.* (1973, fig. 1 modified).

se situait dans le Synclinorium du Ménez Béclair qui appartient à la partie orientale du Synclinorium médian armoricain (Fig. 1). Il s'agissait d'une tranchée d'exploration creusée sur le bas-côté du chemin vicinal reliant le hameau de La Lézais à la ferme des Marettes (Morzadec *et al.*, 1981) ; elle est aujourd'hui comblée.

Exposée naguère dans la coupe de La Lézais où son épaisseur avoisinait les 150 m, la Formation des Marettes (Fig. 2) comprend trois membres : le membre inférieur (50 m) constitué de schistes à nodules puis de bancs calcaires (bancs G 57 à G 158 inclus), le membre moyen (> 70 m) incluant des schistes, et le membre supérieur (> 20 m) formé de schistes à nodules puis de calcaires (Morzadec *et al.*, 1981). La Formation des Marettes surmonte celle de La Foulerie (50 m) qui s'en différencie par son caractère essentiellement schisteux. Le contact entre les formations des Marettes et de la Potinais n'était pas exposé dans la tranchée de La Lézais (Morzadec *et al.*, 1981).

La richesse et la diversité de la macrofaune (brachiopodes, crinoïdes, trilobites) et des microfossiles dans la partie inférieure de la Formation des Marettes ont permis des corrélations avec d'autres formations du Synclinorium médian armoricain (Formation de Reun ar C'Hrank, Finistère ; voir Morzadec *et al.*, 1981, fig. 5 ; Morzadec *et al.*, 1988, fig. 3) et d'autres régions d'Europe et d'Afrique du Nord (voir Morzadec *et al.*, 1981, fig. 4-5), malgré la pauvreté des faunes en conodontes (Weyant, 1981), l'absence de goniatites (Babin, 1981) et la discontinuité des dacryoconarides (Lardeux, 1981).

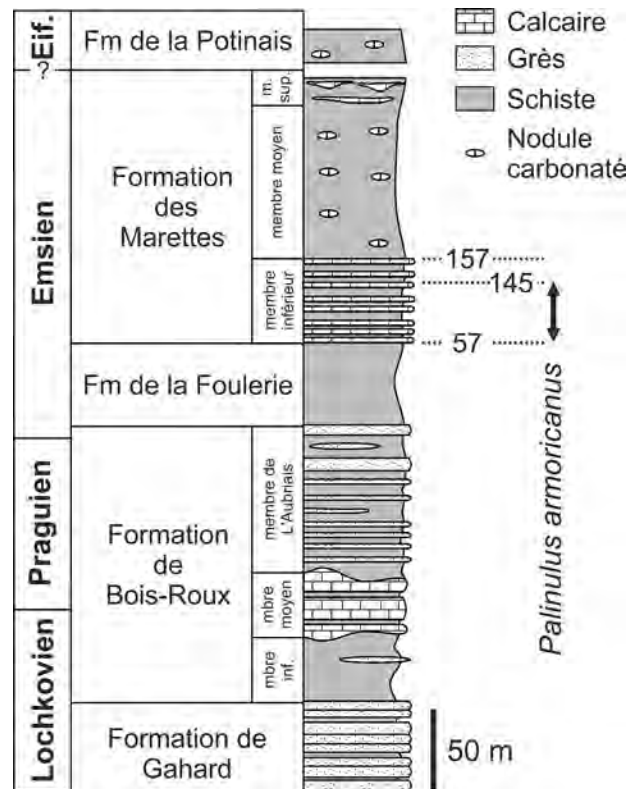


Fig. 2. — Succession des formations du Dévonien inférieur dans la région de Gahard (Ille-et-Vilaine) d'après Morzadec *et al.* (1981, fig. 2 modifiée) et répartition de *Palinulus armoricanus* nov. sp. (G 57-G 145) dans le membre inférieur de la Formation des Marettes.

Fig. 2. — Succession of the Lower Devonian formations in the Gahard area (Ille-et-Vilaine) modified from Morzadec *et al.* (1981, Fig. 2) and distribution of *Palinulus armoricanus* nov. sp. within the Les Marettes Formation.

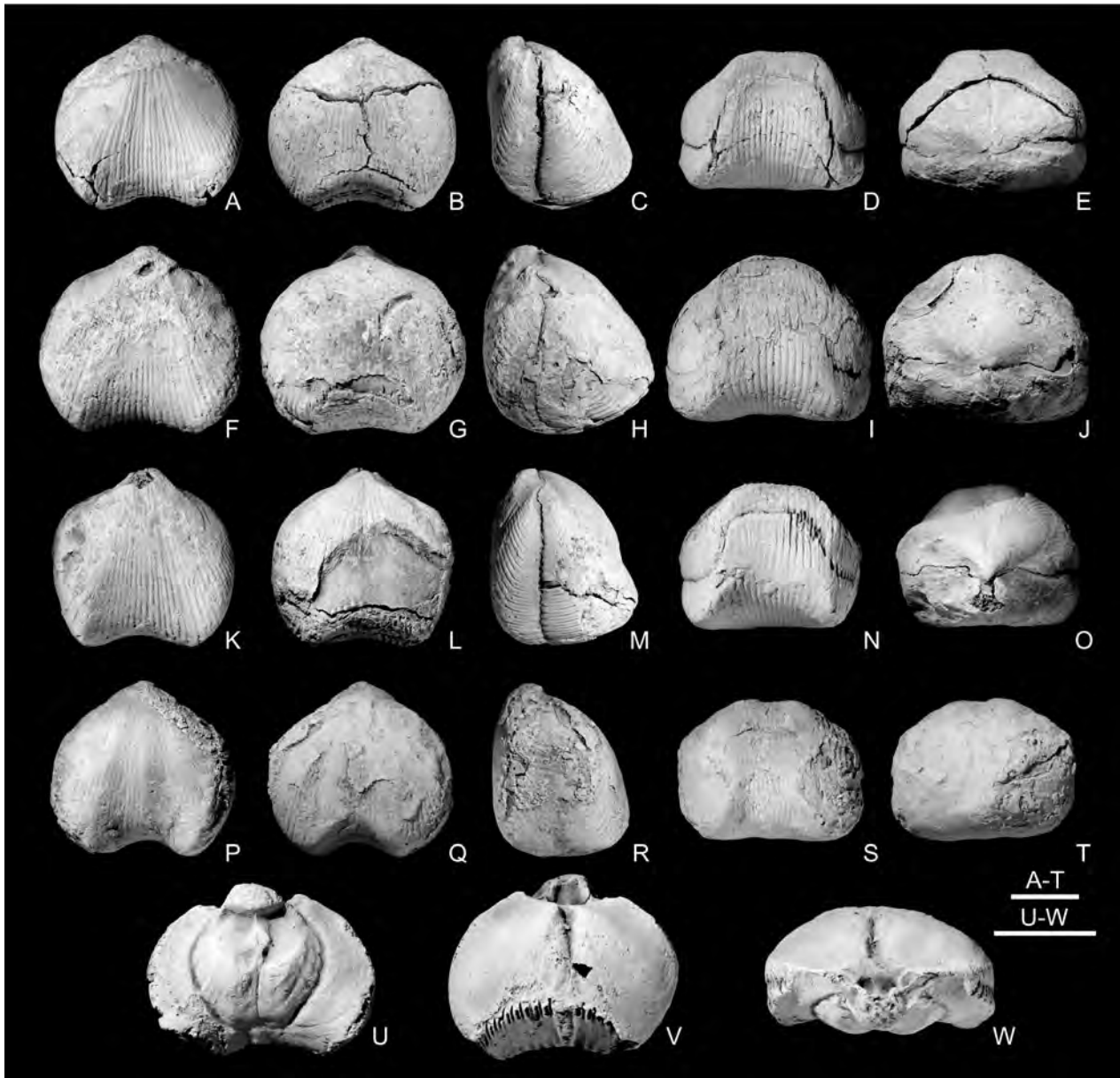


Fig. 3. — *Palinulus armoricanus* nov. sp., Formation des Marettes d'âge emsien (tranchée de La Lézais, Gahard, Ille-et-Vilaine). A–E, Holotype (IGR 17781 ; banc G 143) en vues ventrale, dorsale, latérale, antérieure et postérieure. F–J, Paratype (IGR 17782 ; banc G 143) en vues ventrale, dorsale, latérale, antérieure et postérieure. K–O, Paratype (IGR 14499 ; banc G 143) en vues ventrale, dorsale, latérale, antérieure et postérieure. P–T, Paratype (IGR 14498 ; banc G 142) en vues ventrale, dorsale, latérale, antérieure et postérieure d'un spécimen possédant une crête médiane dans le sinus. U–W, Paratype (IGR 17777 ; banc G 142) moule interne faiblement déformé (champs musculaires ventral très large et dorsal indistinct, septum médian dorsal) en vues ventrale, dorsale et postérieure. Barres d'échelle = 10 mm.

Fig. 3. — *Palinulus armoricanus* nov. sp., from the Emsian Les Marettes Formation (La Lézais trench, Gahard, Ille-et-Vilaine). A–E, Holotype (IGR 17781; bed G 143) in ventral, dorsal, lateral, anterior and posterior views. F–J, Paratype (IGR 17782; bed G 143) in ventral, dorsal, lateral, anterior and posterior views. K–O, Paratype (IGR 14499; bed G 142) in ventral, dorsal, lateral, anterior and posterior views. P–T, Paratype (IGR 14498; bed G 142) in ventral, dorsal, lateral, anterior and posterior views of a specimen with a median swelling in the sinus. U–W, Paratype (IGR 17777; bed G 143), slightly deformed internal mould (very large ventral and indistinct dorsal muscle fields, dorsal median septum) in ventral, dorsal and posterior views. Scale bars = 10 mm.

III. — PALEONTOLOGIE SYSTEMATIQUE

L'ensemble du matériel, dont les types et figurés sont désignés par le sigle « IGR », est déposé et conservé dans les Collections de l'Université de Rennes. Abréviations :

Abréviation stratigraphique : G (signifiant Gahard) suivi du numéro de banc (Morzadec *et al.*, 1981) pour chaque spécimen ;

Abréviations systématiques : sp – spécimen, sp inc – spécimen incomplet, sp déf – spécimen défectueux mal préservé ou déformé, m ext – moulage externe, m int – moulage interne,

vv – valve ventrale, vd – valve dorsale, crs – crête médiane dans le sinus, sd – sillon dorsal médian, cm – côte médiane, cp – côte pariétale, cl – côte latérale ;

Mensurations : L – longueur de la coquille, l – largeur de la coquille, e – épaisseur de la coquille, aa° – angle apical en degrés, ls – largeur du sinus.

Famille Nucinulidae SARTENAER, 2004

Genre *Palinulus* SARTENAER, 2005

Espèce-type : *Palinulus zairensis* Sartenaer, 2005 ; partie inférieure de la Formation de Khebia, Emsien supérieur, plaines du Dra orientales (Anti-Atlas), Maroc.

Palinulus armoricanus nov. sp.

(Fig. 2-3)

v. 1981 – *Ucinulus pila* (SCHNUR, 1851) ; Brice, p. 202-204, pl. 24, fig. 4; pl. 25, fig. 12-16 ; fig.-texte 4A-B.

Types : Holotype IGR 17781, G 143 (Brice, 1981, pl. 25, fig. 16a-c) (Fig. 3 A-E) ; paratypes : IGR 17782, G 143 (Brice, 1981, pl. 25, fig. 17a-b) (Fig. 3 F-J) ; IGR 14499 G 142 (Fig. 3 K-O) ; IGR 14498, G 142 (Fig. 3 P-T) ; IGR 17777 G 143, moulage interne (Brice, 1981, pl. 25, fig. 12) (Fig. 3 U-W) ; IGR 17780, G 143 (Brice, 1981, pl. 25, fig. 15a-b) ; IGR 14496, G 143 ; IGR 14497, G 143 ; IGR 14813, G 142, usures sériées (Brice, 1981, fig. 4A).

Figurés : moulages internes IGR 14766, G 94 (Brice, 1981, pl. 24, fig. 4), IGR 17778, G 137 (Brice, 1981, pl. 25, fig. 13) et usures sériées IGR 14814, G 143 (Brice, 1981, fig. 4B).

Locus typicus et stratum typicum : tranchée de La Lézais (Ille-et-Vilaine), Formation des Marettes, bancs G 142-143 (Morzadec *et al.*, 1981) (Fig. 1-2).

Etymologie : *armoricanus* (latin), en référence au Massif Armoricaïn où se situe le *locus typicus* de l'espèce.

Matériel : 246 sp, 49 vv, 9 vd, 18 m int (voir l'inventaire complet en Annexe 1).

Diagnose. Espèce de *Palinulus* à contour subpentagonal arrondi à bord antérieur émarginé, un peu plus large que longue (jusqu'à 17,7 mm de largeur), le maximum se situant dans la moitié antérieure de la coquille. Forme nettement dorsibiconvexe à valve ventrale très peu convexe, la dorsale présentant son maximum de profondeur près du front où se situe le sommet de la coquille. Côtes faiblement convexes, un peu moins nombreuses que chez les deux autres espèces de *Palinulus*, aplaties et creusées d'un sillon médian à proximité des commissures antérieure et latérales chez certains spécimens. Grand champ musculaire ventral.

Description.

Caractères externes. Coquille de taille petite à moyenne mais de dimensions très variables (jusqu'à 17,7 mm de largeur), nettement dorsibiconvexe, de contour subpentagonal arrondi, presque toujours un peu plus large que longue ; largeur maximale située dans la moitié antérieure ; bord antérieur émarginé ; commissure antérieure uniplissée, faiblement déprimée ; dans la moitié antérieure, les valves ventrale et dorsale, ainsi que le bourrelet, se recourbent à angle droit avant d'atteindre le bord antérieur ; commissures frontale et latérales généralement déprimées.

Valve ventrale faiblement convexe postérieurement ; crochet petit, pointu et recourbé mais non en contact avec l'umbo dorsal ; angle apical toujours supérieur à un angle droit ; sinus peu profond, mal délimité par rapport aux flancs, débutant en avant de l'umbo, s'élargissant et s'approfondissant jusqu'au bord antérieur ; présence peu fréquente dans le sinus (14.5% des spécimens) d'une faible crête médiane atteignant exceptionnellement la base de la languette ; languette repliée verticalement en direction dorsale, haute, en forme de U, plane ou légèrement concave.

Valve dorsale très épaisse, atteignant son maximum de profondeur près du bord antérieur ; bourrelet obsolète souvent creusé par un sillon ou une faible dépression médiane (92 % des spécimens) et recourbé vers la languette à proximité immédiate de la commissure frontale.

Ornementation. Valves entièrement costulées. Les côtes débutent aux crochets où elles sont simples et étroites. Elles s'élargissent ensuite rapidement, certaines se divisant dans la partie postérieure des valves sans former de faisceaux. Les côtes deviennent faiblement convexes, nettement plus larges que les sillons intercostaux, sauf près des commissures où elles peuvent être aplaties sur quelques millimètres et creusées d'un faible sillon. Les côtes médianes (10 à 14) se distinguent très difficilement des côtes pariétales (3-4) voire même des côtes latérales (19-21).

Caractères internes. Champ musculaire ventral sub-ovale occupant environ la moitié de la largeur de la valve (Fig. 3U-W) et s'étendant sur toute la longueur jusqu'au rebroussement de la languette ; empreintes des diducteurs ventraux très développées et séparées par la trace d'un euseptoidum bien marqué ; muscles adducteurs clairement différenciés par rapport aux diducteurs. Champ musculaire dorsal sub-ovale, nettement limité mais sans relief, un peu moins étendu que le ventral et où se distinguent essentiellement les adducteurs. Les sections sériées illustrées par Brice (1981, fig. 4A-B) ne permettent pas d'identifier la présence de plaques deltidiales. Quant aux lames dentales, presque entièrement noyées dans l'épaississement umbonal, seules les minuscules cavités latérales de quelques sections indiquent leur présence ; les dents sont courtes et moyennement épaisses. La cavité delthyriale est spacieuse dans la région postérieure. Vers l'avant, elle se réduit et on observe la trace de l'euseptoidum ainsi qu'une entaille sur chaque paroi latérale causée par l'important champ musculaire. Les sections des valves dorsales permettent d'observer l'épais processus cardinal portant de nombreuses lamelles difficiles à dénombrer. Les cavités glénoïdes sont moyennement spacieuses. Quant au plateau cardinal et au septum, ils sont mal individualisés et noyés dans un épaississement important dans lequel on distingue dans quelques sections la trace de bases crurales et de petites cavités de part et d'autre de la trace du septum.

Dimensions. La longueur varie de 8 à 17,5 mm (n = 119) dont 87% ont de 10 à 15 mm de longueur ; la largeur de 10 à 17,7 mm (n = 135) dont 80% ont de 11 à 16,3 mm de largeur ; l'épaisseur de 6,2 à 14,2 mm (n = 102) dont 86% ont de 8,3 à 13,2 mm d'épaisseur. Les autres dimensions et rapports significatifs figurent dans le tableau de comparaisons des trois espèces formellement dénommées de *Palinulus* (Tabl. 1).

Discussion (Tabl. 1). Au sein de la famille des Nucinulidae, *Palinulus armoricanus* nov. sp. à l'instar des deux autres espèces du genre *Palinulus* formellement dénommées (*P. zairensis* Sartenaer, 2005, *P. saharaensis* Brice *et al.*, 2011) se sépare aisément des espèces attribuées à *Cuninulus* Sartenaer, 2005 et *Nucinulus* Sartenaer, 2005. Ces dernières se distinguent par le net développement d'une crête sinale médiane qui se prolonge

jusqu'à la commissure antérieure. Chez *Cuninulus*, cette crête contribue à former sur la languette un M très caractéristique, tandis que certaines espèces de *Nucinulus* se différencient encore par la présence de faisceaux de côtes alors qu'ils sont toujours absents chez *Palinulus* et *Cuninulus*.

Palinulus armoricanus nov. sp. se rapproche de *P. zairensis* par son contour échancré au bord antérieur, son rapport épaisseur/largeur, le pourcentage de spécimens présentant une crête médiane dans le sinus ventral et un sillon médian correspondant sur la valve dorsale et son grand champ musculaire ventral. Elle s'en différencie par son contour plus échancré au bord antérieur, son épaisseur maximale située au front, ses côtes un peu moins nombreuses et son angle apical légèrement moins ouvert. *Palinulus saharensis* ressemble à *P. armoricanus* nov. sp. par son bord antérieur échancré et son épaisseur maximale localisée près du front mais elle en diffère par ses côtes un peu plus nombreuses, son angle apical un peu plus ouvert. Toutefois d'après les caractères résumés dans le Tableau 1, les affinités entre les trois espèces actuellement définies sont évidentes. Quant à l'espèce assignée à *Uncinulus pila*, décrite succinctement par Schumann (1965) en provenance de l'Emsien inférieur de la Chaîne Cantabrique (Province du León), et attribuée au genre *Palinulus* par Sartenaer (2005, p. 45), elle ressemble à *Palinulus armoricanus* nov. sp. par sa forme dorsibiconvexe, son sommet situé près du front mais en diffère par son contour antérieur non échancré, son épaisseur

plus grande et son angle apical plus ouvert. De plus, Schumann (1965) n'indique pas la présence d'un sillon médian sur le bourrelet ni l'existence éventuelle d'une crête médiane dans le sinus.

Distribution géographique et stratigraphique.

Géographiquement, *Palinulus armoricanus* nov. sp. n'est actuellement connue qu'au sein du Massif Armoricain, au S-SW de Gahard (Ille-et-Vilaine) où elle fut collectée au sein de la tranchée temporaire de La Lézais (Synclorium du Ménez Bélaïr). Toutefois, d'après la description sommaire et sans figuration de « *Uncinulus pila* Schnur » que donne Renaud (1955, p. 30), l'espèce pourrait être présente dans plusieurs gisements en Mayenne entre Argentré et Saint Céneré (La Chapelle Sainte-Anne, La Chataigneraie, la Touche Salée). Du point de vue stratigraphique, elle est présente dans le membre inférieur de la Formation des Marettes (bancs G 57-G 145, Fig. 2) et particulièrement abondante dans les bancs G 142-143. Parmi les conodontes, Weyant (1981, p. 83) a identifié *Icriodus corniger ancestralis* Weddige, 1977 dans les bancs G 97, G 126, G 146, G 151. D'après Weddige (1977, p. 332 et 389), ce conodonte se rencontre dans le Massif schisteux rhénan dans les bancs inférieurs des Ballersbacher Kalk corrélés pour l'essentiel avec la Zone à *serotinus*. *Icriodus corniger ancestralis* est aussi connu dans la Formation de Beg an Arreun de la coupe de Reun ar C'Hrank dans la Rade de Brest, d'âge emsien supérieur (Bultynck & Morzadec, 1979). Parmi les

<i>Palinulus</i> species	L/l	e/L	e/l	aa°	crête sinale	sillon dorsal	cm+ cp	cp	cl	ls/l
<i>P. zairensis</i> Sartenaer, 2005	0,90- 1,04 <u>0,96-</u> <u>1,04</u>	0,58- 0,91 <u>0,70-</u> <u>0,88</u>	0,59- 0,84 <u>0,67-</u> <u>0,84</u>	111- 121	15/138 11%	68/79 86%	18-35 <u>18-26</u>	3-7	19-25	0,54- 0,71
<i>P. saharensis</i> Brice <i>et al.</i> , 2011	0,83- 1,01	0,75- 0,94	0,7- 0,89	106- 118 <u>108-</u> <u>115</u>			24-32		23-27	0,42- 0,72 <u>0,45-</u> <u>0,53</u>
<i>P. armoricanus</i> nov. sp	0,9-1,02 <u>0,88-1</u> 97%	0,64- 0,97 <u>0,72-</u> <u>0,88</u> 88%	0,6- 0,9 <u>0,64-</u> <u>0,89</u> 83%	95- 125 <u>100-</u> <u>108</u>	11/76 14.5%	89/97 92%				0,5- 0,8 <u>0,57-</u> <u>0,76</u> 93%

Tableau 1. — Comparaison entre les trois espèces de *Palinulus* actuellement définies. Les rapports L/l, e/L, e/l et ls/l donnent la marge de variation de ces rapports pour ces espèces, suivie, pour certaines des valeurs les plus fréquentes (soulignées), et pour *armoricanus* du pourcentage de ces derniers pour l'ensemble des spécimens examinés. Aa°, cm+cp, cp, et cl indiquent la variabilité de ces caractères suivie pour aa° de *saharensis* et *armoricanus* et de cm+cp de *zairensis* de la marge de variabilité la plus fréquente. En ce qui concerne les caractères « crête sinale » et « sillon dorsal », le pourcentage est précédé du nombre de spécimens porteurs du caractère par rapport au nombre de spécimens examinés.

Table 1. — Comparison of the three currently known *Palinulus* species. The L/l (length/width), e/L (thickness/length), e/l (thickness/width) and ls/l (sulcus width/width) ratios give the range of variation of these ratios for the different species, followed by the most frequent (underlined), and for *armoricanus* by the percentage for all the examined specimens. Aa (apical angle in degrees), cm+cp (median + parietal costae), cp (parietal costae) et cl (lateral costae) indicate the variability range of these features, followed for the aa of *saharensis* and *armoricanus* and for cm+cp of *zairensis* by the most frequent variability range. For the sulcal crest and the dorsal groove, the percentage is preceded by the number of specimens showing this feature compared to the number of examined specimens

brachiopodes, Heddebaut (1981, p. 231) a reconnu la présence continue d'*Arduspirifer arduennensis arduennensis* (Schnur, 1853) du banc G 39 au banc G 167, or la limite d'extension de cette espèce dans le domaine ardenno-rhénan correspond à la base de l'Emsien supérieur (Solle, 1953). L'auteur ajoute que l'ensemble des Spiriferida de La Lézais est à situer dans la moitié inférieure de l'Emsien supérieur. Signalons que *P. armoricanus* nov. sp. est associée à un autre représentant de la famille des Nucunulidae, à savoir *Cuninulus suborbignyianus* (Brice, 1981) ; Sartenaer (2005, p. 26) signale le genre *Cuninulus* en Eifel, dans la Cordillère Cantabrique, au Maroc, en Algérie, dans les Monts de Sainte-Croix (Pologne) et les montagnes de l'Altaï (Russie) où il se rencontre dans l'intervalle Emsien supérieur-Eifélien inférieur.

V. — CONCLUSIONS - CORRELATIONS AVEC LES FORMATIONS DU MASSIF ARMORICAIN ET D'AUTRES REGIONS D'EUROPE OCCIDENTALE ET D'AFRIQUE

Palinulus armoricanus nov. sp. est une espèce particulièrement abondante dans le Synclinorium de Ménez Bélair (Synclinorium médian du Massif armoricain). Ses rapports et différences avec les espèces *Palinulus zairensis* Sartenaer, 2005 de l'Anti-Atlas marocain et *P. saharensis* Brice *et al.*, 2011 du Maroc oriental (Tafilalt) ont été précisés. Des corrélations, basées sur les faunes variées collectées dans l'excavation temporaire de La Lézais, sont signalées par Morzadec *et al.*, (1981, fig. 4) entre la Formation des Marettes et d'autres de l'Emsien de la Rade de Brest, du Maroc,

d'Europe (Allemagne, Belgique, Péninsule Ibérique). Il est bien entendu hors de propos de discuter ici les différents modèles paléogéographiques pour le Dévonien inférieur de la zone qui nous occupe, mais force est de constater que de nombreux auteurs ont déjà fait remarquer les grandes affinités qui existent entre les faunes d'invertébrés benthiques et de vertébrés (voir références in Robardet, 2003) connues en Europe dite varisque (par ex. Massif Armoricain, Péninsule Ibérique) et en Afrique du Nord. Cela suggérerait fortement que les régions du Sud de l'Europe (Armorica) seraient restées en connexion proche avec le Gondwana dont elles auraient formé le bord septentrional (par ex. McKerrow *et al.*, 2000). Bien que cette vision ne soit pas partagée notamment par Torsvik & Cocks (2013), il nous semble opportun d'insister sur les rapports étroits qui lient les trois espèces de *Palinulus* reconnues jusqu'à présent (Sartenaer, 2005 ; Brice *et al.*, 2011 ; ce travail) ainsi que la forme des Monts Cantabriques décrite sous le nom d'*Uncinulus pila* par Schumann (1965) et rapportée au genre *Palinulus* par Sartenaer (2005). Ces données confortent les liens très étroits entre le Massif Armoricain, la Péninsule Ibérique et l'Afrique du Nord (Maroc), domaine Ibarmaghien = domaine Ibérique-Armoricain-Maghrébin *sensu* Plusquellec (1997).

Remerciements. — Les auteurs remercient Jenaro L. GARCÍA-ALCADE (Universidad de Oviedo) et Rémy GOURVENNEC (Université de Bretagne Occidentale) pour leurs suggestions et remarques constructives ; Pierre MORZADEC et Florentin PARIS (Université de Rennes) pour le prêt du matériel. Cette publication est une contribution à l'International Geoscience Programme (IGCP) Project 596 – Climate change and biodiversity patterns in the Mid Palaeozoic.

BIBLIOGRAPHIE

- BABIN C. (1981). — Les Mollusques. In : MORZADEC P., PARIS F. & RACHEBŒUF P. (coord.), La tranchée de La Lézais, Emsien supérieur du Massif Armoricain : sédimentologie, paléontologie, stratigraphie. *Mémoires de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, **24** : 255-260.
- BOUCOT A.J. (2007). — Ecostratigraphy's basis, using Silurian and Devonian examples, with consideration of the biogeographic complication. In : KOUTSOUKOS E.A.M. (ed.), *Applied stratigraphy*. Springer, Dordrecht : 55-71.
- BOUCOT A.J. & BLODGETT R.B. (2001). — Silurian-Devonian biogeography. In : BRUNTON, C.H.C., COCKS L.R.M. & LONG S.L. (eds.), *Brachiopods: past and present*. Taylor & Francis, London : 335- 344.
- BOUCOT A.J., JOHNSON J.G. & TALENT J.A. (1969). — Early Devonian brachiopod zoogeography. *Geological Society of America, Special Paper*, **119** : 1-113.
- BRICE D. (1980). — Brachiopodes Rhynchonellida et Terebratulida. In PLUSQUELLEC Y. (coord.) Les Schistes et calcaires de l'Armorique (Dévonien inférieur, Massif Armoricain). Sédimentologie - Paléontologie - Stratigraphie. *Mémoire de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, **23** : 233-242.
- BRICE D. (1981). — Les brachiopodes Pentamerida, Rhynchonellida et Terebratulida. In : MORZADEC P., PARIS F. & RACHEBŒUF P. (coord.), La tranchée de La Lézais, Emsien supérieur du Massif Armoricain : sédimentologie, paléontologie, stratigraphie. *Mémoires de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, **24** : 193-217.
- BRICE D. (1991). — Précisions nouvelles sur des Brachiopodes Pentamerioidea et Rhynchonelloidea du Dévonien inférieur du Synclinorium de Laval (Massif Armoricain, France). *Annales de Paléontologie*, **77** : 21-50.
- BRICE D., BOUMENDJEL K., RACHEBŒUF P. & MOTTEQUIN B. (2011). — Lower Devonian rhynchonellid brachiopods from the Ougarta area (western Sahara, Algeria). *Bulletin of Geosciences*, **86** : 71-90.
- BULTYNCK P. & MORZADEC P. (1979). — Conodontes de la coupe de Reun ar C'hrank en Lanvéoc (Rade de Brest) Emsien du Massif (France). Corrélations biostratigraphiques. *Geobios*, **12** (5) : 675-685.
- CURRY G.B. & BRUNTON C.H.C. (2007). — Stratigraphic distribution of brachiopods. In : KAESLER R.L. (ed.), *Treatise on Invertebrate Paleontology*, Part H, Brachiopoda, 6 (revised). Geological Society of America & University of Kansas, Boulder and Lawrence : 2901-3081.
- DROT J. (1964). — Rhynchonelloidea et Spiriferoidea siluro-dévonien du Maroc présaharien. *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, **178** : 1-286.
- GOURVENNEC R. (1989). — Brachiopodes Spiriferida du Dévonien inférieur du Massif Armoricain. Systématique, paléobiologie, évolution, biostratigraphie. *Biostratigraphie du Paléozoïque*, **9** : 1-281.
- HEDDEBAUT C. (1981). — Les brachiopodes Spiriferacea et Reticulariacea. In : MORZADEC P., PARIS F. & RACHEBŒUF P. (coord.), La tranchée de La Lézais, Emsien supérieur du Massif Armoricain : sédimentologie, paléontologie, stratigraphie. *Mémoires de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, **24** : 231-257.
- LARDEUX H. (1981). — Les Tentaculites. In : MORZADEC P., PARIS F. & RACHEBŒUF P. (coord.), La tranchée de La Lézais, Emsien supérieur du Massif Armoricain : sédimentologie, paléontologie, stratigraphie. *Mémoires de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, **24** : 293-304.

- LECOMTE S., GOURVENNEC R. & LOI A. (1998). — Communautés benthiques à brachiopodes et variations eustatiques : exemple de la formation du Faou (Dévonien, Massif armoricain, France). *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Sciences de la terre et des planètes*, **327** : 189-195.
- LE MAÎTRE D. (1944). — Contribution à l'étude du Dévonien du Tafilalet. 1- La faune coblencienne de Haci-Remlia (SW de Taouz). *Notes et Mémoires du Service géologique du Maroc*, **61** : 1-102.
- McKERROW W.S., MAC NIOCAILL C., AHLBERG P.E., CLAYTON G., CLEAL C.J. & EAGAR R.M.C. (2000). — The Late Palaeozoic relations between Gondwana and Laurussia. In : FRANKE W., HAAK, V., ONCKEN O. & TANNER D. (eds), *Orogenic Processes. Quantification and Modelling in the Variscan Belt* (eds.). *Geological Society of London, Special Publication*, **179** : 9-20.
- MORZADEC P., PARIS F., PLUSQUELLEC Y., RACHEBŒUF P. & WEYANT M. (1988). — Devonian Stratigraphy and Paleogeography of the Armorican Massif (Western France). In : McMILLAN M.J., EMBRY A.F., GLASS D.J. (eds), *Devonian of the World* (Proceeding of the IInd International Symposium on the Devonian System, Calgary, Canada, 1987). *Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir* **14** (1) : 401-420.
- MORZADEC P., PARIS F. & RACHEBŒUF P. (1973). — Une tranchée dans le Dévonien du Menez-Belair (synclinalorium médian armoricain). *Bulletin de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, série C, **4** (2) : 27-42.
- MORZADEC P., PARIS F. & RACHEBŒUF P. coord. (1981). — La tranchée de La Lézais, Emsien supérieur du Massif Armoricain : sédimentologie, paléontologie, stratigraphie. *Mémoires de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, **24** : 1-313.
- PLUSQUELLEC Y. (1997). — Révision de *Michelinia transitoria* Knod, 1908 (Tabulata, Dévonien de Bolivie). *Annales de la Société géologique du Nord*, **105** : 249-252.
- RACHEBŒUF P.R. (1981). — Chonétacés (Brachiopodes) siluriens et dévoniens du Sud-Ouest de l'Europe. *Mémoire de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, **27** : 1-294.
- RENAUD A. (1955). — Etude de quelques affleurements emsiens au Nord d'Argentré (Mayenne). *Bulletin de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, nouvelle série, **1** : 20-35.
- ROBARDETM. (2003). — The Armorica 'microplate': fact or fiction? Critical review of the concept and contradictory palaeobiogeographical data. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **195** : 125-148.
- SARTENAER P. (2004). — Restatement of *Terebratula Orbignyana* de Verneuil, 1850 on the basis of the original collection. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **74**-supplément : 81-88.
- SARTENAER P. (2005). — New middle and late Emsian, and early Eifelian rhynchonellide (brachiopod) genera of the family Nucinulidae Sartenaer, 2004. *Bulletin de l'Institut royal des Sciences Naturelles de Belgique, Sciences de la Terre*, **75** : 25-52.
- SCHNUR J. (1851). — *Die Brachiopoden aus dem Uebergangsgebirge der Eifel. Programm der vereinigten höhern Bürger- und Provinzial-Gewerbeschule zu Trier für das Schuljahr 1851*. Linz, Trier: 16 p.
- SCHUMANN D. (1965). — Rhynchonelloidea aus dem Devon des Kantabrischen Gebirges (Nordspanien). *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie, Abhandlungen*, **123** : 41-104.
- SOLLE G. (1953). — Die Spiriferen der Gruppe *arduennensis-intermedius* im rheinischen Devon. *Abhandlungen des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung*, **5** : 1-156.
- TORSVIK T.H. & COCKS L.R.M. (2013). — Gondwana from top to base in space and time. *Gondwana Research*, **24** : 999-1030.
- WEDDIGE K. (1977). — Die Conodonten der Eifel-Stufe in Typusgebiet und in benachbarten Faziesgebieten. *Senckenbergiana Lethaea*, **58** (4-5) : 271-419.
- WEYANT M. (1981). — Les Conodontes. In : MORZADEC P., PARIS F. & RACHEBŒUF P. (coord.), *La tranchée de La Lézais, Emsien supérieur du Massif Armoricain : sédimentologie, paléontologie, stratigraphie. Mémoires de la Société géologique et minéralogique de Bretagne*, **24** : 83-87.

ANNEXE

Inventaire du matériel de *Palinulus armoricanus* nov. sp.

G 57 - 1 m int, G 64 - 1 sp, G 65 - 2 sp, 4 vv + 2 inc, 2 vd inc, G 70 - 1 sp inc, 1 vv, G 73 - 1 sp, G 78 - 1 sp déf, G 83 - 3 sp, + 2 inc, G 84 - 8 sp, 1 vv, G 85 - 1 sp, 2 sp inc, 1 vv déf, G 86 - 5 sp, G 87 - 5 sp, 1 vv, G 88 - 12 sp, 4 vv, G 89 - 14 sp déf, 3 vv, G 90 - 6 sp, 5 vv inc, G 94 - 1 vv inc, 1 m int, G 96 1 sp, G 97 - 2 sp inc, 1 vv, 1 vd inc, G 98 - 1 sp inc, 1 vv, G 109 - 1 vd inc, G 110 - 2 sp (1 inc), 1 vv, G 111 - 2 m int (dont 1 inc), G 112 - 1 sp déf, 2 vv, G 114 - 7 sp dont 2 inc et 4 déf, G 115 - 2 sp, 2 vv, 3 vd, G 116 - 1vv, G 118 - 2 m int dont 1 déf, G 128 - 1 sp, G 129 - 1 sp déf, G 130 - 6 sp (dont 2 inc), 2 vv, 1 m int inc, G 131 - 17 sp (dont 4 inc), 1 m int, G 132 - 3 sp, 1 m int inc, G 134 - 5 sp (dont 1 inc), 2 m int déf, G 135 - 3 sp (dont 2 inc), 2 m int (dont 1 inc) G 136 - 1 m int déf, G 137 - 5 sp, (dont 1 déf), 1 m int, G 138 - 8 sp (4 inc), G139 - 11 sp dont 5 déf, 1 vv, G 140 - 3 sp, 4 vv dont 2 inc, G 141 - 1 sp déf, G 142 - 38 sp (dont 19 déf), 6 vv, 1 vd, 2 m int figurés (Brice, 1981, pl. 25, fig. 12-13), dont 1 sp à sections sériées figurées (Brice, 1981, fig. 4A), G 143 - 66 sp, (dont 18 déf), 8 vv, 4 m int, (dont 2 inc.) et 1 sp pour sections sériées figurées (Brice, 1981, fig. 4B) (Fig. 5), G 144 - 1 sp., 1 vd déf, G 145 - 2 sp (dont 1 déf).

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 les 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, UFR Sciences de la Terre (SN5)
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

PALEOALTERATIONS ET PALEOMORPHOLOGIES, DES OBSERVATIONS EPHEMERES ; EXEMPLES AUTOUR DE FOURMIES (NORD)

Palaeo-weathering and palaeo-morphologies, transient observations ; examples from Fourmies (Nord) area

par Francis MEILLIEZ (*)

Résumé. – Les formations superficielles supportent presque toutes nos activités et nous nourrissent. Mais leur observation est éphémère. Deux exemples sont ici rapportés de part et d'autre d'une ligne de partage des eaux majeure de l'Ardenne occidentale : une évolution locale récente (Pléistocène – Holocène ?) ; une morphologie de vallon à peine retouchée depuis 100 Ma environ.

Abstract. – *Weathered products support man-activities and man-feeding. Two examples are here reported on either side of a major water divide across western Ardenne : a local evolution (Pleistocene – Holocene ?) ; a well-preserved morphology in a small valley as old as roughly 100 My.*

Mots clés. – Formations superficielles, altération, paléomorphologie, Ardenne occidentale, environnement périglaciaire.
Keywords. – *Weathered cover, weathering, palaeomorphology, western Ardenne, periglacial environment.*

I. — INTRODUCTION

L'utilisation des matériaux est à la base de l'apprentissage de l'observation du sous-sol. C'est ainsi que le constat de l'hétérogénéité de composition et de structure du sous-sol a conduit à l'élaboration des fondements de la géologie sédimentaire. Curieusement, la pellicule la plus superficielle de la planète a été la plus difficile à décrypter puisque sa composition et sa structure résultent d'interactions physiques, chimiques et biologiques aux interfaces entre atmosphère, lithosphère et biosphère. Il en résulte un manteau de formations superficielles très complexe, qui nous nourrit et supporte l'essentiel de nos activités (Dewolf & Bourrié, 2008). Dans nos régions à climat tempéré, à relief faible à modéré, à dynamique crustale faible, ce manteau plus ou moins épais de dépôts estompe les reliefs. Sauf exception (encroûtements), ces dépôts sont granulaires et sont aisément remobilisables à tout moment. A l'échelle humaine, hormis les victimes directes de coulées de boue et autres inondations, peu de gens sont conscients de leur importance dans l'évolution des paysages sur lesquels nous vivons. Et rares sont les gens sensibles aux quelques voix rappelant qu'un sol demande des dizaines de milliers d'années pour se constituer, mais peut être détruit en quelques heures par l'érosion naturelle, éventuellement amplifiée par le genre humain. Ces voix sont d'autant plus nombreuses que la pression démographique croissante et le développement de l'urbanisme contribuent à épuiser les ressources minérales de ce manteau,

par l'agriculture qui en modifie la composition et la texture, par l'imperméabilisation et/ou les terrassements qui le couvrent ou l'évacuent. C'est pourtant le substrat qui assure notre survie en tant qu'espèce.

Sous nos latitudes, ce manteau meuble de formations superficielles ne s'observe que grâce à des opportunités : talus de déblais pratiqués pour une voie de communication ou pour une fondation, forages de puits ou de sondage. Le caractère granulaire de ce manteau, plus ou moins cohérent selon son humidité et/ou sa composition et sa texture, le rend très vulnérable dès qu'il est soumis au ruissellement que provoquent les précipitations. En quelques jours à quelques mois, un talus exposant ces formations peut devenir illisible par érosion. Le plus souvent, ces talus sont rapidement masqués par un revêtement dont la sévérité dépend de l'enjeu à protéger le talus autant que l'espace sur lequel il risque de se répandre : végétalisation en cas de faible mobilisation, murs de soutènement là où la stabilité même du talus est menacée. Dans les deux cas, l'observation est assez rapidement masquée et devient inaccessible tant que la protection n'est pas elle-même détruite par un chantier ultérieur. L'information géologique est alors perdue, au moins pour un temps. Il est donc important de décrire de tels affleurements éphémères afin de témoigner des faits observés, de les localiser précisément et donc d'en mettre une description à disposition de la communauté des chercheurs qui trouveraient là des arguments à leur thèse.

(*) Université de Lille - Sciences et technologies, UMR 8187 LOG du CNRS, UFR Sciences de la Terre, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex ; francis.meilliez@univ-lille1.fr

II. — EXEMPLES A FOURMIES ET ANOR (NORD)

1) Le contexte

Le sud de l'Ardenne occidentale, en France, est constitué par un substratum d'âge paléozoïque, couvert de placages résiduels d'âges mésozoïque (Crétacé supérieur / Albien) et cénozoïque (Paléogène) et d'un tapis limoneux périglaciaire (Gronnier, 1890 ; Hatrival *et al.*, 1969 ; Sommé, 1977). Les rivières ont entaillé le substratum constitué par les formations du Dévonien inférieur, discordantes sur les terrains du Paléozoïque inférieur (Massif de Rocroi). La ligne de partage des eaux qui sépare les bassins versants de la Sambre et de l'Oise passe entre Fourmies et Anor (Fig. 1). Fourmies est située peu en aval de la source de l'Helpe mineure, qui s'écoule ensuite vers l'ouest-nord-ouest ; Anor est située sur le Ruisseau des Anorelles qui rejoint l'Oise en rive droite à un peu plus d'un kilomètre du centre du village. L'Oise vient de Belgique en coulant vers l'ouest-sud-ouest et tourne brusquement vers le sud-sud-ouest après la confluence avec le Ruisseau des Anorelles, et avant d'entrer dans le Massif de Rocroi. Autrement dit, à cette échelle, l'organisation du réseau hydrographique actuelle ne montre pas de lien évident avec la structure géologique sous-jacente.

En 1984, la construction d'une maison près du carrefour central d'Anor a justifié des travaux d'aménagement d'un portail d'accès entaillant les formations superficielles qui couvrent ici l'unité du Grès d'Anor (Dévonien inférieur, Praguien). Avant révision (Godefroid *et al.*, 1994) cette unité était reconnue en tant que Formation des Grès d'Anor, la coupe de référence étant prise dans les anciennes carrières du Bois du Hauty, situées au sud-ouest du village (Fig. 1). Le chantier a dégagé en partie un paléo-talus vertical déterminé par des couches de Grès d'Anor en position redressée. A son pied se sont accumulés des éboulis peu organisés, dont une description, succincte à l'époque, est rapportée sur la fiche jointe [Fiche 1]. Cet affleurement a été rapidement masqué par un mur de soutènement. En 1985, le CD 942 qui reliait Sains-du-Nord à Fourmies a été linéarisé, ravivant quelques déblais en tête d'interfluves. Ce chantier terminé, à l'entrée nord-ouest de Fourmies a été construit un centre commercial de taille moyenne, impulsant un développement urbain croissant du quartier de La Marlière. Les aménagements de voirie nécessaires ont justifié d'élargir un chemin vicinal desservant directement ce quartier, ainsi que des tranchées à

proximité du carrefour pour les divers services de fluides. Le résultat est que, sur un peu plus de 1 km, plusieurs affleurements ont été soit ravivés, soit nouvellement dégagés. Ils sont décrits sur la fiche jointe [Fiche 2] et replacés les uns par rapport aux autres.

2) Proposition d'interprétation brute

Ces deux sites apportent chacun des informations sur deux périodes différentes de la vie géologique locale : Pléistocène à Actuel (Anor), Crétacé à Actuel (Fourmies).

Le site d'Anor (Fig. 2 à 5) témoigne d'une période assez récente, accompagnant l'évolution du lit majeur du cours d'eau qui est aujourd'hui devenu le Ruisseau des Anorelles. Le paléotalus, sub-vertical, ne peut être que le résultat d'une érosion active : les grès en place sont frais et leur position a été rapidement protégée par l'accumulation d'éboulis. Les bancs de grès sont tellement minces qu'ils ne pouvaient rester longtemps stables à l'air libre, supportant des variations de température, de teneur en eau, voire de gel/dégel. Ceci dit, le pied de ce talus n'est pas observé. On peut aussi penser que l'éboulis ne s'est pas fait en un seul événement mais devait être épisodiquement alimenté par quelques éboulements de faible volume et faible déplacement. Visiblement, cet éboulis n'était pas traversé par le cours d'eau, sinon la matrice argileuse en aurait été évacuée. L'arène rubéfiée (Fig. 4 : couche 2) pourrait résulter du glissement en masse d'un manteau d'altérites plus ancien, déstabilisé, plutôt venu du nord-ouest puisqu'il n'est pas observé sur le talus de droite. A la base du talus taillé en 1984, cette arène paraissait surmonter un conglomérat en tout point semblable à celui qui constitue l'éboulis de pied du paléo-talus. Mais ce point d'observation n'était pas très bien dégagé. Avant son déplacement présumé, cette arène rubéfiée pourrait avoir résulté d'une fersiallisation (*in* Dewolf & Bourrié, 2008, p. 120). Sous un climat plus chaud que l'actuel, de type méditerranéen, sous des conditions climatiques à fort contraste, les schistes et grès du Dévonien inférieur ardennais pouvaient avoir été aisément lessivés, libérant du fer, fixé sous forme d'oxydes piégés dans les argiles d'altération. C'était également l'interprétation retenue par H. Chamley et L. Voisin (communications personnelles) lors de visites sur des observations comparables en d'autres sites entre les vallées de la Sambre et de la Meuse. Cette coulée supposée aurait été ensuite recouverte par les produits d'un autre éboulement (Fig. 4 : couche 4), lui-même recouvert d'une autre coulée arénique. L'absence de rubéfaction dans cette dernière, alors que les caractères texturaux sont les mêmes que pour la couche (2), laisse à penser que leur matériau résulte d'une maturation pédogénique sous un climat peut-être proche de notre climat actuel. L'intervalle de temps peut donc avoir été très long entre les mises en place des unités (2) et (4). L'avant-dernier événement particulier est révélé par l'organisation en bulbes ouverts vers le haut du contact (Fig. 4 : couche 7) entre les couches (6) et (8). Cette structure très particulière est due au drainage difficile d'un niveau sursaturé, piégé sous une couche peu perméable, phénomène bien connu en géotechnique dans les régions où un gel profond affecte le sous-sol proche. Les « barrières de dégel » mises en place sur le réseau routier non autoroutier sont destinées à permettre l'évacuation de l'eau issue des lentilles de glace à quelques décimètres de profondeur. De façon plus générale, la fossilisation d'une telle structure laisse supposer un environnement périglaciaire, avec un vrai pergélisol (Van Vliet-Lanoë, 2005, ch. 6). Le sol brun (Fig. 4 : couche 8), généralement réputé d'âge holocène (*in* Sommé, 1977 ; H. Chamley & L. Voisin, comm. pers.), est sécant sur la séquence sous-jacente suggérant qu'un mouvement différentiel modéré a affecté la région avant le développement du sol actuel.

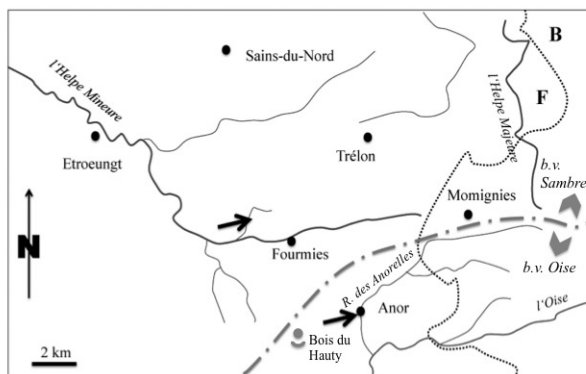


Fig.1. — Localisation des sites décrits à Fourmies et Anor (flèches noires). Mise en évidence d'une ligne de partage des eaux (ligne en tirets-points) majeure entre bassins versants de l'Oise (au sud) et de la Sambre (au nord).

Fig. 1. — Sites location in Fourmies and Anor (black arrows). The water divide between Oise (in the south) and Sambre (north) major drainage basins is outlined (dashed-dotted line).

Le site de Fourmies (Fig. 6 à 9) témoigne de deux épisodes entre lesquels la morphologie locale n'a pas dû beaucoup varier depuis environ 100 Ma. En 1985 on voyait très nettement les Sables Verts albiens reposer à l'horizontale sur la fine alternance de schistes carbonatés et calcaires silto-argileux de la Formation de Hierges (Emsien), inclinée vers le nord (point 3, fig. 6 et 8), et sur des bancs du Calcaire de Givet (point 1, fig. 6 et 8). Les quelques endroits où ce contact a été ravivé pour préciser l'observation montraient un contact franc, sans altération visible à l'affleurement de la tête du substratum. En revanche, ce même substratum montrait une altération fragilisante sur une épaisseur d'ordre décimétrique dès l'endroit où les couches de la Formation de Hierges se trouvent directement exposées à l'air libre, entre les points 2 et 3. On peut donc penser que cette altération est postérieure au dépôt et à l'exposition aérienne des Sables Verts. La stabilité de ce versant est sans doute due à la conformité de son pendage avec celui de la stratification dans le Dévonien. Quoiqu'il en soit, le petit vallon sec dans lequel a été placée la route qui dessert le quartier de La Marlière, est empâté de dépôts antérieurs aux Sables Verts, enchâssés dans le substratum dévonien. La carte géologique (Fig. 6) indique encore la trace d'une ancienne carrière dont la nature des produits n'est plus déterminable : sables ? marnes ? Une aire de stationnement et un bâtiment industriel y sont implantés ; plus haut, le centre commercial est fondé sur le Dévonien au travers des Sables Verts albiens, prolongé par une plate-forme sur remblais dont le niveau est légèrement sous le contact Sables Verts / Dévonien. Ce remblais a dû combler au moins une partie de l'ancienne carrière. A priori, le nom de La Marlière, qui désigne un site localisé au-dessus et un peu plus vers le nord-est, se réfère plutôt aux marnes du Turonien inférieur dont la carte géologique indique la présence dans les environs (Hatrival *et al.*, 1969). La mise en place de la voie ferrée entre Fourmies et Anor a également mis à jour des Sables Verts (Gosselet, 1869). A Fourmies, la découverte de quelques fossiles a permis à Barrois d'identifier l'Aptien (Barrois, 1875). Puis à Blangy, reprenant l'analyse d'une succession très fossilifère dégagée dans la tranchée de chemin de fer reliant Hirson à Anor, Barrois (1878, p. 248) a décrit des argiles noires directement transgressives sur le substratum paléozoïque et contenant notamment des lamellibranches et des huîtres d'âge aptien. Dans son analyse exhaustive de la géologie du canton de Trélon, Gronnier (1890) a identifié une transgression progressive de l'Aptien au Cénomaniens, vers le nord-nord-ouest, ennoyant un « golfe de Fourmies » différencié entre des caps rocheux que devaient constituer alors les secteurs d'Hirson et de Sains-du-Nord, le

fond du golfe dépassant les positions actuelles de Trélon et Ohain. Il faut donc associer ces observations anciennes et assez denses pour interpréter la présence de morceaux de coquilles de lamellibranches dans les argiles silteuses noires et d'ammonites roulées dans le trou qui abrite maintenant un puisard [Fiche 2]. Tout ceci est cohérent avec la proposition suivante : le vallon de La Fontaine Rouge pré-existait à la transgression marine albienne et a dû se trouver un moment en situation d'estuaire. La transgression turonienne a été en retrait (Gronnier, 1890) par rapport à cette unité paléomorphologique, témoignant de l'apparent basculement qu'a vécu le Bassin de Paris au début du Crétacé supérieur. L'analyse d'une corrélation plus fine entre les argiles noires sous les Sables Verts albiens et la Formation de Verlincthun décrite dans le Boulonnais comme témoin d'un maximum de transgression (Amédéo & Mania, 1976 ; Amédéo & Matrimon, 2004) mériterait d'être engagée.

III. — CONCLUSION

Cette publication n'apporte rien de nouveau que l'enregistrement descriptif d'observations éphémères. Le site d'Anor témoigne d'une évolution locale, morphodynamique, pour laquelle aucun élément de datation spécifique n'a été identifié. Par comparaison avec d'autres travaux réalisés par ailleurs, on peut tenter de rapporter aux périodes glaciaires-interglaciaires les marques d'une érosion/sédimentation active sur une rive d'un petit cours d'eau, dans une zone limite de bassin versant majeur. Par opposition, le site de l'entrée nord de Fourmies, à l'échelle kilométrique, témoigne d'une stabilité relative remarquable : la morphologie actuelle est très voisine de ce qu'elle était il y a environ 100 Ma, ce qui ne signifie pas qu'elle est restée constante. Voisin (1983) a déjà souligné le caractère stable dans son ensemble de l'Ardenne occidentale depuis l'époque pré-cénomaniens. Pouvoir l'illustrer est une opportunité peu fréquente qui méritait d'être soulignée.

Remerciements. — Merci à D. Sigogneau et D. Russell, du Muséum National d'Histoire Naturelle (Paris), à J.-M. Dambrine et B. Hébert qui ont aidé à décrire tous les points sur un temps très limité par les travaux. J'exprime aussi ma gratitude à H. Chamley et, à titre posthume, à L. Voisin avec qui les discussions ont été longues, nombreuses et stimulantes pour le béotien que j'étais sur ces questions. Merci aux rapporteurs, F. Duchaussois et F. Amédéo qui, par une lecture rigoureuse, ont permis d'améliorer la présentation et l'interprétation proposées.

BIBLIOGRAPHIE

- AMEDRO F. & MANIA J. (1976). — L'Aptien du Boulonnais. *Ann. Soc. géol. Nord*, **XCVI** : 107-112.
- AMEDRO F. & MATRION B. (2004). — L'Aptien-Albien du Bassin de Paris : un nouveau regard à l'aube du XXI^e siècle. *Bull. Inf. Géol. Bass. Paris*, **41** : 3-23.
- BARROIS C. (1875). — Sur l'existence de la zone à *Amm. milletianus* dans le département du Nord, d'après quelques fossiles recueillis par M. Flamant. *Ann. Soc. géol. Nord*, **II** : 134.
- BARROIS C. (1878). — Mémoire sur le terrain crétacé des Ardennes et des régions voisines. *Ann. Soc. géol. Nord*, **V** : 227-485.
- DEWOLF Y. & BOURRIÉ G. (2008). — *Les formations superficielles – Genèse – Typologie – Classification – Paysages et environnements – Ressources et risques*. Ellipses édit., Paris : 830 p.
- GODEFROID J., BLIECK A., BULTYNCK P., DEJONGHE L., GERRIENNE P., HANCE L., MEILLIEZ F., STAINIER P. & STEEMANS P. (1994). — Les Formations du Dévonien Inférieur du massif de la Vesdre, de la Fenêtre de Theux et du Synclinorium de Dinant (Belgique, France). *Mém. Explic. cartes géol. min. Belgique*, **38** : 144 p.
- GOSSELET J. (1869). — Tranchée du chemin de fer de Fourmies à Anor. *Bull. Sc. hist. litt. du Départ. Nord et des pays voisins*, **I** : 189-191.
- GRONNIER J. (1890). — Description géologique du canton de Trélon. *Ann. Soc. géol. Nord*, **XVIII** : 1-92.
- HATRIVAL J.N., BONTE A., BEUGNIES A., DELATTRE C. & WATERLOT G. (1969). — Carte géologique 1 : 50 000, XXVIII-8, Hirson.
- SOMMÉ J. (1977). — *Les plaines du Nord de la France et leur bordure – Etude géomorphologique*. Thèse Doct. Sci., Université de Paris I (1975). Université de Lille 3 édit., 2 tomes : 810 p.

VAN VLIET-LANOË B. (2005). – *La planète des glaces*. Vuibert édit., Paris : 470 p.

VOISIN L. (1983). – Données et questions actuelles de géomorphologie en Ardenne occidentale. *Ann. Soc. géol. Nord*, **CH** : 135-143.

FICHE 1 : DESCRIPTION GÉOLOGIQUE AU CENTRE D'ANOR (59)

Observateur : Francis MEILLIEZ (1984, 2015)

Localisation

Entrée de propriété privée, rue du Maréchal Foch, à moins de 100 m du carrefour central de la localité (Fig. 2).

Géographique : IGN (1 : 25 000) 2808-O (Hirson-Fourmies) :

Lambert 1 : X = 1255,99 Y = 726,225 Z = 225

Lambert 93 : X = 778716 Y = 6988477

Latitude : 4,0967° Longitude : 49,9899°

Géologique : feuille (1 : 50 000) XXVIII-8 (Hirson)

Références de l'observateur : Carnet C, page 33 ; 6 diapositives : C033a à C033f / Carnet I, page 008 ; 3 photos : I008a à I008c.



Fig. 2. — Localisation de l'affleurement d'Anor sur la carte géologique (Hatrival *et al.*, 1969). Le site est marqué d'un point jaune (source : <http://www.infoterre.fr>).

Fig. 2 – Anor outcrop location onto the geological map (Hatrival et al., 1969). The site is pointed out with a yellow colour (source : <http://www.infoterre.fr>).

Etat de l'affleurement

1. Observations du 1^{er} mai 1984 (Fig. 3A) : Talus routier taillé verticalement pour aménager le portail d'entrée d'une propriété privée. Décaissement achevé avant recouvrement par de la maçonnerie.

2. Observations du 24 janvier 2015 (Fig. 3B) : Maçonnerie achevée ; aucun affleurement résiduel. Le talus du trottoir d'en face est végétalisé et ne montre aucun affleurement.

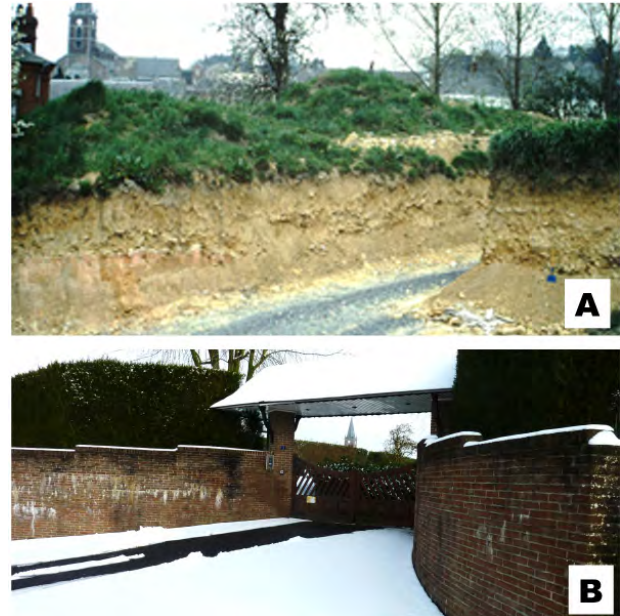


Fig. 3. — Site d'Anor : aspects des talus en 1984 (A) et en 2015 (B).

Fig. 3 – Anor locality : aspects of the excavation slopes in 1984 (A) and 2015 (B).

Description géologique

Le site est localisé en rive droite du Ruisseau des Anorelles dont le lit majeur entaille, sous un manteau de formations superficielles partiellement observé ici, la structure varisque sous-jacente perpendiculairement à sa direction. L'affleurement exhume une partie d'un paléotalus subvertical, déterminé dans le flanc redressé d'un pli formé par des couches du Grès d'Anor.

1 – Bancs de grès de puissance décimétrique, à grain moyen, friables, de couleur crème. Formation des Grès d'Anor en dressant (pendage à plus de 70° vers le Sud). Polarité indéterminée.

2 et 3 – Sable argileux rubéfié (2), à structure massive, coiffé d'un liseré blanc de kaolin (3).

4 – Conglomérat mal classé, hétérométrique, à éléments monogéniques dispersés dans une matrice argilo-sableuse ocre. Cailloux (< 0,10m) anguleux de quartz blanc et grès crème dispersés. Les cailloux les plus gros sont au pied du paléo-talus.

5 – Argile sableuse ocre chargée de gravier. Puissante d'environ 0,30m sur le talus gauche de l'affleurement, elle se termine en biseau dans le talus droit, marquant ainsi la seule distinction possible entre les couches (4) et (6).



Fig. 4 A, B, C. — Site d'Anor : détails de la superposition : les numéros renvoient aux explications dans le texte.

Fig. 4 A, B, C – Anor locality : details of the successive beds : numbers refer to text quotations.

6 – Conglomérat en tous points semblable à celui du niveau (4). Au pied du paléo-talus, les deux unités ne se distinguent que par l'intercalation du niveau (5).

7 – Festons caillouteux, témoins d'une évolution en situation périglaciaire, supportant une autre masse argilo-sableuse ocre semblable à (5).

8 – Sol brun mince coiffant le tout en discordance.

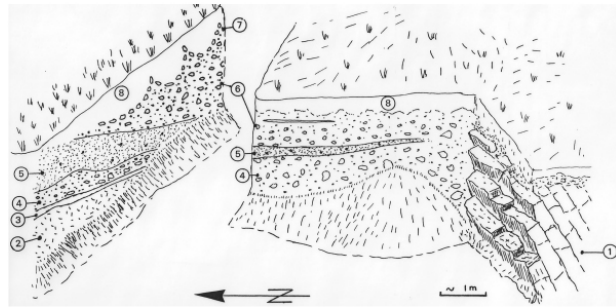


Fig. 5. — Site d'Anor : dessin interprétatif de l'affleurement (référence du carnet de l'auteur : C033). Les numéros renvoient aux explications lithostratigraphiques dans le texte.

Fig. 5. — Anor locality : interpretative sketch of the outcrop (author's notebook reference : C033). Numbers refer to text quotations.

Proposition de scénario interprétatif

Les numéros entre parenthèses renvoient aux illustrations :

- Le paléo-talus représenterait la rive externe, concave du cours d'eau, dans un stade d'enfoncement moins avancé que l'actuel. La présence de la matrice argileuse montre que le talus d'éboulis était hors d'eau. La pente raide du paléo-talus est déterminée par la stabilité naturelle des couches gréseuses (1).

- L'accumulation de piedmont a pu être alimentée épisodiquement par des processus gravitaires divers (cryoclastie, colluvionnement, ...). Les éléments sont plus grossiers et disposés de façon plus chaotique à proximité du paléo-talus qu'à quelques mètres de distance (côté gauche de l'affleurement) : granoclassement horizontal sommaire.

- La couche (2), homogène et massive, serait une arène ancienne, déplacée par reptation sur une pente, jusqu'à une mare temporaire, effet d'un dégel. On peut rendre compte du fin liseré de kaolin blanc couvrant l'arène rubéfiée en supposant que le drainage *per ascensum* de l'eau contenue dans la masse au cours du déplacement aurait fait émerger la fraction kaolinique de l'arène. Ensuite, la mare s'asséchant, le kaolin aurait décanté sur place.

- La couche (5) est également une arène, de texture comparable à celle de la couche (2), mais non rubéfiée. Sa mise en place résulterait aussi d'un déplacement en masse.

- Le niveau (7) est la surface supérieure de la couche (6), dont la forme festonnée est marquée par les cailloux ; il s'agirait de « cercles triés contigus », révélateurs de gel profond et durable du sol (Van Vliet-Lanoë, *in* Dewolf et Bourrié, 2008, fig. 2-19).

- Le sol brun (8) récent couvre l'ensemble avec une discordance angulaire soulignée par l'interruption du niveau (7) aux deux extrémités du talus gauche (côté nord), et scellant une autre arène claire entre ces deux extrémités.

FICHE 2 : DESCRIPTION GÉOLOGIQUE À L'ENTRÉE NORD DE FOURMIES (59)

Observateur : Francis MEILLIEZ (1984, 2015)

Localisation

Géographique : IGN (1 : 25 000) 2808-O (Hirson-Fourmies) :

Coordonnées du carrefour (point 2 sur Fig. 6A) :

Lambert I : X = 721,175 Y = 1260,250 Z = 189

Lambert 93 : X = 773709 Y = 699370 ;

Latitude : X = 4,0281° Longitude : 50,0374°

Géologique : feuilles (1 : 50 000) XXVIII-8 (Hirson) et XXVIII-7 (Trélon) :

Références de l'observateur : Carnet C, page 136-137 ; 3 diapositives C137a à C137c / Carnet I, page 008 ; 8 photos : I008d à I008k.

Etat de l'affleurement

Observations du 2 mars 1985 : Implantation d'un centre commercial, partiellement sur remblais, en bordure orientale du CD42 relinéarisé.

Observations du 24 janvier 2015 (avec neige) : Toute la voirie a été refaite. Tous les talus routiers sont végétalisés.

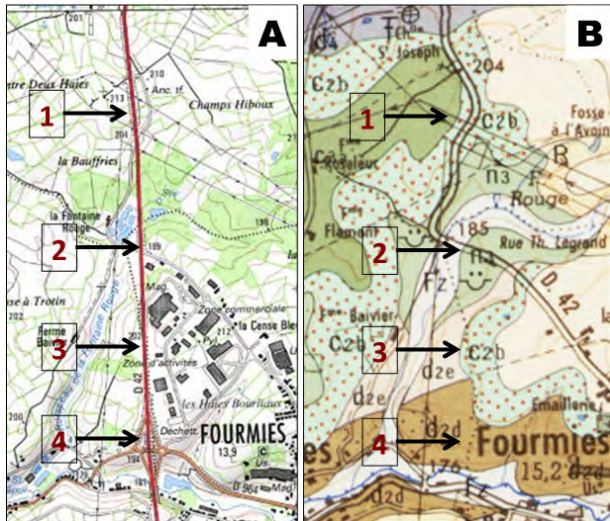


Fig. 6. — Localisation des quatre affleurements visités du site de Fourmies : A- sur la carte topographique Hirson-Fourmies 2808-Ouest, 1 : 25 000 (IGN, 1991 : <http://www.geoportail.gouv.fr>) ; B- sur la carte géologique d'Hirson (feuille XXVIII-8 à 1 : 50 000, Hatrival et al., 1969) (source : <http://www.infoterre.fr>).

Fig. 6. — Location of the four studied outcrops of the Fourmies locality : A- on the topographical map Hirson-Fourmies 2808-West, 1 : 25 000 (IGN, 1991 : <http://www.geoportail.gouv.fr>) ; B- on the geological map Hirson (sheet XXVIII-8 1 : 50 000, Hatrival et al., 1969) (source : <http://www.infoterre.fr>).



Fig. 7. — Site de Fourmies : vues vers le sud : A- depuis le point 2 vers le point 3 (Fig. 6), en 1985 ; B- depuis le point 1 vers les points 2 et 3 (Fig. 6), en 2015.

Fig. 7. — Fourmies locality : southwards sights : A- from point 2 towards point 3 (Fig. 6), in 1985 ; B- from point 1 towards points 2 and 3 (Fig. 6), in 2015.

Description géologique

Coupe du nord au sud (les numéros renvoient aux points localisés sur la Fig. 6 ; les symboles géologiques désignent les unités de la carte, Fig. 6B) :

1 – Lieu-dit *Champs Hiboux* : la route linéarisée passe en déblais à la cote 204. Une mince couche (< 2m) de Sables Verts (c2^b), très glauconieux, couvre des rocailles calcaires qui devraient être des blocs de Calcaire de Givet (d4), bousculés par le terrassement.

2 – Fond du vallon du Ruisseau de la Fontaine Rouge / route vicinale vers le quartier de la Marlière. Le talus routier nord (Fig. 9 A-B) expose la partie supérieure d'une succession dont la partie basse a été observée de l'autre côté de la route vicinale, dans le trou carré ménagé pour y poser un ouvrage d'assainissement. De haut en bas, on observe :

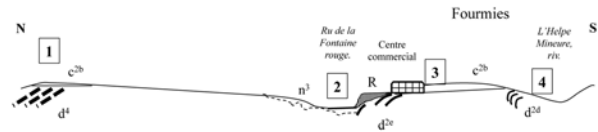


Fig. 8. — Site de Fourmies : coupe interprétative (hors échelle : environ 1 400 m de long pour 25 m de dénivelé) : les numéros indiquent les affleurements visités ; R = remblais, c2^b = Sables Verts (Albien), n3 = faciès wealdien, d4 = Calcaire de Givet, d2e = Formation de Hierges, d2d = Formation de Chooz (Emsien) selon la carte (Fig. 6 ; Hatrival et al., 1969).

Fig. 8. — Fourmies locality : cross-section (out of scale : roughly 1400 m at length, 25 m in elevation) : numbers refer to observed sites : R = embankment, c2^b = Green Sands (Albian), n3 = wealdian facies, d4 = Givet Limestone, d2e = Hierges Formation, d2d = Chooz Formation (Emsian) according to the geological map (Fig. 6 ; Hatrival et al., 1969).

- sol brun surmontant un niveau limon argileux ocre (1 à 2 m) dans lequel s'identifient de petites cellules de cryoturbation, soulignées par quelques graviers et petits cailloux anguleux ;

- Sables Verts (c2^b), glauconieux (2 à 3 m) ;

- Argile marneuse ocre (1 à 2 m) dans laquelle plusieurs esquilles de restes de vertébrés ont été trouvées mais pas de pièce clairement identifiable (Fig. 9 A-B) ;

- Argiles silteuses noires avec quelques encroûtements ferrugineux au sommet (Fig. 9B), à débris de lamellibranches et huîtres (1 à 2 m) ;

- Marnes gris clair (au niveau de la route : épaisseur non déterminable) ;

- Dans le trou du puisard : conglomérat lâche (< 1 m) à matrice de sable très grossier et galets émoussés à très émoussés (diamètre < 0,20 m) ; fragments d'ammonites ; localement ciment ferrugineux dans le lit de gravier sommital ;

- Sable rose grossier (< 0,50 m), à litages obliques, intercalé de lits ligniteux ;

- Sable roux (puissance inconnue), à encroûtements ferrugineux.

Les trois termes les plus bas s'amincissent en s'approchant du substratum paléozoïque, lequel est formé de calcaire argileux noir, un peu altéré, en bancs inclinés de 60° vers le SE. Ces bancs pourraient figurer dans la Formation de Hierges (d'âge emsien supérieur à eifélien dans la vallée de la Meuse).

3 – Le centre commercial repose sur un dôme entaillé en déblai, prolongé au nord par un remblai. Le talus routier dans le déblai montre un niveau de Sables Verts (c2^b) horizontal tapissant des schistes silteux et carbonatés, finement lités, fossilifères, qu'on peut rapporter à la Formation de Hierges. Ces derniers sont inclinés vers le NW de 30 à 35° ; ils sont faiblement altérés. La base des Sables est localisée aux alentours de la cote 200.

4 – Les déblais de l'échangeur routier à l'entrée ouest de Fourmies montrent une série de grès brun à patine rougeâtre, surtout due aux interlits silteux rouges, schistosés. Cet affleurement est attribué à la Formation de Chooz par la carte géologique (Hatrival *et al.*, 1969).

Proposition de scénario interprétatif

- Dépôt, puis plissement à vergence nord (varisque) d'une série rapportée de l'Emsien (Formation de Chooz) au Givétien (Calcaire de Givet), dont l'épaisseur, s'il s'agit d'une stampe unique, est nettement amincie par rapport à son équivalent le long de la vallée de la Meuse.



Fig. 9. — Site de Fourmies : talus nord de la route vicinale vers La Marlière : A– D. Sigogneau et D. Russell (Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris) recherchent des restes de vertébrés dans l'argile marneuse ocre rapportée au faciès wealdien ; B- Détail : quelques restes phosphatés et contact avec les marnes à encroûtements ferrugineux.

Fig. 9. — Fourmies locality : excavation slope along the La Marlière road : A– D. Sigogneau and D. Russell (Muséum National d'Histoire Naturelle, Paris) are looking for vertebrate remnants within the ochred limy clay which represents wealdian facies ; B– Detail : a few phosphatized remnants and contact with the top ferruginous hard rock.

- Erosion conduisant à la formation d'un petit val dans lequel s'accumulent des dépôts continentaux rapportés aux faciès wealdiens, probablement fluviaux.

- L'ensemble est recouvert en discordance par les Sables Verts, dépôt marin rapporté à l'Albien.

- Le soulèvement du dôme ardennais détermine la mise en place d'un réseau hydrographique dont un élément reprend un vallon plus ancien.

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* : 149 tomes de 1870 à 2015, 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-lille1.fr>

COLLECTIONS OF THE NATURAL HISTORY MUSEUM OF LILLE. VIII. — DIPLOSTRACA (TYPES AND FIGURED SPECIMENS)

Les collections du Musée d'Histoire Naturelle de Lille. - VIII. — Diplostraca (Types et figurés)

by Marie HENNION (*), Jessie CUVELIER (**), Oscar F. GALLEGU (***)
& Daniel VACHARD (****)

Abstract. – The Diplostraca (also known as conchostracans; Arthropoda: Crustacea: Branchiopoda: Phyllopoda) are a group that were often collected in the coal basins of northern and eastern France, during the main period of activity of the coal industry (end of 19th Century to beginning of 20th Century); others were collected in Germany, Switzerland, Africa and Russia. Hence, the palaeontological collections of Lille (Natural History Museum of Lille and University of Lille) are especially rich in specimens. This paper presents a reasoned catalogue of the types and figured specimens of the collection of the Natural History Museum of Lille, associated with a brief review of the Palaeozoic diplostracans, and some new or updated data in geology and palaeontology. Fossil Diplostraca are a rather neglected group, which appears however to be important in biostratigraphy, sequential stratigraphy, palaeoclimatology, palaeobiology, palaeoecology and palaeobiogeography during both principal stages of the Late Carboniferous (Pennsylvanian); i.e., during Moscovian (traditionally called Westphalian in western Europe) and Kasimovian times (traditionally called Stephanian).

Résumé. – *Les Diplostraca (autrefois appelés conchostracés ; Arthropoda : Crustacea : Branchiopoda : Phyllopoda) sont un groupe qui a fait l'objet de nombreuses récoltes dans les bassins houillers du nord et de l'est de la France, durant la période d'activité maximale des mines de charbon (c'est-à-dire de la fin du XIX^e siècle au début du XX^e) ; d'autres exemplaires ont été recueillis en Allemagne, en Suisse, en Afrique et en Russie. Ces très nombreux spécimens ont été rassemblés dans les collections publiques lilloises de paléontologie (Musée d'Histoire Naturelle de Lille et Université de Lille). Cet article présente un catalogue raisonné des collections de types et figurés du Musée d'Histoire Naturelle de Lille ainsi qu'une révision des données générales sur les Diplostraca paléozoïques, et un certain nombre de données géologiques et paléontologiques nouvelles ou actualisées. En effet, ce groupe de fossiles s'avère important en biostratigraphie, stratigraphie séquentielle, paléoclimatologie, paléobiologie, paléoécologie et paléobiogéographie pour les deux périodes principales du Carbonifère supérieur (Pennsylvanien) : le Moscovien (classiquement Westphalien) et le Kasimovien (classiquement Stéphanien).*

Keywords. – Diplostraca, conchostracans, Carboniferous, Nord – Pas-de-Calais Basin, Saar-Lorraine Basin.
Mots-clés. – *Diplostraca, conchostracés, Carbonifère, Bassin du Nord – Pas-de-Calais, Bassin sarro-lorrain.*

I. — HISTORICAL BACKGROUND

The geological and palaeontological collections of the city of Lille (northern France) are particularly rich, insofar as they result from the merging of two collections, that of the Natural History Museum and that of the University of Lille, which both were constituted as early as the 19th century (Oudoire *et al.*, 2014). The Faculty of Sciences of Lille was founded in August 1854, but the department of geology was created 10 years later with the appointment of Jules Gosselet to the chair of Geology and Mineralogy (Thiébaud, 2011). On the other hand, in the same period, the Society of Sciences, Agriculture and Arts of

Lille bequeathed its collection of natural history specimens to the city of Lille, which made it available for the Faculty of Sciences. The city of Lille formalized the creation of the Museum of Geology and Mineralogy on the 18th February, 1877. This museum was first managed by a commission headed by professors of the university, which included Jules Gosselet (Blicek *et al.*, 2013, 2014).

Later, the museum and the faculty moved together to a single new building, built in 1894. The Gosselet Museum of Geology was inaugurated in 1902. Subsequently, the collections were therefore enriched thanks to the investigations of the university

(*) Muséum National d'Histoire Naturelle – Département Biologie des Invertébrés Marins et Malacologie (BIMM), 55 rue Buffon, F-75005 Paris (France); marie.h2p@hotmail.fr

(**) Université de Lille – Sciences et Technologies, UFR Sciences de la Terre (SN5), UMR 8198 Evo-Eco-Paléo, F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France); Jessie.Cuvelier@univ-lille1.fr

(***) Área Paleontología (Centro de Ecología Aplicada del Litoral, Centro Científico Tecnológico Nordeste, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Casilla de Correo 128, 3400 Corrientes (Argentina); and Geología Histórica-Micropaleontología (Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Universidad Nacional del Nordeste), Corrientes (Argentina); ofgallego@live.com.ar

(****) Musée d'Histoire Naturelle de Lille, 19 rue de Bruxelles, F-59000 Lille (France); toudoire@mairie-lille.fr

(*****) 1 rue des Tilleuls, F-59152 Gruson (France); Daniel.Vachard@free.fr

professors and the field excursions organized in the region for the students. Charles Barrois, who was a former student of Jules Gosselet, succeeded him as the head of the Chair of Geology and Mineralogy and founded the Coal Museum in 1907, in order to implement a collaboration between the mining industry and university research. Numerous mining companies were active in the mining area of Nord – Pas-de-Calais (France) during the first part of the 20th century, and a great number of samples were offered by these companies to the University and Museum collections (Oudoire *et al.*, 2014). That is why the Natural History Museum and the University have a unique collection of palaeobotanical specimens, as well as of all other fossil forms of life encountered in the coal basin. In the 1960s, the University's buildings located within the city of Lille were found too narrow and not suitable for teaching and housing anymore. Therefore, the University moved to the outskirts of Lille. The geology professors took away their specimens under study, essentially fossil plants, to be received by the new campus of Villeneuve d'Ascq. The rest of the collections (nearly 75%) remained in the older buildings to form the Natural History Museum, henceforth managed by the City of Lille itself. Thus it happened that the palaeontological collection of Lille was divided into two sets of objects (Oudoire *et al.*, 2014).

II. — COLLECTIONS MANAGEMENT

The Natural History Museum is a multidisciplinary museum with 393,050 specimens including 120,000 in palaeontology and 56,400 in geology, according to the observatory OCIM in 2011 (Charon, 2014). The core collection encompasses four groups of samples: regional collection (nearly all from the geological Paris basin; 80,000 specimens), extra-regional collection (20,000 specimens), palaeobotany (6,000 specimens) and mineralogy (5,000 specimens). This core collection comes from findings of regional amateurs and scientific samplings (Oudoire *et al.*, 2014), like the Pierre Pruvost's work (Pruvost, 1911, 1914, 1919) of the Carboniferous faunas, which provided most of the diplostracan/conchostracan figured specimens of the Museum. Other elements of the collections were provided by Corsin (1932) in his palaeontological guidebook on the Nord – Pas-de-Calais coal basins, and by Waterlot (1934), who studied conchostracan faunas from the Saar-Lorraine coal basin.

Since the beginning of 21st century, the Museum began an inventory policy with public funding; and several catalogues have been published in the *Annales de la Société Géologique du Nord* (Malvesy, 1999; Malvesy *et al.*, 1999, 2000, 2002; Blicek *et al.*, 1999, 2013; Oudoire *et al.*, 2008, 2011). In parallel, the University proceeds with the inventory and photographs of its collection, in the framework of the national program Trans'Tyfipal (<http://transtyfipal.u-bourgogne.fr>). Trans'Tyfipal is an online database listing the palaeontological types and figured specimens housed in the French institutions such as the universities and museums. This database was created in 1986 under the name Tyfipal (Thierry, 1995), and was initially coordinated by the University of Bourgogne (Dijon). In the near future, it will be replaced by the great project E-Recolnat of digitization of French taxonomic references. All the specimens reported below are available on the website <http://transtyfipal.u-bourgogne.fr/> by implementing the following search criteria: Order: "Diplostraca" / Establishment keeper: "Lille - Museum d'Histoire Naturelle".

III. — DIPLOSTRACA

Diplostraca, formerly named conchostracans, are small branchiopod-phylopod crustaceans, also called "clam shrimp", with a symmetrical, bivalved, chitinous carapace with growth lines (Lecointre & Le Guyader, 2009). They differ from the ostracods, which have a calcitic shell without preserved growth lines (Meglitch, 1975; Vannier *et al.*, 2003). Diplostraca are present from the Devonian to Recent (Tasch, 1969; Monferran *et al.*, 2013). Their size varies from 1 millimetre to a few centimetres. They inhabit temporary fresh water bodies (Vannier *et al.*, 2003) and consequently, provide good evidence for lacustrine environments in sequential and biostratigraphic analyses (Lucas & Milner, 2006). The geographical distribution of extant Diplostraca is worldwide, except in Antarctica, although Tasch (1987) described many fossil Diplostraca from Antarctica. This very broad distribution can be explained, because their eggs are time- and drought-resistant due to their encystment, and possible, subsequent transportation by birds and winds. These latter characters make diplostracans useful for palaeogeographical reconstructions (Tasch, 1987).

Modern taxonomic descriptions of Diplostraca are principally based on the anatomy of the living animal, not on the carapace; so that, there are no cross checks between extant and fossil specimens. On the other hand, several species were based on only one fossil specimen, in spite of the fact that recent papers suggest the comparison of fossil and extant taxa (Martin & Davis, 2001; Astrop & Hegna, 2015). Molecular and morphological studies have shown that the former "Conchostraca" group was not monophyletic, and now this group is part of the order Diplostraca, which include four extant suborders, viz., Spinicaudata, Laevicaudata, Cyclestherida, and Cladocera, and two extinct suborders, viz., Leaiina and Estheriellina (Martin & Davis, 2001; Monferran *et al.*, 2013). The principal characters used to describe the fossil Diplostraca (Fig. 1) are 1) the angle between dorsal and posterior margin; 2) the shape of the shell, which can be subovate, subcircular, subelliptical, subquadrate or subtrapezoidal; 3) the presence or absence and the number of growth lines on the carapace; 4) the position of the umbo, which is placed between the median point and the anterior end of the dorsal margin; 5) the presence of different structures such as spines, nodes and ribs in the umbonal region, the type of structure in the interspaces of growth lines; and 6) the presence or absence and number of radial ornaments, eventually of the carinae or ribs (Raymond, 1946; Kobayashi, 1954; Novozhilov, 1958a, b, c, d; Tasch, 1969; Chen & Shen, 1985).

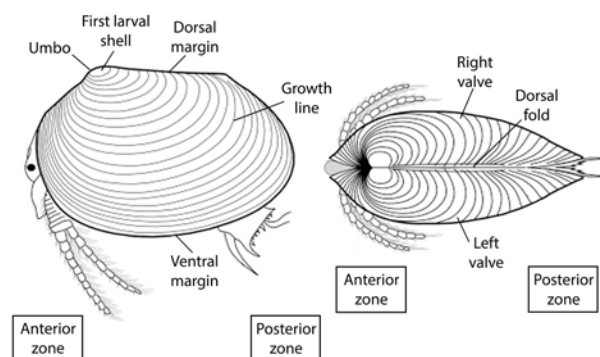


Fig. 1. – Sketch of a diplostracan (modified from Vannier *et al.*, 2003).

Fig. 1. – Schéma d'un diplostracé (modifié d'après Vannier *et al.*, 2003).

IV. — PRELIMINARY DATA ABOUT THE SYSTEMATIC CATALOGUE

1. Goals of this catalogue

This catalogue follows other publications about the palaeontological collections of the Natural History Museum of Lille. The main goal of a catalogue is to help further revisions of a group of organisms, and the collection may be a good tool for studies with modern methods like morphometric analyses, SEM analyses or geochemical investigations.

2. Abbreviations

MGL, Musée Gosselet, Lille (Musée d’Histoire Naturelle – Musée de Géologie); MHL, Musée Houiller, Lille (Musée d’Histoire Naturelle – Musée de Géologie); Loc., Locality; Lithost., Lithostratigraphy; Biost., Biostratigraphy; Chronost., Chronostratigraphy.

3. Adopted coal-units nomenclature

In the following list, we tried to translate, revise and re-actualize some lithostratigraphic, geographic and toponymic terms traditionally used in the French coal basins and/or coal industry and mines. Names between inverted commas remain directly used below in the text (“Bowette” – intersecting horizontal gallery; “Dressant” – strongly dipped coal seam

from 45° to almost vertical; “Voie de fond” – deepest mine gallery); for others, we will use the proposed translations: Assise – Formation; Faisceau – Member; Galerie – gallery; Passée – parasequence; Puits, fosse – pit; Veine – coal seam.

4. Former numberings of samples

The Natural History Museum of Lille renumbered specimens with the prefix MGL and a number that can match the historical collection (e.g., MGL 1886 for n°1886) or not (e.g., MGL 6341 for n°1884).

5. Editorial remark

We have transliterated the Russian names according to the current phonetic rules based on the English phonetics; for example, we used Novozhilov instead of Novojilov.

6. Systematic classification of Diplostraca

The classification followed in this work was established by one of the authors (O.G.) using a compilation of previous established classifications: Novozhilov (1958a, b, c, d), Defretin-Lefranc (1965, 1970), Tasch (1969, 1987), Chen & Shen (1985), Jones & Chen (2000), and Martin & Davis (2001). Some of the specimens mentioned in the catalogue have no clear systematic placement because they lack the main diagnostic characters based on the above mentioned literature. Further detailed studies in the future

Subsystem	Series	Stages			
		E. Europe	N. America	W. Europe (Series/Stages)	Regional (Sub)stages
Pennsylvanian	Upper	Gzhelian	Virgilian	Autunian	-----
		Kasimovian	Missourian	Stephanian	C B A Barruelian Cantabrian
	Middle	Moscovian	Desmoinesian	Westphalian	D Asturian
			Atokan		C Bolsovian
		Bashkirian	Morrowan		B Duckmantian
	Lower	Morrowan	Morrowan	Namurian (upper part)	A Langsettian
					Yeadonian
					Marsdenian
					Kinderscoutian
					Alportian
				Chokierian	

Fig. 2. – Chronostratigraphic correlation in the Pennsylvanian Subsystem (modified from Heckel & Clayton, 2006).

Fig. 2. – Corrélation chronostratigraphique du sous-système Pennsylvanien (modifié d’après Heckel & Clayton, 2006).

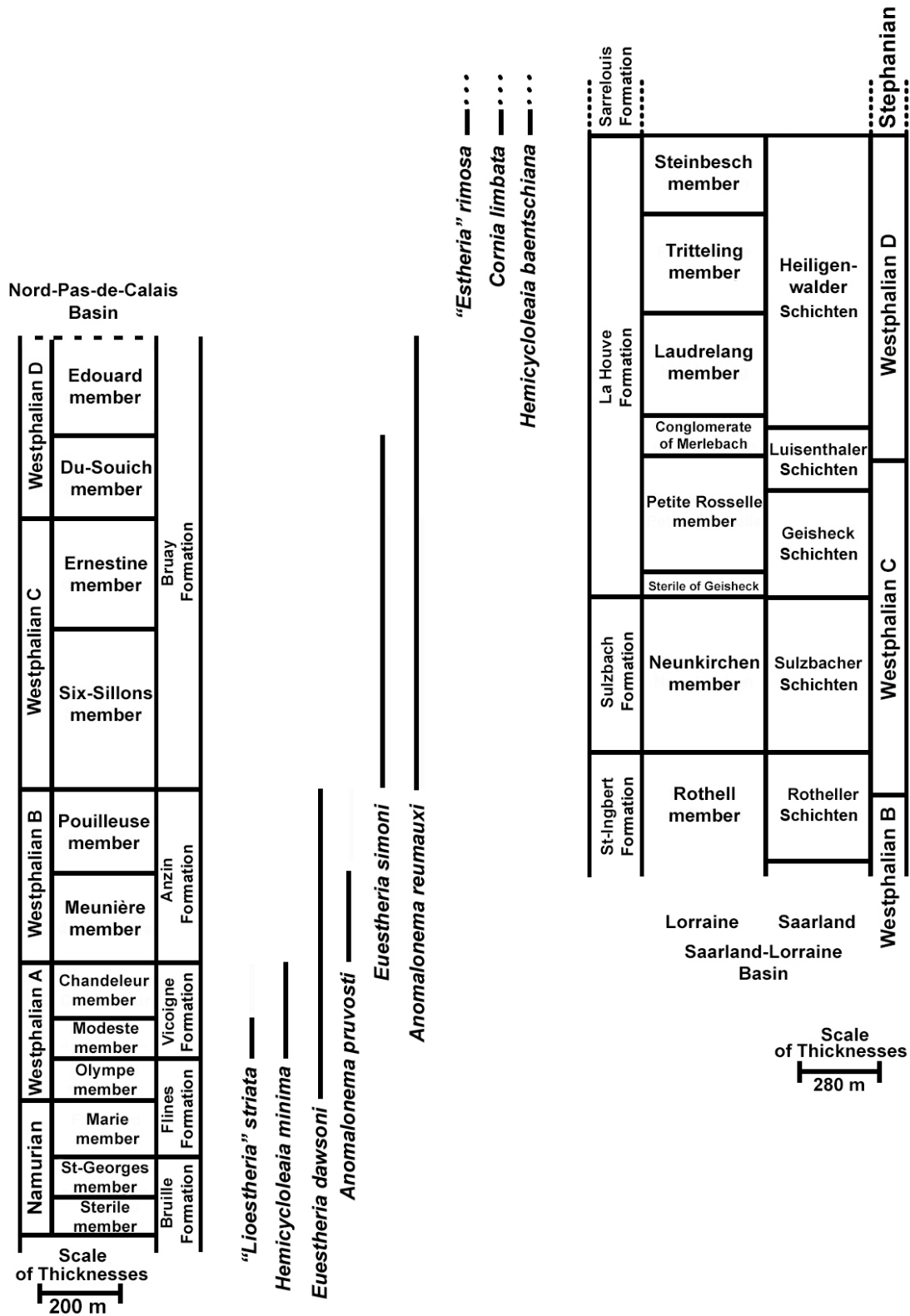


Fig. 3. – Table of stratigraphic correlations and stratigraphic distributions of the Diplostraca specimens of the Natural History Museum of Lille, collected in the coalfields of Nord – Pas-de-Calais and Saarland-Lorraine (modified from Laveine *et al.*, 1977).

Fig. 3. – Tableau récapitulatif des concordances stratigraphiques et des extensions des spécimens de Diplostracés de la collection du Musée d'Histoire Naturelle de Lille, récoltés dans les bassins houillers du Nord – Pas-de-Calais et de Sarre-Lorraine (modifié d'après Laveine *et al.*, 1977).

could bring new information to the real systematic affinities of these materials. The suborders Leaiina and Spinicaudata are identified in the material analyzed in the present catalogue.

7. Revised chronostratigraphy

The chronostratigraphy is revised and re-actualized according to the more recent classification of the Pennsylvanian Subsystem proposed by Heckel & Clayton (2006) (Fig. 2).

8. Stratigraphic distribution of the principal species mentioned in the catalogue

Among the 27 listed Diplostraca specimens for the Natural History Museum, 24 come from the Nord – Pas-de-Calais coalfield (Westphalian in age) and three from the Saarland-Lorraine coalfield (Stephanian in age). The stratigraphic distribution of the principal species of diplostracans is indicated along a lithostratigraphic column of each basin (Fig. 3). This catalogue shows the uniqueness of this collection because the majority of the specimens come from the Nord – Pas-de-Calais coalfield, which has become inaccessible and has not been exploited since the end of the 20th century.

V. — SYSTEMATIC CATALOGUE

Authors of taxon names are indicated in small capital letters followed by year of authorship. The corresponding bibliographical references are not listed here in the bibliography section; they can be found in the papers of Novozhilov (1958a, b, c, d), Defretin-Lefranc (1965, 1970), Tasch (1969, 1987), Chen & Shen (1985), Jones & Chen (2000), and Martin & Davis (2001). All other cited papers are in the bibliography section.

Phylum ARTHROPODA VON SIEBOLD, 1848
 Subphylum CRUSTACEA BRÜNNICH, 1772
 Class BRANCHIOPODA LATREILLE, 1817
 Subclass PHYLLIPODA PREUSS, 1951
 Order DIPLOSTRACA GERSTAECKER, 1866
 Suborder LEAIINA KOBAYASHI, 1972
 Superfamily LEAIOIDEA RAYMOND, 1946
 Family LEAIIDAE RAYMOND, 1946
 Genus *HEMICYCLOLEAIA* RAYMOND, 1946
Hemicycloleia baentschiana (BEYRICH, 1864) RAYMOND, 1946

Comment. The assignment of this species to the genus *Hemicycloleia* follows Percy Raymond's proposal and is based on Jones & Chen (2000) and the revision of material (I-02824) housed in the National History Museum of Madrid (Spain).

MGL 5100-1: Right valve *Leaia leidy* var. *baentschiana* Beyrich, 1864, illustrated as *Leaia baentschi* in Waterlot, 1934, pl. VII, fig. 5.
Loc.: Mining site of Götterborn, B.I.X. Nördl. Hauptquersch. II Tb. S., 41 metres north of the coal seam Wachlschied (Saarland, Germany).
Lithost.: Sarrelouis Formation.
Biost.: *Leaia* beds.
Chronost.: Carboniferous, Lower Stephanian.

Hemicycloleia minima (PRUVOST, 1914) RAYMOND, 1946

Comment. The assignment of this species to the genus *Hemicycloleia* follows Percy Raymond's proposal and is based on Jones & Chen (2000).

MGL 1888: Right valve illustrated as *Leaia tricarinata* var. *minima* Pruvost, 1914, pl. II, fig. 9; Pruvost, 1919, pl. XXV, fig. 4; Corsin, 1932, pl. XXXVIII, fig. 3.

Loc.: Roof of a parasequence located at 12 metres in the lateral gallery n°3, 0.80 m upon the coal seam, Pit 10, Concession of Lens, Group of Lens (Pas-de-Calais, France).

Lithost.: Vicoigne Formation.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian A.

Comment. The exact location of the type locality (i.e., its height above roof) is most probably 12 m, as inscribed on the label associated with the sample, rather than 11 m or 2 m, as indicated in the publications of Pruvost (1914, 1919) or Corsin (1932).

MGL 6035-1: Right valve illustrated as *Leaia tricarinata* var. *minima* in Pruvost, 1914, pl. II, fig. 12; 1919, pl. XXV, fig. 3.

Loc.: Roof of the coal seam Nord 4, Pit Déjardin, Concession of Aniche, Group of Douai (Nord, France).

Lithost.: Vicoigne Formation, Modeste Member.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian A.

MGL 6035-2: Right valve illustrated as *Leaia tricarinata* var. *minima* in Pruvost, 1914, pl. II, fig. 11; 1919, pl. XXV, fig. 2; Corsin, 1932, pl. XXXVIII, fig. 2.

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen MGL 6035-1.

MGL 6035-3: Positive impression of a left valve and fragments of the negative impression of a right valve illustrated as *Leaia tricarinata* var. *minima* in Pruvost, 1914, pl. II, fig. 10; 1919, pl. XXV, fig. 1.

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen MGL 6035-1.

Suborder SPINICAUDATA LINDER, 1945
 Superfamily EOESTHERIOIDEA ZHANG & CHEN
 in ZHANG *et al.*, 1976
 Family EUESTHERIIDAE DEFRETIN-LEFRANC, 1965
 Genus *EUESTHERIA* DEPÉRET & MAZERAN, 1912
Euestheria dawsoni (JONES, 1870) PRUVOST, 1919

Comment. The species *dawsoni* was assigned to the genus *Estheria*, *Pseudestheria* or *Euestheria* according to the authors. The latter assignment currently prevails; however, due to the absence of a distinctive ornamentation pattern, Raymond (1946) mentioned that the species most probably belongs to the Limnadiidae, as it has a large umbonal region / larval carapace, conspicuous in the Jones' specimens.

MGL 1899-A: Right valve illustrated as *Estheria dawsoni* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 27.

Loc.: "Dressant" at 523 m in the "bowette" 1303, Pit 13, Concession of Lens, Group of Lens (Pas-de-Calais, France).

Lithost.: Anzin Formation, Meunière Member.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian B.

MGL 1900: Right valve illustrated as *Estheria dawsoni* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 25.

Loc.: Coal seam n° 6, Pit 4, Concession of L'Escarpelle, Group of Douai (Nord, France).

Lithost., chronost.: As for the specimen MGL 1899-A.

Comment. The sample MGL 1900, relocated by us in the collections, had the same numbering and the same locality as in the Pruvost's publication. However, neither one of the four fragments of mudstone, which comprise the sample, corresponded to the specimen illustrated in this latter publication.

MGL 1901-1: Right valve illustrated as *Estheria dawsoni* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 26.

Loc.: Coal seam Bernicourt, Pit Notre-Dame, Concession of Aniche, Group of Douai (Nord, France).

Lithost., chronost.: As for the specimen MGL 1899-A.

MGL 6028-1: Left valve illustrated as *Estheria dawsoni* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 24.

Loc.: Thirsh parasequence in lower part of the Désirée coal seam, Pit 4, Concession of Meurchin, Group of Lens (Pas-de-Calais, France).

Lithost.: Flines Formation, Olympe Member.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian A.

? *Euestheria simoni* (PRUVOST, 1911) PRUVOST, 1919

Comment. The species *E. simoni*, similarly to *E. dawsoni*, was first assigned to the genus *Estheria* or *Pseudestheria*, due to the absence of a conspicuous ornamentation. Defretin-Lefranc (1970) described then the reticular ornamentation of this species. Based on our newly investigated specimens, we suggest that the taxon most probably belongs to the Palaeolimnadiidae, because of its large and smooth umbonal regions. However, a more accurate and detailed study is necessary for modifying the assignment, to Palaeolimnadiidae or to Euestheriidae.

MGL 1892: Group of valves (Paratype of *Estheria simoni* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, figs. 30-32; Corsin, 1932, pl. XXXIX, figs. 1-5).

Loc.: Deepest mine gallery 2001, roof of the coal seam Beaumont, Pit 8, Concession of Lens, Group of Lens (Pas-de-Calais, France).

Lithost.: Bruay Formation, Dusouich Member.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian D.

MGL 6029: Left valve (Holotype of *Estheria simoni* designed by Pruvost, 1911, pl. I, figs. 4-8; Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 29; Piveteau, 1953, p. 264, pl. I).

Loc.: “Bowette” 811, “voie de fond” n° 2187, roof of the coal seam Beaumont, Pit 8, Concession of Lens, Group of Lens (Pas-de-Calais, France).

Chronost.: Carboniferous, Westphalian C.

MGL 6030: Right valve (Paratype of *Estheria simoni* in Pruvost, 1911, pl. I, fig. 5).

Loc.: Roof of the coal seam Beaumont, Pit 3, Concession of Liévin, Group of Liévin (Pas-de-Calais, France).

Chronost.: Carboniferous, Westphalian C.

MGL 6031: Left valve (Paratype of *Estheria simoni* in Pruvost, 1911, pl. I, fig. 6).

Loc.: Roof of the coal seam Marie, Pit 9, Concession of Courrières, Group of Hénin-Liétard (Pas-de-Calais, France).

Chronost.: As for the specimen MGL 6030.

MGL 6032: Left valve (Paratype of *Estheria simoni* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 31).

Loc.: Coal seam Beaumont, Concession of Lens, Group of Lens (Pas-de-Calais, France).

Chronost.: Carboniferous, Westphalian?

MGL 6033-1: Left valve (Paratype of *Estheria simoni* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 33).

Loc.: Roof of coal seam Beaumont, Pit 4, Concession of Liévin, Group of Liévin (Pas-de-Calais, France).

Lithost.: Bruay Formation, Dusouich Member.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian D.

“Estheria” rimosa (GOLDENBERG, 1877)

Comment. Raymond (1946), who has been the principal revisor of this taxon, indicated, 1) that both species, “*Estheria*” *limbata* and “*E.*” *rimosa*, were erected by Goldenberg (1877), and 2) that Pruvost and Waterlot speculated that *E. rimosa* was only

a form of *E. limbata*, because they are often found together among the fossil assemblages. Raymond (1946) maintained the individuality of two different species, but assigned them to the genus *Pseudestheria*. Kobayashi (1954, p. 160, 165) renamed both taxa *Cornia* (?) *limbata* and *Euestheria rimosa*, respectively, but he provided no taxonomic details for justifying these taxonomic changes. Our specimens are totally devoted of structures in the umbonal area. That indicates that they differ from *Cornia* (?) *limbata*, the genus assignment of which remains however doubtful, as suggested by previous authors.

MGL 5101-1: Group of valves illustrated as *Estheria limbata* Goldenberg, 1877 in Waterlot, 1934, pl. VI, figs. 14-15-15a.

Loc.: Schiffweiler (Saarland, Germany).

Lithost.: Sarrelouis Formation in Göttelborn area.

Chronost.: Carboniferous, Lower Stephanian.

Superfamily ESTHERITEOIDEA ZHANG & CHEN
in ZHANG *et al.*, 1976

Family FUSHUNOGRAPTIDAE WANG in HONG *et al.*,
1974 Genus indet.

“*Lioestheria*” *striata* MÜNSTER in GOLDFUSS, 1826
emend. PRUVOST, 1919

Comment. As discussed above, the taxonomy of the fossil Spinicaudata remains questionable at different hierarchical levels. One of these problematic taxa is the family Asmussiidae, which is an interesting group, defined on the straight, long dorsal margin and the strong angles at both ends and subcentral umbo. The original diagnosis (Kobayashi, 1954, as emended by Tasch, 1969) emphasized that it showed an ornamentation ranging from smooth, punctuate, radial lirae to alveolar. Chen & Shen (1985) assigned this family to the superfamily Estheriteoidea, due to its radial ornamentation, nevertheless, the type genus (*Asmussia*) and its type species (*A. membranacea* Pacht) both display a reticulate ornamentation. Furthermore, the species *L. striata* was included by Defretin-Lefranc (1970) in the genus *Pseudoasmussia* (the name of which was changed by Tasch (1987) into *Pseudoasmussiata*, due to the homonymy with *Pseudoasmussia* (Novozhilov, 1954)); nevertheless, many of the species of genus, including the type species (*P. grassmücki* Defretin-Lefranc, 1969), show a reticulate ornamentation. However, as the species *L. striata* exhibits a radial lirae ornamentation, its assignment to the genus *Lioestheria* Depéret & Mazeran (*sensu* Tasch 1969, neither in the sense of Kozur *et al.*, 1981 or Holub & Kozur, 1981) might be justified. This possibility was already suggested by Pruvost (1919), Raymond (1946) and Kobayashi (1954). Further studies are necessary to understand to which genus belongs this species.

MGL 1896-1: Left valve illustrated as *Estheria striata* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 20-20a; Corsin, 1932, pl. XXXVIII, fig. 6.

Loc.: “Bowette” 1302, second parasequence at the bottom of the coal seam n° 11, Pit 13, Concession of Lens, Group of Lens (Pas-de-Calais, France).

Lithost.: Vicoigne Formation, Modeste Member.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian A.

MGL 6034-5: Right valve illustrated as *Estheria striata* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 21; Corsin, 1932, pl. XXXVIII, fig. 7.

Loc.: Coal seam Saint-Charles, Pit 3, Concession of Meurchin, Group of Lens (Pas-de-Calais, France).

Lithost.: Vicoigne Formation, Modeste Member.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian A.

MGL 6034-7: Left valve illustrated as *Estheria striata* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 23; Corsin, 1932, pl. XXXVIII, fig. 9.

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 6034-5.

MGL 6034-12: Left valve illustrated as *Estheria striata* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 22; Corsin, 1932, pl. XXXVIII, fig. 8.

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 6034-5.

Superfamily VERTEXIOIDEA Kobayashi, 1954
(sensu ZHANG *et al.*, 1976)
Family LIOESTHERIIDAE (RAYMOND, 1946) emend.
HOLUB & KOZUR, 1981
Subfamily VERTEXIINAE KOBAYASHI, 1954
Genus CORNIA LYUTKEVICH, 1937
Cornia limbata (GOLDENBERG, 1877) KOBAYASHI, 1954

Comment. The revision of this specimen shows the presence of nodes in the umbonal area that support Kobayashi's (1954) assignment of it to the genus *Cornia*.

MGL 5099: Group of valves illustrated as *Estheria limbata* Goldenberg, 1877 in Waterlot, 1934, pl. VI, figs. 13-13a-13b.

Loc.: "Bowette" of Hirschbach at 766.50 m (Saarland, Germany).

Lithost.: Sarrelouis Formation.

Chronost.: Carboniferous, Lower Stephanian.

Family PALAEOLIMNADIOPSEIDAE DEFRETIN-LEFRANC, 1965
Subfamily ANOMALONEMATINAE NOVOZHILOV, 1958d
Genus ANOMALONEMA RAYMOND, 1946
Anomalonema reumauxi (PRUVOST, 1911) RAYMOND, 1946

MGL 1886: Right valve (Paratype of *Estheriella reumauxi* Pruvost, 1911 in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 34; Corsin, 1932, pl. XXXIX, fig. 6; Tasch, 1960, pl. 42, figs. 2a-2b) (Fig. 4A).

Loc.: "Bowette" 167, Coal seam Arago, Pit 1, Concession of Liévin, Group of Liévin (Pas-de-Calais, France).

Lithost.: Bruay Formation.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian C-D.

Comment. Defretin-Lefranc (1970) has indicated that the valve illustrated on her pl. 13, fig. 10 is identical to that of Pruvost (1919, pl. 24, fig. 34). Pruvost's valve corresponds to a specimen of our collections numbered MGL 1886 (Fig. 4A). That is in contradiction to the legend of plate 13 of Defretin-Lefranc (1970), the published number of which is 1884 (then, re-numbered MGL 6341). Evidently, the specimen of Defretin-Lefranc is the specimen number 1884 (= MGL 6341) (Fig. 4B) and differs from the specimen number 1886 (= MGL 1886) (Fig. 4A). Unfortunately, the specimen number 1886 was designated as the holotype of a new genus by Novozhilov (1958d) and renamed *Pierrepruvostia defretinae*. Subsequently, Chen & Shen (1985, p. 78-79) synonymized the genus defined by Novozhilov (1958d) with the genus *Anomalonema*.

MGL 1895: Right valve (Paratype of *Estheriella reumauxi* in Pruvost, 1911, pl. I, fig. 3).

Loc.: Roof of the coal seam Arago, Pit 9, Concession of Lens, Group of Lens (Pas-de-Calais, France).

Chronost.: Carboniferous, Westphalian C.

MGL 6340-2: Right valve (Paratype of *Estheriella reumauxi* in Pruvost, 1911, pl. I, fig. 2).

Loc.: Roof of the coal seam Arago, Pit 1, Concession of Liévin, Group of Liévin (Pas-de-Calais, France).

Chronost.: Carboniferous, Westphalian C.

MGL 6341: Right valve (Holotype of *Estheriella reumauxi* in Pruvost, 1911, pl. I, figs. 1-1a-1b; Pruvost, 1919, pl. XXIV, figs. 35-35a; Corsin, 1932, pl. XXXIX, figs. 7-7a; Tasch, 1960, pl. 42, figs. 3-4a-4b; Defretin-Lefranc, 1970, pl. XIII, fig. 10) (Fig. 4B).

Loc.: Roof of the coal seam Arago, Pit 12, Concession of Lens, Group of Lens-Liévin (Pas-de-Calais, France).

Lithost.: Bruay Formation, Dusouich Member.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian D.

Comment. Defretin-Lefranc (1970) was mistaken about the number of the valve; she indicated n°1886 in her text, whereas this number is in reality 1884 (= MGL 6341). On the other hand, Tasch (1960) suggested that this specimen was identical to the specimen illustrated in pl. I, fig. 16 of Pruvost (1911); this is probably another mistake, because this plate does not include 16 photos; and the identified figure is most probably 1a, and not 16.

Anomalonema pruvosti (RAYMOND, 1946)

MGL 1902-A: Right valve illustrated as *Estheria dawsoni* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 28.

Loc.: Terris, Pit 6, Concession of Ostricourt, Group of Oignies (Nord, France).

Lithost.: Anzin Formation, Meunière Member.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian B.

MGL 1902bis-A: Right valve illustrated as *Estheria dawsoni* in Pruvost, 1919, pl. XXIV, fig. 28bis.

Loc.: Roof of the 0.55 m-thick coal seam, Pit 5, Concession of Ostricourt, Group of Oignies (Nord, France).

Lithost., chronost.: As for the specimen MGL 1902-A.

We think that five other illustrated specimens were probably deposited in the Natural History Museum collection because this museum was the repository of the majority of the specimens of these publications. Up to now, these specimens have not been re-found. These five specimens encompass one specimen figured by Pruvost in 1911 (*Estheria simoni*, pl. I, fig. 7), two specimens figured by Pruvost in 1914 (*Leaia tricarinata*, pl. II, figs. 4-5; pl. II, figs. 6-7) and two specimens figured by Corsin in 1932 (as *Estheria mathieui*, pl. XXXIX, figs. 8-9; and *Leaia tricarinata*, pl. XXXVIII, fig. 1).

VI. — DISCUSSION AND CONCLUSION

This catalogue allows us to investigate the validity of many of the mentioned species. The investigated collection is constituted by nine species included in two suborders, four superfamilies, five families and five genera; among them, we revised two species of *Anomalonema*, one species of *Cornia*, one species of "*Estheria*", two species of *Euestheria*, two species of *Hemicycloleia*, and a species of "*Lioestheria*". Our numerous collections, from different stratigraphic and geographical localities, demonstrate that several species, e.g., *Hemicycloleia baentschiana* and *Euestheria simoni*, provide additional possibilities to develop detailed population (autoecological) studies, for defining intraspecific variations. On the other hand, as these type localities are closely related with the coal seams, the use of the Diplostraca in the parasequences provides new tools for the correlation and interpretation of the bearing sequences. This investigation also led to the re-discovery of Diplostraca with internal structures interpreted as "eggs" by Pruvost in 1919 (see MGL 1896-1 (Fig. 4C), MGL 6034-7 (Fig. 4D)). Moreover, our collections have yielded more specimens with "eggs", not yet illustrated, which might give additional informations about these types of enigmatic structures. It is completely possible that this collection is still concealing several specimens with other well-preserved soft parts (e.g., legs, claspers, furcas, shell gland, muscle scars and digestive tract; the previous global records of which were summarized by Zhang *et al.*, 1990 and Shen & Schram, 2014). Fossil-Lagerstätten with well-preserved Diplostraca are known in Ireland (Orr & Briggs, 1999), from localities, the geology of which differs from that of our outcrops and their specimens with possible eggs.

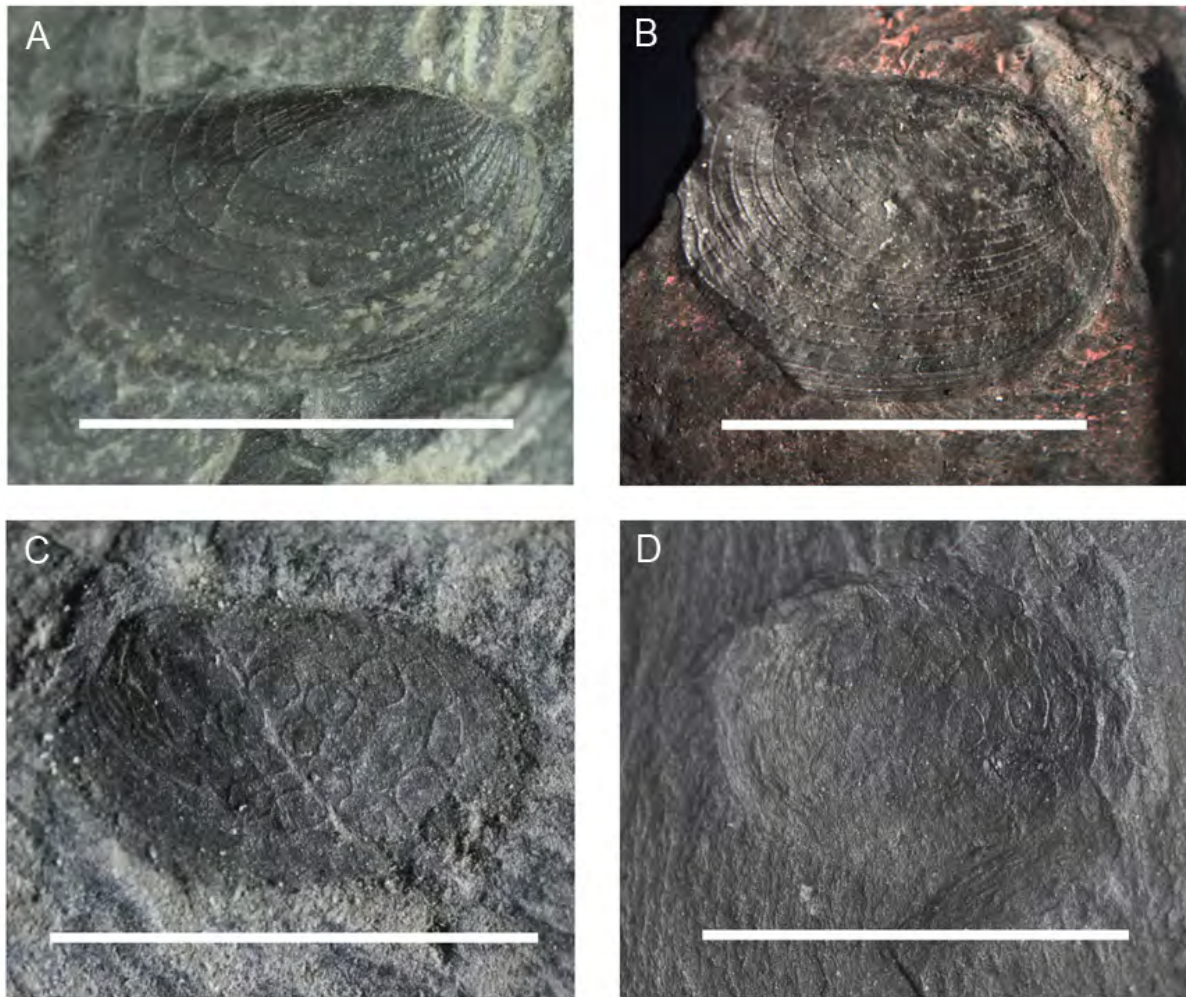


Fig. 4. - A - *Anomalonema reumauxi*, MGL 1886 (former number MHL 1886), Westphalian C-D. B - *Anomalonema reumauxi*, MGL 6341 (former number MHL 1884), Westphalian D. C - "*Lioestheria*" *striata* with internal structures interpreted by Pruvost as "eggs", MGL 1896-1, Westphalian A. D - "*Lioestheria*" *striata* with internal structures interpreted by Pruvost as "eggs", MGL 6034-7, Westphalian A. Scale bar represents 5 mm.

Fig. 4. - A - *Anomalonema reumauxi*, MGL 1886 (ancien numéro MHL 1886), Westphalien C-D. B - *Anomalonema reumauxi*, MGL 6341 (ancien numéro MHL 1884), Westphalien D. C - "*Lioestheria*" *striata* avec des structures internes interprétées par Pruvost comme des "oeufs", MGL 1896-1, Westphalien A. D - "*Lioestheria*" *striata* avec des structures internes interprétées par Pruvost comme des "oeufs", MGL 6034-7, Westphalien A. L'échelle représente 5 mm.

It must be noted that this catalogue only inventories a small portion of the Diplostraca of the collection, i.e., the types and illustrated specimens. Many of the specimens have been collected by the palaeontologists of Lille during the 20th century and could be useful in the study of morphological variability via morphometric tools. Diplostraca have been used as tools for the correlation and interpretation of the fossil-bearing sequences since the beginning of the mining industry. There is a large palaeontological collection of different groups from the Nord – Pas-de-Calais coalfield, with well-known type localities in the mine galleries. This large collection could permit further new biostratigraphical, palaeoecological and palaeoenvironmental investigations of the Pennsylvanian Diplostraca.

Acknowledgements. — We were helped during our research by Mrs E. Locatelli (UMR 8198 Evo-Eco-Paleo) for the bibliography and by Mr A. Blicek for advice about the presentation of the catalogue. O.F. Gallego's research is supported by the Universidad Nacional del Nordeste (Corrientes, Argentina) and the Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET, Argentina). We thank all those who participated in the collection inventory at the museum for several years. The reviews of Drs Astrop and Monferran were very useful as well as the remarks of Dr S. Lucas about our English.

REFERENCES

- ASTROP T. & HEGNA T. (2015). — Phylogenetic relationships between living and fossil Spinicaudatan taxa (Branchiopoda Spinicaudata): reconsidering the evidence. *Journal of Crustacean Biology*, **35** (3): 339-354.
- BEYRICH E. (1864). — Über eine Kohlenkalk Fauna von Timor. *Abhandlungen Akademie Wissenschaften Berlin*: 61-98.
- BLIECK A. with the collaboration of 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 – Pas-de-Calais : 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. *Mémoire de la Société Géologique du Nord*, **XVII**: 3-40.
- BLIECK A., CUVELIER J. & OUDOIRE T. (2013). — Euryptéridés des collections de paléontologie de Lille : collections du Musée d'Histoire Naturelle de Lille (VII) et collections de l'Université Lille I (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** (3): 87-128.
- CHARON P. (2014). — Les collections des muséums d'Histoire naturelle en chiffres. *La Lettre de l'OCIM - Office de Coopération et d'Information Muséales*, **153**: 26-29.
- CHEN P.J. & SHEN Y.B. (1985). — *An introduction to fossil Conchostraca*. Science Press, Beijing: 241 p.
- CORSIN P. (1932). — *Guide paléontologique dans le terrain houiller du Nord de la France*. Travaux et Mémoires de l'Université de Lille, Albums : Fascicule n° 5, Institut de la Houille de l'Université de Lille (Musée houiller): 44 p., 16 fig., 43 pl.
- DEFRETIN-LEFRANC S. (1965). — Etude et révision de Phyllopes Conchostracés en provenance d'U.R.S.S.. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **85**: 15-48.
- DEFRETIN-LEFRANC S. (1969). — Les Conchostracés triassiques du Groenland Oriental. In: DEFRETIN-LEFRANC S., GRASMÜCK K. & TRÜMPY R. Notes on Triassic stratigraphy and palaeontology of north-eastern Jameson land (East Greenland). *Meddelelser om Grønland*, **168** (2): 124-136.
- DEFRETIN-LEFRANC S. (1970). — Révision des Conchostracés westphaliens du bassin houiller du Nord – Pas-de-Calais. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **90**: 121-136.
- GOLDENBERG F. (1877). — *Fauna Saraepontana Fossilis. Die fossilen Thiere aus der Steinkohlenformation von Saarbrücken*, Heft 2, Saarbrücken, C. Möllingen: 54p.
- HECKEL P.H. & CLAYTON G. (2006). — The Carboniferous System. Use of the new official names for the subsystems, series, and stages. *Geologica Acta*, **4** (3): 403-407.
- HOLUB V. & KOZUR H. (1981). — Revision einiger Conchostracena-Faunen des Rotliegenden und biostratigraphische Auswertung der Conchostracena des Rotliegenden. *Geologisch-Paläontologische Mitteilungen Innsbruck*, **11** (2): 39-94.
- JONES P.J. & CHEN P.J. (2000). — Carboniferous and Permian Leaioida (Branchiopoda: Conchostraca) from Australia: taxonomic revision and biostratigraphic implications. *Records of the Australian Museum*, **52**: 223-244.
- KOBAYASHI T. (1954). — Fossil estherians and allied fossils. *Journal of the Faculty of Science, Tokyo University*, **9** (2): 1-192.
- KOZUR H., MARTENS T. & PACAUD G. (1981). — Revision von "Estheria" (*Lioestheria lallyensis* Déperet & Mazeran, 1912 und "Euestheria" *autunensis* Raymond, 1946. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaft*, **9** (12): 1441-1449.
- LAVEINE J.-P., COQUEL R. & LOBOZIAK S. (1977). — Phylogénie générale des Calliptéridiacées (Pteridospermopsida). *Geobios*, **10** (6): 757-847.
- LECOINTRE G. & LE GUYADER H. (2009). — *Classification phylogénétique du vivant*. Edition Belin, 3^e édition, 560 p.
- LUCAS S.G. & MILNER A.R.C. (2006). — Conchostraca from the Lower Jurassic Whitmore Point Member of the Moenave Formation, Johnson Farm, southwestern Utah. In: HARRIS J.D., LUCAS S.G., SPIELMANN J.A., LOCKLEY M.G., MILNER A.R.C. & KIRKLAND J.I. eds., The Triassic-Jurassic Terrestrial Transition. *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin*, **37**: 421-423.
- MALVESY T. (1999). — Les collections du Musée d'Histoire Naturelle de Lille. *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **6** (4): 155-156.
- MALVESY T., BABIN C. & BARROIS J. (2000). — Les Collections du Musée d'Histoire Naturelle de Lille. III. — Les Bivalves (types et figurés). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **8** (1): 3-18.
- MALVESY T., CAPPETTA H., DUTHEIL D.B., OTERO O. & OUDOIRE T. (2002). — Les Collections du Musée d'Histoire Naturelle de Lille. IV. — Poissons mésozoïques et cénozoïques (types et figurés). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **9** (3): 147-157.
- MALVESY T., MORZADEC P. & FEIST R. (1999). — Collections du Musée d'Histoire Naturelle de Lille : I. — Les Trilobites (types et figurés). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **6** (4): 157-162.
- MARTIN J.W. & DAVIS G.E. (2001). — An updated classification of the recent Crustacea. *Natural History Museum of Los Angeles County, Sciences Series*, **39**: 1-124.
- MEGLITSCH P.A. (1975). — *Zoologie des invertébrés 3 : Arthropodes mandibulés et Deutérostomiens*. Edition Doin, Paris, 362 p.
- MONFERRAN M.D., GALLEGO O.F., ASTROP T.I. & CABALERI N. (2013). — Autecology of *Wolfestheria smekali* (Spinicaudata) from the Upper Jurassic (Canadon Asfalto Formation), Patagonia, Argentina. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **392**: 52-61.
- NOVOZHILOV N. (1954). — Crustacés Phyllopes du Jurassique supérieur et du Crétacé de Mongolie. *Travaux de l'Institut Paléontologique de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S.*, **48**: 7-124 [In Russian; translated by Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières].
- NOVOZHILOV N. (1958a). — Conchostraca de la super-famille des Limnadiopseidae superfam. nov. In: NOVOZHILOV N., Recueil d'articles sur les Phyllopes Conchostracés. *Annales du Service d'information Géologique du Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières (B.R.G.G.M.)*, **26**: 95-127.
- NOVOZHILOV N. (1958b). — Conchostraca du Permien et du Trias du littoral de la Mer des Laptev et de la Toungouska inférieure. In: NOVOZHILOV N., Recueil d'articles sur les Phyllopes Conchostracés. *Annales du Service d'information Géologique du Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières (B.R.G.G.M.)*, **26**: 15-79.

- NOVOZHILOV N. (1958c). — Deux nouveaux genres et deux sous-familles nouvelles de Leaiidae du Permien supérieur de la région de la Volga. In: NOVOZHILOV N., Recueil d'articles sur les Phyllopoïdes Conchostracés. *Annales du Service d'information Géologique du Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières (B.R.G.G.M.)*, **26**: 81-84.
- NOVOZHILOV N. (1958d). — Nouveaux Conchostraca fossiles. In: NOVOZHILOV N., Recueil d'articles sur les Phyllopoïdes Conchostracés. *Annales du Service d'information Géologique du Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières (B.R.G.G.M.)*, **26**: 7-14.
- ORR P.J. & BRIGGS D.E.G. (1999). — Exceptionally preserved conchostracans and other crustaceans from the Upper Carboniferous of Ireland. *Special Papers in Palaeontology*, **62**: 1-68.
- 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. *Mémoire de la Société Géologique du Nord*, **XVII**: 175-183.
- OUDOIRE T., DELBECQUE S. & DEMARQUE D. (2008). — Les Collections du Musée d'Histoire Naturelle de Lille. V. — La collection de paléobotanique du Carbonifère. *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **15**: 39-45.
- OUDOIRE T., SWIALKOWSKI M., DEMARQUE D. & DELBECQUE S. (2011). — Les Collections du Musée d'Histoire Naturelle de Lille. VI. — La collection de minéralogie. *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2^e série, **18**: 55-64.
- PIVETEAU J. (1953). — *Traité de paléontologie*. Tome III : *Les Formes ultimes d'invertébrés, morphologie et évolution : Onychophores, Arthropodes, Echinodermes, Stomocordés*. Masson Editeur, Paris, 1064 p.
- PRUVOST P. (1911). — Note sur les entomostracés bivalves du terrain houiller du Nord de la France. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **40**: 60-80.
- PRUVOST P. (1914). — Découverte de *Leaia* dans le terrain houiller du Nord et du Pas-de-Calais. Observations sur le genre *Leaia* et ses différentes espèces. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **43**: 254-281.
- PRUVOST P. (1919). — *Introduction à l'étude du terrain houiller du Nord et du Pas-de-Calais : la faune continentale du terrain houiller du Nord de la France*. Thèse Fac. Sci. Univ. Lille, Doctorat ès Sciences Naturelles [1918]. Imprimerie Nationale, Paris, 2 vol. : 584 p., 29 pl.
- RAYMOND P. (1946). — The genera of fossil conchostracan order of bivalved crustacea. *Bulletin Museum Comparative Zoology*, Harvard College, **96**: 217-307.
- SHEN Y.B. & SCHRAM F.R. (2014). — Soft-body preservation in the leaiid clam shrimp (Branchiopoda, Diplostraca) and its palaeoecological implications. *Crustaceana*, **87**: 1338-1350.
- TASCH P. (1960). — Conchostracan genus *Anomalonema* in the American Pennsylvanian. *Journal of Paleontology*, **34** (2): 285-289.
- TASCH P. (1969). — Branchiopoda. In: MOORE, R.C. Ed., *Treatise on Invertebrate Paleontology*. Geological Society of America and University of Kansas, Part R., Arthropoda, **4** (1): R128-R191.
- TASCH P. (1987). — Fossil Conchostraca of the southern hemisphere and continental drift. *Geological Society of America Memoirs*, **165**: 1-290.
- THIEBAULT F. (2011). — *La géologie à la Faculté des Sciences de Lille de 1857 à 1970*. Association de Solidarité des Anciens – Université Lille 1 (ASA – USTL), Publications, Histoire de la Faculté des Sciences de Lille, Tome **8**: 29 p., 2 fig., 9 photos; World Wide Web address : http://asa.univ-lille.fr/publications/Tome8_geologie.pdf; fichier pdf 6,5 Mo.
- THIERRY J. (1995). — A l'aube du XXI^e siècle, TYFIPAL, une banque de données pour les collections paléontologiques en France. In: HARTENBERGER J.-L., GUILLET P. & MAIGRET J. dir.: La systématique et les musées : actes du séminaire «Les méthodes modernes en systématique dans les musées et dans les laboratoires : réalités et perspectives» (OCIM, Dijon, 6 et 7 avril 1994); World Wide Web address : <http://doc.ocim.fr/LO/LO038/LO.38%287%29-p.25-25.pdf>; fichier pdf.
- VANNIER J., THIERY P. & RACHEBOEUF R.P. (2003). — Spinicaudatans and ostracods (Crustacea) from the Montceau Lagerstätte (Late Carboniferous, France): morphology and palaeoenvironmental significance. *Palaeontology*, **46** (5): 999-1030.
- WATERLOT G. (1934). — *Première Thèse.— Etude de la Faune continentale du Terrain houiller sarro-lorrain*. Thèse, Faculté des Sciences, Université de Lille (21 déc. 1934), Imprimerie L. Danel, Lille: 317 p., 66 fig., 25 pl. [published as: Bassin Houiller de la Sarre et de la Lorraine. II. Faune fossile. Etude de la faune continentale du terrain houiller sarro-lorrain. *Etudes des Gîtes et Minéraux de la France*, Min. Trav. Publics, 1934].
- ZHANG W.T., CHEN P.J. & SHEN Y.B. (1976). — *Fossil Conchostraca of China*. Science Press, Beijing: 325 p.
- ZHANG W.T., SHEN Y.B. & NIU S. (1990). — Discovery of Jurassic conchostracans with well-preserved soft parts and notes on its biological significance. *Palaeontologia Cathayana*, **5**: 311-352.

ANNEX: SYSTEMATIC INDEX

<i>Anomalonema pruvosti</i> (RAYMOND, 1946)	p. 115	<i>Euestheria dawsoni</i> (JONES, 1870) PRUVOST, 1919	p. 113
<i>Anomalonema reumauxi</i> (PRUVOST, 1911) RAYMOND, 1946	p. 115	? <i>Euestheria simoni</i> (PRUVOST, 1911) PRUVOST, 1919	p. 114
<i>Cornia limbata</i> (GOLDENBERG, 1877) KOBAYASHI, 1954	p. 115	<i>Hemicycloleia baentschiana</i> (BEYRICH, 1864) RAYMOND, 1946	p. 113
<i>Estheria dawsoni</i> JONES, 1870	p. 113, 114, 115	<i>Hemicycloleia minima</i> (PRUVOST, 1914) RAYMOND, 1946	p. 113
<i>Estheria limbata</i> GOLDENBERG, 1877	p. 114, 115	<i>Leaia baentschi</i> BEYRICH, 1864	p. 113
<i>Estheria simoni</i> PRUVOST, 1911	p. 114	<i>Leaia leidyi</i> var. <i>baentschiana</i> BEYRICH, 1864	p. 113
<i>Estheria striata</i> MÜNSTER, 1826	p. 114, 115	<i>Leaia tricarinata</i> var. <i>minima</i> PRUVOST, 1914	p. 113
" <i>Estheria</i> " <i>rimosa</i> (GOLDENBERG, 1877)	p. 114	" <i>Lioestheria</i> " <i>striata</i> MÜNSTER in GOLDFUSS, 1826	p. 113
<i>Estheriella reumauxi</i> PRUVOST, 1911	p. 115	PRUVOST, 1919	p. 114

PALAEONTOLOGICAL COLLECTIONS OF LILLE UNIVERSITY – SCIENCES AND TECHNOLOGIES. II — DIPLOSTRACA (TYPES AND FIGURED SPECIMENS)

Collections paléontologiques de l'Université de Lille – Sciences et Technologies. II — Diplostraca (types et figurés)

by Jessie CUVELIER (*), Marie HENNION (**), Oscar GALLEGO (***) & Daniel VACHARD (****)

Abstract. – An exceptional collection of Diplostraca (Spinicaudata, Leaiina) from various geographic localities all around the world and from Devonian to Jurassic beds, is re-described in this catalogue. Despite some imperfections due to the geopolitical climate of the epoch (the Cold War), the great value of the Defretin's and Novozhilov's work is confirmed. New interpretations are provided about discussed taxa: *Estheriina*, *Pseudoasmussia*, *Taimyrites*, *Fernandoalmeidium*, *Pseudestheria*, and *Teixeirium*. Used as a reference work, this catalogue might permit these taxa to be reviewed in light of new methodologies and taxonomic schemes currently employed. Some species remain enigmatic, "*Estheria*" *destombesi*, "*Lioestheria*" *toricata*, "*Lioestheria*" *propinqua* and "*Pseudoasmussia*" *striata*, but offer a great possibility of revision by means of the data of this catalogue. The early record of Devonian-Carboniferous spinicaudatans in our collection is noteworthy, and provides important information on the early diversification of this group.

Résumé. – Une collection exceptionnelle de Diplostraca (Spinicaudata, Leaiina), provenant de nombreux gisements mondiaux et d'une période géologique s'étendant du Dévonien au Jurassique, est révisée dans ce catalogue. Le travail des deux chercheurs, S. Defretin et N. Novozhilov, ayant contribué à constituer cette collection durant une période difficile (la guerre froide), conserve sa pleine importance scientifique, moyennant quelques précisions que ce catalogue tente d'apporter. Notre compilation permet aussi d'alimenter les discussions actuelles sur plusieurs taxons : *Estheriina*, *Pseudoasmussia*, *Taimyrites*, *Fernandoalmeidium*, *Pseudestheria*, et *Teixeirium*. Notre travail devrait déboucher sur des révisions, fondées sur les méthodes modernes de la taxinomie, d'espèces encore incomplètement élucidées : "*Estheria*" *destombesi*, "*Lioestheria*" *toricata*, "*Lioestheria*" *propinqua* et "*Pseudoasmussia*" *striata*. Le point scientifique le plus intéressant, abordé dans ce catalogue, concerne l'ordre des Spinicaudata, que notre matériel permet de suivre depuis ses premières formes du Dévonien-Carbonifère.

Keywords. – Diplostraca, Conchostraca, Europe, Russia, Devonian, Jurassic.
Mots-clés. – Diplostraca, Conchostraca, Europe, Russie, Dévonien, Jurassique.

I. — INTRODUCTION

The palaeontological collection of the Lille University – Sciences and Technologies comprises 50,000 specimens, more than 3,000 of which are "types and figured" (Cuvelier *et al.*, 2011). In majority, they are represented by fossil plants and micropalaeontologic materials. The first catalogue devoted on to the Lille's collection described the eurypterids (Blieck *et al.*, 2013)⁽¹⁾. This second catalogue inventories the diplostracans (formerly conchostracans). The diplostracan material of Lille was mainly investigated by S. Defretin-Lefranc (Defretin, 1950a, 1950b, 1953; Defretin-Lefranc, 1963, 1965, 1970; Defretin & Fauvelet, 1951), who studied her first *Estheria* in 1948 under Professor Pruvost's guidance. She collaborated with the Russian specialist

N. Novozhilov (whose name was previously transliterated as Novojilov), and published a general synthesis (Defretin-Lefranc, 1965) about materials collected in the former USSR during the Cold War, and partly described by Novozhilov (1958a, b, c, d). The diplostracan material of Lille is represented by 95 types and figured specimens, the original labels of which indicated 22 holotypes, 4 neotypes, 1 syntype, 16 paratypes, 4 homotypes, 2 metatypes, and 46 figured specimens. The terms holotype, neotype or paratype are well known in taxonomy; the definitions of the less known terms, homotype and metatype, may be found for example in the Webster's Dictionary (Anonyme, 1971). Homotypes (or more exactly homeotypes) are specimens determined by a revisor author (i.e., plesiotypes) which strongly resemble the type material whereas

(*) Université de Lille – Sciences et Technologies, UFR Sciences de la Terre (SN5), UMR 8198 du CNRS Evo-Eco-Paléo, F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France); Jessie.Cuvelier@univ-lille1.fr

(**) Muséum National d'Histoire Naturelle – Département Biologie des Invertébrés marins et malacologie (BIMM), 55 rue Buffon, F-75005 Paris (France); marie.h2p@hotmail.fr

(***) Área Paleontología (Centro de Ecología Aplicada del Litoral, Centro Científico Tecnológico Nordeste, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas), Casilla de Correo 128, 3400 Corrientes (Argentina), and Geología Histórica-Micropaleontología (Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Universidad Nacional del Nordeste), Corrientes (Argentina); ofgallego@live.com.ar

(****) 1 rue des Tilleuls, F-59152 Gruson (France); Daniel.Vachard@free.fr

(¹) Since the publication Blieck *et al.* in 2013, University of Lille 1 became Lille University – Sciences and Technologies.

metatypes are homeotypes or topotypes more dissimilar to the type-material. Since five years, the first author (J.C.) compiles and presents the types and figured specimens of the Lille University on the French national database TransTyfipal. All the specimens described hereafter are available on the website <http://transtyfipal.u-bourgogne.fr/>, searching the following site: Order: “Diplostraca” / Establishment keeper: “Lille - Université Lille 1”.

II. — PRELIMINARY REMARKS

1) Abbreviations

The following abbreviations are used across this catalogue: USTL (Lille University – Sciences and Technologies; because, as formerly called Université des Sciences et Technologies de Lille, its acronym was USTL); Loc. (Locality); Lithos. (Lithostratigraphy); Biost. (Biostratigraphy); Chronost. (Chronostratigraphy); ill. (illustrated).

2) Editorial remarks

The principal lithostratigraphic, geographic and toponymic terms, traditionally used in the French coal basins, are translated as follows: *Assise* – Formation; “*Bowette*” – intersecting horizontal gallery; *Faisceau* – Member; *Passée* – parasequence; *Puits, fosse* – pit. We have transliterated the Russian names according to the current phonetic rules based on the English phonetics; e.g., Novozhilov for Novojilov or Nechaev for Netschajev. For practical reasons, we have kept the original numbering of the specimens of Russia (without prefix) while all other specimens were re-numbered with the prefix “USTL”.

3) Systematic classification of Diplostraca

The classification used in this catalogue was established by one of the authors (O.G.). It is based on an original synthesis of the work of Novozhilov (1958a, b, c, d), Defretin-Lefranc (1965, 1970), Tasch (1969, 1987), Chen & Shen (1985), Shen (1985), Jones & Chen (2000), and Martin & Davis (2001). The same classification was followed for the catalogue of Diplostraca of the Natural History Museum of Lille (Hennion *et al.*, this volume). Some of the catalogue specimens have not received clear systematic placements, because they lack the main diagnostic characters adopted in our classification. Similarly, in the absence of sufficient information, the status of some species treated in this catalogue has not been definitively fixed. All these taxa need further studies.

4) Stratigraphic and geographic distributions of specimens

As mentioned above, we have re-found 95 specimens of Diplostraca. They belong to 40 species. More than half of these specimens (61) come from Russia; 25 other specimens come from different regions of France (Nord – Pas-de-Calais, 9; Languedoc–Roussillon, 5; Lorraine, 4; Alsace, 2; Franche-Comté, 2; Rhône–Alpes, 2; and Centre, 1); 4 from Germany; 4 from Morocco, and 1 from Switzerland. Furthermore, these 95 diplostracan specimens are stratigraphically distributed from the Devonian to the Jurassic (Devonian, 2; Carboniferous, 11; Permian, 36; Triassic, 33; Jurassic, 13).

III. — SYSTEMATIC CATALOGUE

Authors of taxon names are indicated in small capital letters followed by year of authorship. The corresponding bibliographical references are not listed here in the bibliography section; they can be found in the papers of Novozhilov (1958a, b, c, d), Defretin-Lefranc (1965, 1970), Tasch (1969, 1987), Chen & Shen (1985), Jones & Chen (2000), and Martin & Davis (2001). All other cited papers are in the bibliography section.

Phylum ARTHROPODA VON SIEBOLD, 1848
 Subphylum CRUSTACEA BRÜNNICH, 1772
 Class BRANCHIOPODA LATREILLE, 1817
 Subclass PHYLLOPODA PREUSS, 1951
 Order DIPLOSTRACA GERSTAECKER, 1866
 Suborder SPINICAUDATA LINDER, 1945
 Superfamily VERTEXIOIDEA KOBAYASHI, 1954
 (*sensu* ZHANG *ET AL.*, 1976)
 Family PALAEOLIMNADIIDAE TASCH, 1956
 Subfamily ESTHERIININAE KOBAYASHI, 1954
 Genus *ESTHERIINA* JONES, 1897

Preliminary comments. (1) For a detailed analysis and discussion of the family Palaeolimnadiidae, see Astrop & Hegna (2015). (2) Estheriini are part of a complex group of diplostracans having a strong convex umbonal region. This particularity involves a relationship with the Lioestherioidea (*sensu* Holub & Kozur, 1981); nevertheless, the estheriini received various systematic assignments. The placement of *Estheriina* in the family Palaeolimnadiidae is admitted here, in agreement with Kobayashi (1954) and Tasch (1969, 1987); nevertheless, Chen & Shen (1985) included this genus in the family Euestheriidae, because they inferred the presence of a reticular ornamentation. However, we concede that this group needs a thorough revision because, even if the type species *Estheriina bresiliensis* Jones, 1897 shows a punctate ornamentation between the growth bands, the convex umbonal area is known in other families or superfamilies.

Estheriina bethunensis (DEFRETIN, 1953)

USTL 1064: Left and right valves (Syntype of *Estheria* (*Estheriina*) *bethunensis* Defretin, 1953, pl. X, figs. 1-6).

Loc.: Roof of the parasequence encountered at the depth -530 m, Pit 5bis, Concession of Bully, Group of Béthune (Pas-de-Calais, France).

Lithost.: Probably sampled at the base of the Six-Sillons Member (see Hennion *et al.*, this volume).

Chronost.: Carboniferous, Westphalian (now Moscovian).

Remarks. The counterprint of the *Estheriina bethunensis* type (fig. 2 of Defretin, 1953) was not re-found in the course of our investigation.

Comments. Apparently, the combination *Estheria* (*Estheriina*) was proposed by Defretin (1953), because she mentioned that, after the description of Jones (1897), no species were described, and that this latter author did not provide any justifications. We agree with this assignment to *Estheriina bethunensis*, but we cannot provide additional systematic comments, due to the absence of ornamentation characters. The binomen is validly published here for the first time (see also below the comments about the use of the name “*Estheria*”).

Genus *PALAEOLIMNADIA* RAYMOND, 1946
? *Palaeolimnadia rogeri* NOVOZHILOV, 1958b

401-21: Left valve (holotype of *Eulimnadia rogeri* Novozhilov, 1958b, pl. IV, fig. 59).
Loc.: Littoral of Laptev Sea, Tigian river, core of borehole K-202, depth 372.5-375.7 m (Arctic regions of Russia).
Chronost.: Middle Triassic, Anisian or Carnian? (Novozhilov, 1958b, p. 17, 52).
Comments. According to Gallego (2010) and Astrop & Hegna (2015), the Novozhilov's original assignment of this fossil species to an extant genus is to revise. Also the present assignment to the fossil family and genus is tentative.

Family PALAEOLIMNADIOPSIDAE DEFRETIN-LEFRANC, 1965

Preliminary comments. Astrop & Hegna (2015) indicated that this family was initially recorded from the Devonian of Russia and based on the presence of a curvature in the postero-dorsal angle of the carapace, even if this character only appears in the last growth stages. Such a character is however mentioned in extant and fossil taxa having different hierarchical taxonomic levels, e.g., *Leaia*, *Limnadiopsis* and *Leptestheria*. Hence, Astrop & Hegna (2015, p. 8) suggest that "... [due to] the presence of this character in multiple lineages, it seems unwise that this feature alone should be used to sustain an entire family". We believe that this hypothesis needs to be examined thoroughly, as well as other proposals of Astrop & Hegna (2015) about this family.

Subfamily PALAEOLIMNADIOPSINAE DEFRETIN-LEFRANC,
1965 (*sensu* SHEN, 1985)
Genus *PALAEOLIMNADIOPSIS* RAYMOND, 1946
Palaeolimnadiopsis brevis NOVOZHILOV, 1958a

1126-6: Right valve (holotype of *Palaeolimnadiopsis brevis* Novozhilov, 1958a, pl. I, fig. 12).
Loc.: Right bank of Vetluga (which is a right bank tributary of Volga River); upper part of rapids between Spass and Kostliv villages (High-Volga Basin, Russia).
Lithost.: Spasskien Member (= Vetlugian 4).
Chronost.: Early Triassic, Vetlugian (i.e., a continental regional stage equivalent of Induan-Olenekian).

Palaeolimnadiopsis kouznetskensis DEFRETIN-LEFRANC, 1965

950-54/5: Right valve (ill. as *Palaeolimnadiopsis albertii* Voltz, 1837 in Novozhilov, 1958a, pl. I, fig. 10; paratype of *Palaeolimnadiopsis kouznetskensis* Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 2).
Loc.: Right bank of Tom river, 0.5 km upstream for Babii Kamen (western Siberia, Russia).
Lithost.: Maltsevo Group.
Chronost.: Early Triassic, upper zone.

1126-4: Left valve (ill. as *Palaeolimnadiopsis albertii* Voltz, 1837 in Novozhilov 1958a, pl. I, fig. 9; paratype of *Palaeolimnadiopsis kouznetskensis* Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 1).
Locality, lithost., chronost.: As for the specimen 1126-6.

Genus *BELGOLIMNADIOPSIS* NOVOZHILOV, 1958a
Belgolimnadiopsis stockmansi (MAILLIEUX, 1939)
emend. NOVOZHILOV, 1958a

USTL 1065: Right valve (ill. as *Estheria stockmansi* Maillieux, 1939 in Defretin, 1950a, pl. I, fig. 7).
Loc.: Vincly (Pas-de-Calais, France).
Lithost.: Matringhem Sandstone.
Biostr. and chronost.: "Fish beds" – *Rhinopteraspis dunensis* biozone, Pragian-Emsian (Early Devonian) according to Blicek & Janvier (1989).

USTL 1066: Left valve (ill. as *Estheria stockmansi* Maillieux, 1939 in Defretin, 1950a, pl. I, fig. 6).
Loc., lithost., biostr., chronost.: As for the specimen USTL 1065.
Comments. Being one of the oldest taxa of this group, this species informs about the origin and diversification of the Spinicaudata.

Genus *ROSSOLIMNADIOPSIS* NOVOZHILOV, 1958a
Rossolimnadiopsis marlierei NOVOZHILOV, 1958a

1106-3: Left valve (holotype of *Rossolimnadiopsis marlierei* Novozhilov, 1958a, pl. I, fig. 1).
Loc.: Vyazniki town (Vladimir oblast, Russia).
Chronost.: Late Permian, Kazanian (now Middle Permian, and probably Wordian).
Comments. Another interesting species informing about the early diversification of Spinicaudata.

Subfamily ASIOLIMNADIOPSEINAE LIU, 1982
Genus *ENDOLIMNADIOPSIS* SHEN, 1985
Endolimnadiopsis eichwaldi (NECHAEV, 1894) emend. SHEN, 1985

818-7: Right valve (homotype of *Palaeolimnadiopsis eichwaldi* (Nechaev, 1894) in Novozhilov, 1958a, pl. I, fig. 8).
Loc.: Tatarstan, Kitiak river, near Akbatyrov village (Volga region, Russia).
Chronost.: Late Permian, Kazanian (now Middle Permian, Wordian).
Comments. This is the type species of a genus which is also recorded from the Late Triassic strata from Argentina with *Endolimnadiopsis rusconi* (Gallego, 2005).

Subfamily ANOMALONEMATINAE NOVOZHILOV, 1958d
Genus *ANOMALONEMA* RAYMOND, 1946
Anomalonema reumauxi (PRUVOST, 1911)
Fig. 1A

USTL 1336: Right valve (Defretin-Lefranc, 1970, pl. XIII, fig. 8).
Loc.: Northern "bowette" 4 at the depth 754 m, distance 170 m, Concession of Crespin, Group of Valenciennes (Nord, France).
Lithost.: Bruay Formation.
Chronost.: Carboniferous, Westphalian C (now late Moscovian).
Comments. Due to its particular morphology and restricted stratigraphic distribution, this interesting species constitutes an excellent fossil guide of the Westphalian C-D *Anomalonema reumauxi-Pseudestheria simoni* Assemblage-Zone (Schneider *et al.*, 2005).

Family IPSILONIIDAE NOVOZHILOV, 1958a
Genus *KERATESTHERIA* CHERNYSHEV, 1948

Preliminary comments. According to Y.B. Shen (pers. comm., 2015) “*Keratestheria* is very much similar to *Nestoria* in the stout and prominent growth lines and broad growth bands ornamented with large hexagonal reticulation, except for spine-type projections in the different position along the dorsal margin. *Keratestheria* possibly is an aberrant form of the *Nestoria*. So it should be attributed to *Nestoriidae* rather than *Ipsiloniidae*”. Taking into account this situation and the consideration brings on such matter by Astrop and Hegna (2015), we consider to maintain the original assignation to prevent further systematic confusions. On the other hand, this important fossil marker for the Jurassic-Cretaceous from Asia, is an important component of the Kimmeridgian *Nestoria-Keratestheria* fauna (Chen *et al.*, 2007).

Keratestheria bukaczacziensis CHERNYSHEV, 1948

903-19: Left valve (Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 21; Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 6).

Loc.: Rossyp rapids, right bank of Kuenga river, left bank tributary of Shilka river, itself tributary of Amur River, in front of the Utany village, Chita area (Transbaikalia, Russia).

Chronost.: Middle Jurassic.

903-25: Right valve (neotype of *Keratestheria bukaczacziensis* Chernyshev, 1948 in Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 19; Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 5).

Loc., chronost.: As for the specimen 903-19.

903-31: Right valve (homotype of *Keratestheria bukaczacziensis* Chernyshev, 1948 in Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 20).

Loc., chronost.: As for the specimen 903-19.

Comments. As already suggested by Novozhilov (1958a) and Defretin-Lefranc (1965), the three specimens assigned to *Keratestheria bukaczacziensis* have no preserved “winglike” process (*sensu* Astrop & Hegna, 2015).

Keratestheria magna CHERNYSHEV, 1948
Fig. 1B-C

903-21: Right valve (neotype of *Keratestheria magna* Chernyshev, 1948 in Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 16).

Loc., chronost.: As for the specimen 903-19.

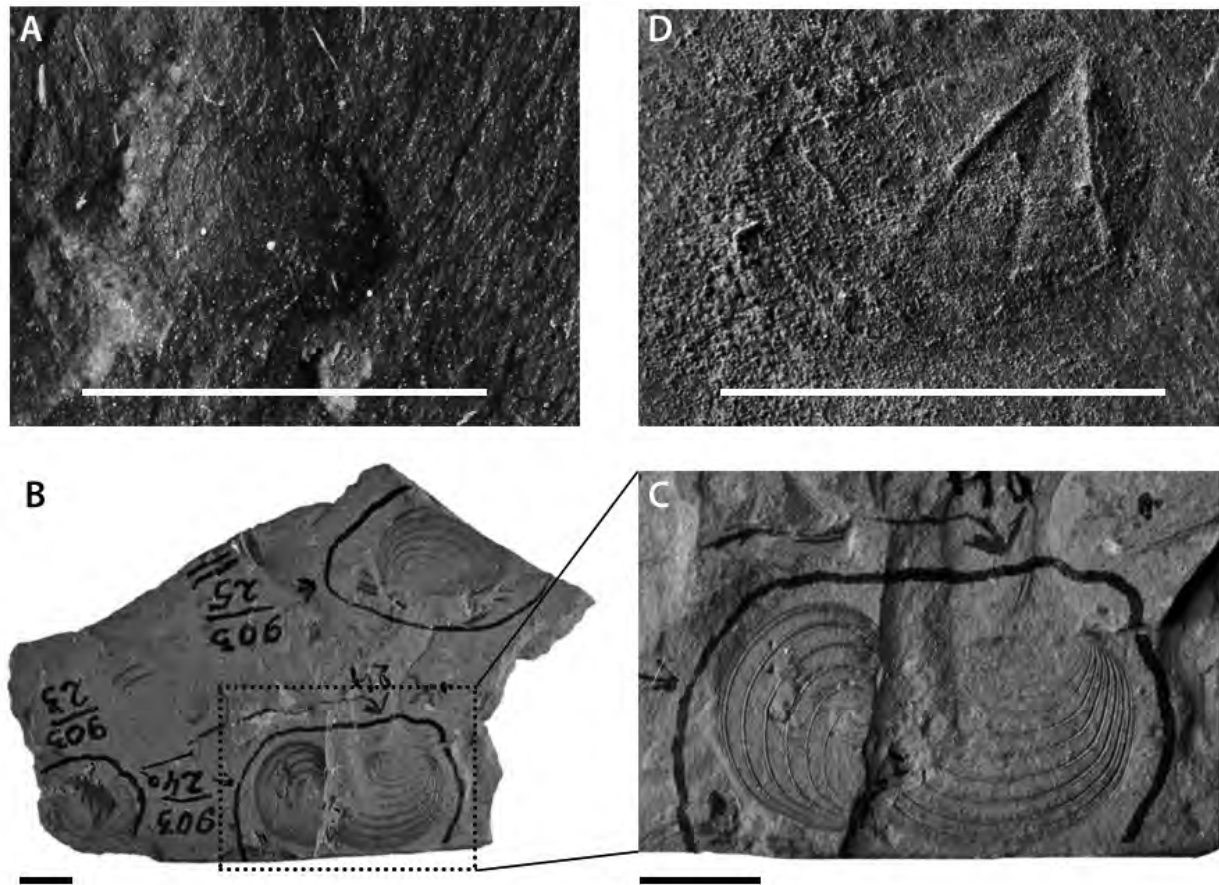


Fig. 1. — A- *Anomalonema reumauxi*, specimen USTL 1336, Westphalian; B-C- *Keratestheria magna* and *Keratestheria rugosa*, specimen 903-24, Middle Jurassic; D- *Hemicycloleaia baentschiana*, specimen USTL 1094, Lower Stephanian. Scale bar represents 5 mm.

Fig. 1. — A- *Anomalonema reumauxi*, spécimen USTL 1336, Westphalien; B-C- *Keratestheria magna* et *Keratestheria rugosa*, spécimen 903-24, Jurassique moyen ; D- *Hemicycloleaia baentschiana*, spécimen USTL 1094, Stéphanien inférieur. L'échelle représente 5 mm.

903-24a: Right valve (paratype of *Keratesthesia magna* Chernyshev, 1948 in Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 7).

Loc., chronost.: As for the specimen 903-19.

903-32: Left valve (homotype of *Keratesthesia magna* Chernyshev, 1948 in Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 17).

Loc., chronost.: As for the specimen 903-19.

Comments. The specimen 903-32 is very difficult to compare with the other representatives of this species.

Keratesthesia rugosa CHERNYSHEV, 1948

903-24: Right valve (ill. as *Keratesthesia magna* Chernyshev, 1948 in Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 18; Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 7).

Loc., chronost.: As for the specimen 903-19.

Remarks. This specimen was identified by Novozhilov (1958a) as *Keratesthesia magna*; in contrast, Defretin-Lefranc (1965) assigned the illustrated specimen to *K. rugosa* (but not listed in the synonymy list), and the other specimen, located just to the left, to *K. magna*. Due to this initial discrepancy, both species remain hard to discriminate (Fig. 1B-C).

903-30: Left valve (holotype of *Keratesthesia kusumii* Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 23; Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 4).

Loc., chronost.: As for the specimen 903-19.

903-32a: Left valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 3).

Loc., chronost.: As for the specimen 903-19.

903-33: Left valve (homotype of *Keratesthesia rugosa* Chernyshev, 1948 in Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 14).

Loc., chronost.: As for the specimen 903-19.

903-35: Left valve (neotype of *Keratesthesia rugosa* Chernyshev, 1948 in Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 15).

Loc., chronost.: As for the specimen 903-19.

903-34: Left valve (neotype of *Keratesthesia tumida* Chernyshev, 1948 in Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 22).

Loc., chronost.: As for the specimen 903-19.

Comments. The specimen 903-33 is very difficult to compare with the other specimens of this species. Defretin-Lefranc (1965) suggested the specimen 903-34 as a synonym of *K. rugosa*. We agree with this proposal based on the similar morphology of the antero-dorsal recurvature.

Family LIOESTHERIIDAE RAYMOND, 1946 emend. HOLUB & KOZUR, 1981

Subfamily VERTEXIIDAE KOBAYASHI, 1954

Genus *CORNIA* LYUTKEVICH, 1937

Cornia sibirica (NOVOZHILOV, 1958a) emend. DEFRETIN-LEFRANC, 1965

950-17/18: Right valves (paratype of *Gabonestheria sibirica* Novozhilov, 1958a, pl. II, figs. 31-32; Defretin-Lefranc, 1965, pl. II, fig. 9).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 950-54/5 (see p. 121).

950-19: Right valve (paratype of *Gabonestheria sibirica* Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 33).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 950-54/5.

950-21: Left valve (holotype of *Gabonestheria sibirica* Novozhilov, 1958a, pl. II, fig. 30; Defretin-Lefranc, 1965, pl. II, fig. 10).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 950-54/5.

950-21b: Right valve (paratype of *Cornia sibirica* Novozhilov, 1958 in Defretin-Lefranc, 1965, pl. II, fig. 8).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 950-54/5.

Comments. For a detailed discussion on the genus assignment of this species, see Defretin-Lefranc (1965), but briefly we can note that she argued against and finally rejected the erection of the genus *Gabonestheria* Novozhilov (1958a). This proposal is to revise, taking into account that this genus is considered valid by different authors as Tasch (1969, 1987) and Chen & Shen (1985).

Superfamily EOESTHERIOIDEA ZHANG & CHEN, 1976 IN ZHANG *et al.*, 1976

Family ULUGKEMIIDAE NOVOZHILOV, 1958

Genus *ULUGKEMIA* NOVOZHILOV, 1955

Ulugkemia borisi NOVOZHILOV, 1959

1342c-120: Left valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. I, fig. 10).

Loc.: Left bank of Kitiak stream right bank tributary of Viatka river, itself tributary of Volga River, near the Bolchoi Kitiak village, Malmyzh district, Kirov province (High-Volga Basin, Russia).

Lithost.: Belebei Formation.

Biostr.: Lower beds with conchostracans and insects.

Chronost.: Late Permian, Kazanian (now Middle Permian, Wordian).

1342c-121/1: Left valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. I, fig. 11).

Loc., lithost., biostrat., chronost.: As for the specimen 1342c-120.

1342c-134: Right valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. I, fig. 9).

Loc., lithost., biostrat., chronost.: As for the specimen 1342c-120.

Family EUESTHERIIDAE DEFRETIN-LEFRANC, 1965

Genus indet.

“Estheria” destombesi DEFRETIN, 1950b

Preliminary comments. For this species, we retain the original designation of Defretin (1950b) and agree with her arguments implying an absence of ornamentation, which consequently prevents the assignment to any other known genera. Definitely, *“Estheria”* cannot be used as a genus of diplostracans because it is homonym and pre-occupied by the insect (parasite flies) name *Estheria* Robineau-Desvoidy, 1830 (see Raymond, 1946 and Gallego, 2010).

USTL 1073: Right valve (paratype of *Estheria destombesi* Defretin, 1950b, pl. IX, fig. 2).

Loc.: Saint-Menge, mine waste (Vosges, France).

Chronost.: Triassic.

USTL 1076: Left valve (paratype of *Estheria destombesi* Defretin, 1950b, pl. IX, fig. 4).

Loc., chronost.: As for the specimen USTL 1073.

USTL 1078: Right valve (paratype of *Estheria destombesi* Defretin, 1950b, pl. IX, figs. 5-6).

Loc.: Borehole of Lacoste, depth 155 m (Gard, France).

Chronost.: Triassic, Middle Keuper.

USTL 1079: Left valve of a juvenile specimen (holotype of *Estheria destombesi* Defretin, 1950b, pl. IX, fig. 7; Defretin-Lefranc, 1963, pl. I, fig. 16).

Loc., chronost.: As for the specimen USTL 1078.

USTL 1089: Right valve (Defretin & Fauvelet, 1951, pl. I, fig. 6).

Loc.: Argana-Bigoudine area (western High-Atlas, Morocco).

Lithost.: Ait Khtab Group (Ait Khtab is now written Ait Khattab).

Chronost.: Triassic.

USTL 1090: Right valve (Defretin & Fauvelet, 1951, pl. I, fig. 5).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen USTL 1089.

Genus indet.

“*Lioestheria*” *toricata* (NOVOZHILOV, 1946)

401-47: Left valve (holotype of *Lioestheria toricata* (Novozhilov, 1946) in Novozhilov, 1958b, pl. III, fig. 28).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

Comments. Novozhilov (1958b) included this species in *Lioestheria*, because of its alveolar ornamentation. However, the current ideas on the lioestheriid taxonomy lead us to doubt this genus assignment.

“*Lioestheria*” *propinqua* NOVOZHILOV, 1958b

400-9: Right valve (holotype of *Lioestheria propinqua* Novozhilov, 1958b, pl. III, fig. 29).

Loc., chronost.: As for the specimen 400-4 (see p. 126).

Comments. See above.

Genus *EUESTHERIA* DÉPERET & MAZERAN, 1912

Euestheria bourozi DEFRETIN-LEFRANC, 1970

Preliminary comments. Defretin-Lefranc (1970, p. 125) mentioned that the reticular ornamentation is conformed by areola having 0.05 mm in diameter; therefore, we think that this species belongs to the family Loxomegaglyptidae.

USTL 1337: Left valve (holotype of *Euestheria bourozi* Defretin-Lefranc, 1970, pl. XIII, fig. 4).

Loc.: Borehole 23 at the depth 650.22 m, Pit 6 South, Concession of Courrières, Group of Hénin-Liétard (Pas-de-Calais, France).

Lithost.: Bruay Formation, Six-Sillons Member.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian C (now late Moscovian).

Euestheria evenkiensis (LYUTKEVICH, 1938)

Preliminary comments. This species was originally designated by Lyutkevich (1938) as “*Estheria*” *evenkiensis*, and subsequently emplaced in the genus *Lioestheria* by Novozhilov (1958b), or *Palaeestheria* by Defretin-Lefranc (1965). According to Raymond (1946), *Palaeestheria* was never validly described, even if it was mentioned in several publications (e.g., Daday de Déés, 1914; Barnard, 1929; Rennie, 1934). Daday de Déés (1914) suggested to use preferentially the names *Palaeestheria* and Palaeestheriidae for the fossil *Estheria* (spinicaudatans), and to restrict the name *Estheria* (see

comments on “*Estheria*” *destombesi* below) to modern species; however, neither particular species nor genotype were formally designed by Daday de Déés (1914). Raymond (1946) regarded *Palaeestheria* as a *nomen nudum*. Despite this, Barnard (1929) had used this genus, and described five species, *P. anomala* Barnard, *P. draperi* Barnard, *P. greyi* Barnard and two innominate species, from different localities and stratigraphic levels; but again no genus diagnosis was provided by Barnard. That is probably why Raymond (1946) proposed to attribute the genus to Barnard and Daday de Déés. Meanwhile, Rennie (1934) described (but still without any diagnosis) and illustrated a poorly preserved Devonian-Carboniferous species that he named according to Daday de Déés (1914) as *Palaeestheria* sp.. Consequently, Raymond (1946) proposed *Palaeestheria anomala* as type species, and introduced the following genus diagnosis: “*Carapace oval, umbonal region smooth, the remainder bearing numerous narrow, sharp costellae, between which there is no ornament.*” Raymond explained also that: “*This genus is in many respects similar to Pseudestheria, but differs in having more numerous and more close-set costellae, and particularly in having a larger smooth area at the umbo.*” Defretin-Lefranc (1967) described the species, and emphasized the presence of a rounded or elongate tubercle in the umbonal area. Then, Busnardo (1969) described four Late Triassic species from Spain and accurately revised and discussed the genus diagnosis. He noticed also that Novozhilov (1960) omitted the genus in his work, probably because he previously synonymized it with *Ovjurium* Novozhilov & Varentsov (1956). On the other hand, Kobayashi (1954) synonymized it with *Lioestheria*, because of its smooth umbonal area. Furthermore, due to the presence of a tubercle (*sensu* Defretin-Lefranc, 1967), Chen & Shen (1985, p. 70) included this genus (erroneously written as *Palaeoestheria*) in the family Palaeolimnadiidae. Contrary to these interpretations, Tasch (1969, 1987) did not agree with the large smooth or even nodal structures of the umbonal area and transferred all the species of *Palaeestheria* to the genus *Cyzicium* and subgenus *Euestheria* or *Lioestheria*. Kozur & Weems (2007) highlighted the taxonomic incongruence of this proposal, since *Euestheria* Depéret & Mazeran, 1912 being the junior synonym of *Palaeestheria* Barnard, 1929, *Euestheria* is necessarily the priority name of the taxon. In this paper, we included *E. evenkiensis* in *Euestheria*, due to 1) the reticular ornamentation (Defretin-Lefranc, 1965), 2) the absence of a node in the umbonal area (this latter is present in *Lioestheria sensu* Kozur *et al.*, 1981), and 3) the absence of a smooth umbonal region (as in *Palaeestheria* Barnard *sensu* Raymond, 1946).

815-25/1: Right valve (ill. as *Palaeestheria evenkiensis* Novozhilov, 1958b in Defretin-Lefranc, 1965, pl. I, fig. 2).

Loc.: Right bank of Lower Tunguska River, left bank tributary of Yenisey River, 271 km downstream from the confluence of the Ilimpeia River or 6 km upstream from the confluence of the Khovorkili River (Central Siberia, Russia).

Lithost.: Khovorkili Zone = Tatarian 4 Zone.

Chronost.: Late Permian, late Tatarian (now Changhsingian).

815-25/2: Right valve (holotype of *Palaeestheria evenkiensis* Novozhilov, 1958b in Defretin-Lefranc, 1965, pl. I, fig. 1).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 815-25/1.

Remarks. There is a *lapsus calami* in the original publication; the holotype has not the number 915, valve n°25-2 as written, but the number 815, valve n°25-2.

Euestheria minuta (VON ZIETEN, 1833) RAYMOND, 1946

USTL 1072: Right valves (ill. as *Estheria minuta* Alberti in von Zieten, 1833 in Defretin, 1950b, pl. VIII, fig. 5).

Loc.: Lacoste borehole, 149 m depth (Gard, France).

Chronost.: Late Triassic, Middle Keuper.

USTL 1074: Fragments of shell (ill. as *Estheria minuta* Alberti in von Zieten, 1833 in Defretin, 1950b, pl. VIII, fig. 6).

Loc.: Lacoste borehole, 156 m depth (Gard, France).

Chronost.: Late Triassic, Middle Keuper.

USTL 1075: Right valve (ill. as *Estheria minuta* Alberti in von Zieten, 1833 in Defretin, 1950b, pl. VIII, fig. 3).

Loc.: Vouhenans; x = 406.15, y = 96.1 (Haute-Saône, France).

Chronost.: Late Triassic, Middle Keuper.

USTL 1077: Left valve (ill. as *Estheria minuta* Alberti in von Zieten, 1833 in Defretin, 1950b, pl. VIII, fig. 2; Defretin-Lefranc, 1963, pl. I, fig. 14).

Loc., chronost.: As for the specimen USTL 1073 (see p. 123).

USTL 1079: Left valve (ill. as *Estheria minuta* Alberti in von Zieten, 1833 in Defretin, 1950b, pl. IX, fig. 1).

Loc., chronost.: As for the specimen USTL 1078 (see p. 123).

USTL 1081: Left valve (ill. as *Estheria minuta* Alberti in von Zieten, 1833 in Defretin, 1950b, pl. VIII, fig. 1).

Loc.: Gemmelaincourt mine, borehole near the Cracco pit, x = 369.12, y = 166.51 (Vosges, France).

Chronost.: Late Triassic, Middle Keuper.

USTL 1082: Group of valves (ill. as *Estheria minuta* Alberti in von Zieten, 1833 in Defretin, 1950b, pl. VIII, fig. 4).

Loc.: Conliège borehole, depth 371.4 m (Jura, France).

Chronost.: Triassic.

USTL 1085: Right and left valves (ill. as *Estheria minuta* Alberti in von Zieten, 1833 in Defretin-Lefranc, 1963, pl. I, fig. 15).

Loc.: Bex (Switzerland).

Chronost.: Triassic.

USTL 1087: Right valve (ill. as *Estheria minuta* Alberti in von Zieten, 1833 in Defretin-Lefranc, 1963, pl. I, fig. 12).

Loc.: Pechelbronn, borehole 4617, depth 1515-1516 m (Bas-Rhin, France).

Lithost.: Keuper, bed Ku 2.

Chronost.: Late Triassic.

Remarks. This other misinterpreted specimen comes in reality from the depth 1515-1516 m, as written in the legend and on the label associated with the specimen, and not from 1915-1916 m as written in the publication.

USTL 1088: Group of valves (ill. as *Estheria minuta* Alberti in von Zieten, 1833 in Defretin & Fauvelet, 1951, pl. I, figs. 1-2).

Loc.: Argana-Bigoudine area, borehole 14 (western High-Atlas, Morocco).

Lithost.: Bed A2.

Chronost.: Triassic.

USTL 1090: Left and right valves (ill. as *Estheria minuta* Alberti in von Zieten, 1833 in Defretin & Fauvelet, 1951, pl. I, figs. 3-4).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen USTL 1089 (see p. 124).

Comments. This species displays large variations in morphology and outline, probably related to geographic and stratigraphic varieties; the Lille's collection will permit a detailed population analysis. Due to its restricted stratigraphic distribution (Middle to Late Triassic) and cosmopolitanism, this species is an interesting palaeontologic tool.

Euestheria ricouri (DEFRETIN, 1950b)

USTL 1080: Left valve (holotype of *Estheria ricouri* Defretin, 1950b, pl. IX, fig. 8).

Loc.: Montgivray (Indre, France).

Chronost.: Early Jurassic, Hettangian.

Comments. Defretin (1950b) assigned this species to the genus and subgenus *Estheria* (*Euestheria*) *ricouri*. We modified the binomen, since we consider now *Euestheria* as a genus, based on the revised spinicaudatan taxonomy. Defretin (1950b) compared *Euestheria ricouri* with *E. brodieana* Jones. This latter species was interpreted by Kozur & Weems (2010) as a Rhaetian (latest Triassic) fossil guide in Germany and the USA, even if it subsists up to the early Hettangian (earliest Jurassic) in the USA.

Euestheria simoni (PRUVOST, 1911) PRUVOST, 1919

USTL 1338: Right valve (ill. as *Cycladestheria simoni* (Pruvost, 1911) in Defretin-Lefranc, 1970, pl. XIII, fig. 3).

Loc.: Borehole 11F, depth 136.75 m, Douai Group (Nord, France).

Lithost.: Bruay Formation.

Chronost.: Carboniferous, Westphalian C (now late Moscovian).

Comments. This species is assigned to *Euestheria* taking into account the synonymy of Defretin-Lefranc (1970) who mentioned that Feys (1953) designated this species as *Estheria* (*Euestheria*) *simoni*. Defretin-Lefranc (1970) described also a reticular ornamentation measuring 0.02 to 0.05 mm. The validity of the genus *Cycladestheria* Defretin-Lefranc, 1970 will be analyzed in the future with detailed population studies. Finally, we consider that this species, which possibly belongs to Loxomegaglyptidae, needs a detailed revision. *E. simoni* is an important biostratigraphic species, being characteristic of the Westphalian C-D *Anomalonema reumauxi-Pseudestheria simoni* Assemblage-Zone (Schneider *et al.*, 2005).

Family LOXOMEGAGLYPTIDAE NOVOZHILOV, 1958d

Preliminary comments. This family was defined by Zhang *et al.* (1976) and Astrop & Hegna (2015) as follows: "Growth bands wide and flat with large, irregular 'mesh' ornament, the walls of which are shallow and thin. Ornament elongates transversely with ontogeny. (...) Generally with cycliciform-cycladiform carapace shapes". Notwithstanding, a more detailed diagnosis was published later by Chen & Shen (1982) as: "Carapace valve elliptical to obliquely oval in outline; growth band broad and flattened, few in number, ornamented with variant moderate to large reticulations or caverns; each mesh 0.02-0.2 mm in size".

Genus LAXITEXTELLA KOZUR, 1982

Preliminary comments. The genus *Laxitextella* Kozur, according to Kozur & Weems (2007, 2010), comprises forms with ornamentation ranging from reticulate, polygonal to elongate parallel to the growth lines patterns. This genus was placed by Chen & Shen (1985) in the Eosestherioidea Loxomegaglyptidae, while Kozur & Weems (2005) included

it in their new family Shipingiidae composed of *Shipingia* Shen, *Anyuanestheria* Zhang & Chen, *Laxitextella* Kozur and *Redondestheria* Kozur, Weems & Lucas. These Shipingiidae were found in China, Germany and along the United States East Coast (in the Newark Supergroup). According to Kozur & Weems (2005), the Loxomegalyptidae differ from the Shipingiidae by their small dimensions and their umbo located at middle of the dorsal margin. Moreover, the Loxomegalyptidae are Early Triassic in age, whereas the Shipingiidae are Late Triassic. Kozur & Weems (2005) did not mention the systematic placement of Shipingiidae within a pre-existing superfamily; in our opinion, the Shipingiidae encompass some spinicaudatans with different fundamental morphologic features, as the genus *Laxitextella* Kozur, that lacks the radial lirae in the ventral growth bands (see Kozur & Weems, 2005).

Laxitextella laxitexta (JONES, 1878) emend. KOZUR, 1982

USTL 1083: Left valve (ill. as *Estheria laxitexta* (Jones, 1878) in Defretin-Lefranc, 1963, pl. I, fig. 11).

Loc.: Saint-Lattier, borehole S.P.V. 2734 (Isère, France).

Chronost.: Triassic.

USTL 1084: Right and left valves (ill. as *Estheria laxitexta* (Jones, 1878) in Defretin-Lefranc, 1963, pl. I, figs. 8-9).

Loc.: Pechelbronn, borehole 4653, depth 837 m (Bas-Rhin, France).

Lithost.: Bed assigned to the Lettenkohle (unit Ku 1).

Chronost.: Triassic.

USTL 1086: Group of valves (ill. as *Estheria laxitexta* (Jones, 1878) in Defretin-Lefranc, 1963, pl. I, fig. 10).

Loc., chronost.: As for the specimen USTL 1083.

Comments. Evolutionarily and biostratigraphically, this species is important, because 1) it is a clue species to clarify the relationship between the Euestheriidae, Loxomegalyptidae and Shipingiidae and 2) it is an important component of the Carnian *Gregoriusella fimbriata*–*Laxitextella laxitexta* Zone (Kozur & Weems, 2010).

Family ORTHOTHEMOSIIDAE DEFRETIN-LEFRANC, 1965

Preliminary comments. Astrop & Hegna (2015), based on Defretin-Lefranc (1965), defined this family as follows: “*Valves are relatively short and the ventral anterior and posterior edges regularly rounded. The umbo is approximately 2/5 of the hinge. Ornamentation punctuated or smooth*”. These authors add that they are “*Cycladiform-telliniform in shape*”, and discuss that “*Defretin-Lefranc (1965) erected Orthothemosiinae with the above diagnosis. Zhang et al. (1976), and Chen and Shen (1985) elevated it to family rank. It is not very diverse and, like Aquilonoglyptidae discussed above, may ultimately be more fruitfully considered a part of the euestheriids.*” Defretin-Lefranc (1965) and Tasch (1987) interpreted Orthothemosiinae at the subfamily level, and included it in the family Asmusiidae (see next comments; and those about the genus *Glyptoasmussia*, below). The family Asmusiidae is a particularly controversial taxon, which is defined by its straight long dorsal margin and its strong angles at both ends and subcentral umbo. The diagnosis (Kobayashi, 1954 emended by Tasch, 1969) mentioned an ornamentation ranging from smooth, punctuate, with radial lirae, to alveolar. Chen & Shen (1985) assigned this family to the superfamily Estheriteoidea, due to its radial ornamentation. Nevertheless, Raymond (1946) mentioned that the type genus (*Asmusia*) and its type species (*A. membranacea* Pacht) both display a reticulate ornamentation. Defretin (1950a)

described this species with a striated ornamentation. Astrop & Hegna (2015) thinks to a translation of the emended diagnosis of Zhang *et al.* (1976), stated that this species has: “*Growth lines adorned with fine fiber-like ornament (described as ‘hachure’ by Tasch (1969))*” and added the following diagnostic criterion: “*Cyziciform in carapace shape, often with umbo situated in the center of the dorsal margin*”.

Genus *GLYPTOASMUSSIA* NOVOZHILOV & VARENTSOV, 1956

Preliminary comments. The diagnosis, translated by Defretin-Lefranc (1965) and emended by Tasch (1987), is: “*Anterior and posterior margin narrowly or broadly rounded; the dorsal margin in front of the umbo is two-thirds or more the length of the margin behind the umbo, except where umbo is submedial. Valve height less than or almost equal to the length. Ornamentation fine and alveolar (i.e., with small depressions or pits).*” There is an inconsistency in the type of ornamentation between the diagnosis of family (punctuated or smooth) and genus (fine and alveolar). The comments on the family Asmusiidae (above) and the present comment on the alveolar ornamentation of the genus *Glyptoasmussia*, permit to devise why Novozhilov (1958b, p. 37) erected the family Glyptoasmussiidae, but we do not use this latter family here.

Glyptoasmussia quadrata NOVOZHILOV, 1958b

400-4: Right valve? (holotype of *Glyptoasmussia quadrata* Novozhilov, 1958b, pl. III, fig. 36).

Loc.: Eastern Taimyr, near Cape Tsvetkov (Russia).

Chronost.: Early Triassic (upper zone).

Remarks. Even though the specimen in the collection has exactly the numbering indicated in the Novozhilov’s publication, it might be different; the insufficient photographs of the publication do not permit indeed its precise identification.

400-5: Left valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. II, fig. 6).

Loc., chronost.: As for the specimen 400-4.

400-10: Right valve (holotype of *Concherisma tomensis* Novozhilov, 1958b, pl. IV, fig. 50; synonymized by Defretin-Lefranc, 1965, pl. II, fig. 7).

Loc., chronost.: As for the specimen 400-4.

Remarks. As indicated above for sample 400-4, this specimen, although having the number indicated in the Novozhilov’s publication, probably differs from the illustrated individual.

Genus *TAIMYRITES* NOVOZHILOV, 1958b

Preliminary comments. Chen & Shen (1985, p. 178-179) placed this genus among their chapter of questionable taxa. Due to its particular morphological outline, we consider that this taxon is well characterized; and following the Novozhilov’s (1958b) placement, we include it in the family Orthothemosiidae.

Taimyrites strachovi NOVOZHILOV, 1958b

400-16: a specimen with the two valves (holotype of *Taimyrites strachovi* Novozhilov, 1958b, pl. IV, fig. 47).

Loc., chronost.: As for the specimen 400-4 (see p. 126).

Remarks. This specimen has effectively the collection number mentioned in the Novozhilov's publication, but probably does not correspond the illustrated specimen; but once again, the poor quality of the photographs of the publication does not permit to conclude with certainty.

Family unknown (probably Orthothemosiidae, see below)
Genus *PSEUDESTHERIA* RAYMOND, 1946

Preliminary comments. This genus was created by Raymond (1946), as a group of morphospecies without stratigraphic significance. Raymond (1946) recognized that this taxon "... must inevitably become a sort of dumping ground for not too well preserved fossils." Raymond (1946) defined this genus as: "*Lioestheriidae* with oval carapace, engirdled by concentric lirae or costellae separated by spaces equal or greater than their own width. No sculpture, except punctuation, is present in the intervals." The last sentence reflects either the complete absence of ornamentation between the growth lines, or the presence of a punctuated ornamentation that is related with the Eoestherioidea-Euestheriidae complex and more precisely with the family Orthothemosiidae.

Pseudestheria borisi DEFRETIN-LEFRANC, 1965

1342c-151a: Left valve (holotype of *Pseudestheria borisi* Defretin-Lefranc, 1965, pl. I, fig. 7).

Loc., lithost., biostrat., chronost.: As for the specimen 1342c-120 (see p. 123).

1342c-155/1: Right valve? (paratype of *Pseudestheria borisi* Defretin-Lefranc, 1965, pl. I, fig. 8).

Loc., lithost., biostrat., chronost.: As for the specimen 1342c-120 (see p. 123).

Pseudestheria hersinensis DEFRETIN-LEFRANC, 1970

USTL 1333: Right valve (paratype of *Pseudestheria hersinensis* Defretin-Lefranc, 1970, pl. XIII, fig. 2).

Loc.: Borehole 031 at the depth 386.90 m, level - 482, Pit 3 west, Concession of Courrières, Group of Hénin-Liétard (Pas-de-Calais, France).

Lithost., chronost.: As for the specimen USTL 1337 (see p. 124).

USTL 1335: Right valve (holotype of *Pseudestheria hersinensis* Defretin-Lefranc, 1970, pl. XIII, fig. 1).

Loc.: Parasequence at 128 m, "bowette" Nord 555, Pit 7, Concession of L'Escarpelle, Group of Douai (Nord, France).

Lithost., chronost.: As for the specimen USTL 1337 (see p. 124).

Pseudestheria tatarsiensis DEFRETIN-LEFRANC, 1965

1342c-159: Left valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. I, fig. 5).

Loc., lithost., biostrat., chronost.: As for the specimen 1342c-120 (see p. 123).

1342c-161: Left valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. I, fig. 6).

Loc., lithost., biostrat., chronost.: As for the specimen 1342c-120 (see p. 123).

Pseudestheria tungussensis (LYUTKEVICH, 1938) emend.
DEFRETIN-LEFRANC, 1965

815-2b: Left valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. I, fig. 3).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 815-25/1 (see p. 124).

815-27/3: Left valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. I, fig. 4).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 815-25/1 (see p. 124).

Family AQUILONOGLYPTIDAE NOVOZHILOV, 1958b

Preliminary comments. According to Astrop & Hegna (2015), "*Aquilonoglyptidae* was originally a family based on a single genus (*Aquilonoglypta* Novozhilov, 1958b), which was in turn based on a single species, which was in turn based on a single specimen." These authors stated that: "*Novozhilov (1958b) regarded the features present distinctive enough to warrant such an isolated placement*". These authors also mentioned that: "*Additional species have since been described from China (Wang and Liu, 1980)*", and concluded that: "*the small size of this family almost guarantees that it is monophyletic, but it probably renders Euestheriidae paraphyletic as well*".

Genus *AQUILONOGLYPTA* NOVOZHILOV, 1958b
Aquilonoglypta ardua NOVOZHILOV, 1958b

401-30: Right valve (holotype of *Aquilonoglypta ardua* Novozhilov, 1958b, pl. IV, figs. 54-54a).

Loc.: Cape Ilya, on the southern bank of Khatanga Gulf, borehole P-2, depth 1274-1280 m (Arctic regions of Russia).

Lithost.: Misailap Formation, Khatanga zone = Tatarian 2 zone.

Chronost.: Late Permian, Kazanian (now Middle Permian, Wordian).

Family POLYGRAPTIDAE NOVOZHILOV, 1954
Genus *POLYGRAPTA* NOVOZHILOV, 1946

Preliminary comments. *Polygrapta* was defined as subgenus of *Estheria* by Novozhilov (1946), with *P. chatangensis* as type species, and included in the family Limnadiidae. Then, Novozhilov (1954) created the subfamily Polygraptinae, included in the family Bairdestheriidae, but he did not include this subgenus in this new subfamily, while Novozhilov (1958b) included the genus *Polygrapta* in the family Bairdestheriidae. Zhang *et al.* (1976) and Chen & Shen (1985) included this genus in the family Euestheriidae (see Astrop & Hegna, 2015). Tasch (1987) synonymized this genus with *Cyzicus* (*Lioestheria*). Polygraptidae is considered here as a group of estheriteoid spinicaudatan.

Polygrapta chatangensis NOVOZHILOV, 1946

401-2: Group of valves (paratype of *Polygrapta chatangensis* Novozhilov, 1946 in Novozhilov, 1958b, pl. I, fig. 2; Defretin-Lefranc, 1965, pl. II, fig. 2).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

401-4: Right valve? (paratype of *Sphaerograptia dechaseauxae* Novozhilov 1958b, pl. III, fig. 18; Defretin-Lefranc, 1965, pl. II, fig. 1).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

401-5: Left valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. II, fig. 1).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

401-6: Left valve (paratype of *Sphaerograptia dechaseauxae* Novozhilov, 1958b, pl. III, fig. 17).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

401-9: Right valve (metatype of *Polygrapta chatangensis* Novozhilov, 1946 in Novozhilov, 1958b, pl. I, fig. 3).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

401-13/1: Right valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. II, figs. 2 et 5).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

401-50: Right valve (Novozhilov, 1958b, pl. I, fig. 1).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

Comments. Defretin-Lefranc (1965) subsequently designed this specimen as the holotype.

Polygrapta laptevi NOVOZHILOV, 1946

401-58: Left valve (holotype of *Polygrapta laptevi* Novozhilov, 1946 in Novozhilov, 1958b, pl. II, fig. 9).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

Comments. Defretin (1953) rather considered this specimen as a representative of *P. chatangensis*.

Polygrapta multinstita NOVOZHILOV, 1946

401-3: Right valve (holotype of *Polygrapta multinstita* Novozhilov, 1946 in Novozhilov, 1958b, pl. II, fig. 10).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

401-48: Left valve (holotype of *Pemphicyclus arngastachi* Novozhilov, 1946 in Novozhilov 1958b, pl. II, fig. 13; Defretin-Lefranc, 1965, pl. II, fig. 4).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

401-55/55a: Left valve (metatype of *Polygrapta multinstita* Novozhilov, 1946 in Novozhilov, 1958b, pl. II, fig. 12).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

Comments. Although Defretin-Lefranc included both specimens in *P. chatangensis*, they were probably well identified because they are similar to the specimen 401-3.

401-116: Right valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. II, fig. 3).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

Comments. The specimen 401-48 has got a subcircular outline with strong postero-dorsal angle (cycladiform to limnadopsiform) and umbo placed anteriorly; while the specimen 401-116 reflects another morphotype with ovate outline and subcentral umbo probably due to sexual dimorphism.

Polygrapta necta NOVOZHILOV, 1946

401-17: Left valve (paratype of *Polygrapta necta* Novozhilov, 1946 in Novozhilov, 1958b, pl. I, fig. 7).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 401-30 (see p. 127).

Comments. Defretin (1953) include this specimen in *P. chatangensis* but we think that *P. necta* is a better identification.

Superfamily ESTHERITEOIDEA ZHANG &
CHEN IN ZHANG *et al.*, 1976

Family FUSHUNOGRAPTIDAE WANG IN HONG *et al.*,
1974 Genus indet.

Preliminary comments. The name *Pseudoasmussia* Defretin-Lefranc, 1969 was changed by Tasch (1987) into *Pseudoasmussiata*, due to the homonymy with *Pseudoasmussia* Novozhilov, 1954; even if many species of this genus (including the type species *Pseudoasmussia grassmuecki* Defretin-Lefranc, 1969; corrected spelling here for *grassmücki*), show a reticulate ornamentation, not consistent with the family diagnosis. Furthermore, Tasch (1969, 1987) synonymized *Pseudoasmussia* Novozhilov, 1954 with *Cyzicus* (*Euestheria*), due to its reticular ornamentation. Therefore, the status and name of the genus described here will remain in open nomenclature as “*Pseudoasmussia*”.

“*Pseudoasmussia*” *striata* (MÜNSTER IN GOLDFUSS, 1826)
emend. DEFRETIN-LEFRANC, 1970

USTL 1334: Left valve (ill. as *Pseudoasmussia striata* (Münster in Goldfuss, 1826) in Defretin-Lefranc, 1970, pl. XIII, fig. 9).

Loc.: Borehole 14F; depth 163.75 m, Douai Group (Nord, France).

Chronost.: Carboniferous, Westphalian (now Moscovian).

Comments. See comments on “*Lioestheria*” *striata* (Hennion *et al.*, this volume).

Suborder LEAIINA KOBAYASHI, 1972
Superfamily LEAIOIDEA RAYMOND, 1946
Family MONOLEIOLOPHIDAE NOVOZHILOV, 1954

Preliminary comments. Our species *Teixeirium rossicum* Novozhilov was previously assigned to the family Estheriellidae (Estheriellina sensu Shen, 2003), but due to the presence of a unique antero-ventral carina, it is transferred to the suborder Leaiina. According to Jones & Chen (2000), and based on the revision of the type species of *Estheriella* Weiss and *Pseudestheriella* from the Early Triassic of Germany, the Estheriellidae is to exclude from Diplostraca and even from Crustacea, and perhaps to assign to Bivalvia. That might confirm the hypothesis of Giebel (1857). Later, according to Shen (2003), the suborder Estheriellina is considered valid. However, Kozur & Weems (2010) did not admit the hypothesis of Jones & Chen (2000), and argued that these materials, being preserved as taphonomic impressions, do not display any structure comparable with bivalve hinges. Our dubious material of *Teixeirium rossicum* Novozhilov might belong to the subfamily Karagandiinae (Estheriellidae) defined by Tasch (1961). However, no further work (Tasch, 1969; Chen & Shen, 1985) has confirmed the validity of this subfamily.

Genus *TEIXEIRIUM* NOVOZHILOV, 1958c

Preliminary comments. Chen & Shen (1985, p. 186) listed, without discussion, this taxon in their chapter of the invalid genus names.

Teixeirium rossicum NOVOZHILOV, 1958c

1321-2: Right valve (holotype of *Teixeirium rossicum* Novozhilov, 1958c, pl. I, fig. 2).

Loc.: Left bank tributary of the Kerzhenets river (itself right bank tributary of the Volga river), 25 km southeast of Ilyinsky-Zaborsky village, Gorkovsk area (Russia).

Chronost.: Late Permian, Tatarian (now Changhsingian).

Comments. The revised material confirms the validity of this genus and species due to its uncommon morphology. Even if these genus and species are not based on only one specimen (contrary to the assertion of Astrop & Hegna, 2015), an additional material is necessary to interpret the real systematic affinities of *Teixeirium rossicum* because its morphology more evokes the suborder Leaiina than the suborder Estheriellina originally assigned by Novozhilov (1958c).

Family LEAIIIDAE RAYMOND, 1946

Genus *HEMICYCLOLEAIA* RAYMOND, 1946

Hemicycloleaia baentschiana (BEYRICH, 1864) RAYMOND, 1946
Fig. 1D

Preliminary comments. Although Waterlot (1934) used the binomen *L. baentschi*, the original name *L. baentschiana* is perfectly valid according to the rules of the International Code of Zoological Nomenclature; hence, we re-use the specific name *baentschiana* and consider *L. baentschi* as a *nomen vanum*.

USTL 1093: Right valve (ill. as *Leaia baentschi* Beyrich, 1864 in Waterlot, 1934, pl. VII, fig. 11).

Loc.: Registered office of Götteborn, 2d floor, at 1 576 m of well II (Saarland, Germany).

Lithost.: Sarrelouis Formation.

Biost.: *Leaia* beds.

Chronost.: Carboniferous, Lower Stephanian (now Kasimovian).

USTL 1094: Right valve (ill. as *Leaia baentschi* Beyrich, 1864 in Waterlot, 1934, pl. VII, fig. 10).

Loc., lithost., biost., chronost.: As for the specimen USTL 1093.

Comments. This sample includes two specimens, the larger of which corresponds to a right valve illustrated by Waterlot (1934) and a small second specimen that corresponds to a left valve; both have got the same distinct character that probably is a taphonomic feature that corresponds to a less marked fourth rib, between the anterior and the posterior ones. Hence, this material needs further studies to clarify its systematics.

USTL 1095: Group of valves (ill. as *Leaia baentschi* Beyrich, 1864 in Waterlot, 1934, pl. VII, fig. 1).

Loc.: Entry of the Frankenholz pit (Saarland, Germany).

Lithost.: Sarrelouis Formation.

Biost.: Shales with *Leaia baentschi*.

Chronost.: Carboniferous, Early Stephanian, Ottweiler subdivision (now Kasimovian).

USTL 1096: Left valve (ill. as *Leaia baentschi* Beyrich, 1864 in Waterlot, 1934, pl. VII, fig. 3).

Loc., lithost., biost., chronost.: As for the specimen USTL 1095.

Comments. This important spinicaudatan species is a secondary biostratigraphic marker of the Stephanian B-C *Pseudestheria* Form Schadewalde-*Lioestheria* Form Frenswegen-*Palaeolimnadiopsis* Form Jessen Assemblage-Zone (Schneider *et al.*, 2005).

Hemicycloleaia kuzedeica NOVOZHILOV, 1956

1198-4: Right valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 8).

Loc.: Right bank of Kondoma river, left bank tributary of Tom river, near Verkhniy Kaltan village (western Siberia, Russia).

Lithost.: Kuznetsk Formation.

Chronost.: Early Permian.

1198-5: Left valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 9).

Loc., lithost., chronost.: As for the specimen 1198-4.

Comments. Both forms probably represent two distinct morphotypes, 1198-4 with a subquadrate outline and 1198-5 with an ovate outline and a ventral margin strongly inclined postero-dorsally.

Hemicycloleaia kamaensis NOVOZHILOV, 1956

1342a-19: Right valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 12).

Loc.: Left bank of Kitiak stream, right bank tributary of Viatka river, itself tributary of Volga river, near Bolchoi Kitiak village, Malmyzh district, Kirov province (High-Volga Basin, Russia).

Lithost.: Belebei Formation.

Biost.: Lower levels with conchostracans and insects.

Chronost.: Late Permian, late Kazanian (now Middle Permian, Wordian).

1342a-37: Right valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 13).

Loc., lithost., biost., chronost.: As for the specimen 1342a-19.

Comments. Both specimens mentioned here have got a subovate or elliptical outline and a convex dorsal margin, curved downward (postero-ventrally) behind the umbonal area. These characters are not illustrated in the specimens of Novozhilov (1956, fig. 27) and Defretin-Lefranc (1965, fig. 19), which exhibit a subcircular outline and a straight dorsal margin not curved downward. However, as mentioned above, the specimens here considered were presented as microphotographs by Defretin-Lefranc (1965, pl. III, figs. 12-13). The specimens, re-drawn by Novozhilov as well as Defretin-Lefranc, probably differ from these photographed specimens. Perhaps, the morphologic variation might indicate a sexual dimorphism or different subspecies.

Hemicycloleaia securiformis NOVOZHILOV, 1956

1342a-11: Right valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 10).

Loc., lithost., biost., chronost.: As for the specimen 1342a-19 (see p. 129).

1342a-23: Right valve (Defretin-Lefranc, 1965, pl. III, fig. 11).

Loc., lithost., biost., chronost.: As for the specimen 1342a-19 (see p. 129).

Comments. This species was also mentioned in synonymy lists of Defretin-Lefranc (1965) as *Leaia securiformis*.

Genus *FERNANDOALMEIDIUM* NOVOZHILOV, 1958c

Preliminary comments. This genus was synonymized with *Monoleiophus* Raymond, 1946 by Chen & Shen (1985, p. 150).

Fernandoalmeidium flavioi NOVOZHILOV, 1958c

1158-1: Left valve (holotype of *Fernandoalmeidium flavioi* Novozhilov, 1958c, pl. I, fig. 1).

Loc.: Terrils of an abandoned copper mine, on the left bank of Kitiak stream, near Bolchoi Kitiak village, in the Malmyzh zone (Kirov area, Russia).

Chronost.: Late Permian, Kazanian (now middle Permian, Wordian).

Comments. Novozhilov (1958c) described a dorsal carina (like in *Hemicycloleia* Raymond); an embryonic small anterior carina (like in *Massagetes* Novozhilov), and a large medium

carina that reaches the umbonal area. Based on these features, we include *F. flavioi* in the family Leaiidae (*sensu* Jones & Chen, 2000). According to Defretin-Lefranc (1965), this taxon is only a fragment of *Hemicycloleia securiformis* (see above) and consequently is synonymous of this species.

IV. — DISCUSSION AND CONCLUSION

We have re-described in this catalogue an exceptional collection of Diplostraca (Spinicaudata, Leaiina) coming from various geographic and stratigraphic localities (Fig. 2). The main goal of a catalogue is to help further revisions on a group of organisms; and the collection may be a good tool for studies with modern methods like morphometric analyses, SEM analyses or geochemical investigations. These new systematic studies allow to solve many problems of systematics and to test the validity of many of the species mentioned in this catalogue. Astrop & Hegna (2015, p. 2-3) mentioned that there are many Novozhilov's species that lack enough support to be valid. We have to admit that, in our collection, three

Superfamily	Vertexioidea				Eosestherioidea										Estheriteoidea		Leaiioidea			
	Palaeolimnadiidae		Palaeolimnadiopsidae	Ipsiloniidae					Euestheriidae		Loxomegaglyptidae	Orthothemosiidae		Unknown	Aquilonoglyptidae	Polygraptidae	Fushunograptidae	Monoleiophitidae	Leaiidae	
Genus species	<i>Estheriina bethunensis</i>																			
	? <i>Palaeolimnadia rogeri</i>																			
	<i>Palaeolimnadiopsis brevis</i>																			
	<i>Palaeolimnadiopsis kouznetskensis</i>																			
	<i>Belgolimnadiopsis stockmansii</i>																			
	<i>Rossilimnadiopsis marlieri</i>																			
	<i>Endolimnadiopsis eichwaldi</i>																			
	<i>Anomalonema reumauxi</i>																			
	<i>Keratestheria bukaczkiensis</i>																			
	<i>Keratestheria magna</i>																			
	<i>Keratestheria rugosa</i>																			
	<i>Cornia sibirica</i>																			
	<i>Ulugkemia borisi</i>																			
	" <i>Estheria</i> " <i>destombesi</i>																			
	" <i>Loestheria</i> " <i>propinqua</i>																			
	" <i>Loestheria</i> " <i>toricata</i>																			
	<i>Euestheria bourozi</i>																			
	<i>Euestheria evenkiensis</i>																			
	<i>Euestheria minuta</i>																			
	<i>Euestheria ricouri</i>																			
<i>Euestheria simoni</i>																				
<i>Laxitella laxitexta</i>																				
<i>Glyptoasmussia quadrata</i>																				
<i>Taimyrites strachovi</i>																				
<i>Pseudestheria borisi</i>																				
<i>Pseudestheria hersinensis</i>																				
<i>Pseudestheria tatarinensis</i>																				
<i>Pseudestheria tungussensis</i>																				
<i>Aquilonoglypta ardua</i>																				
<i>Polygrapta chatangensis</i>																				
<i>Polygrapta laptevi</i>																				
<i>Polygrapta multistita</i>																				
<i>Polygrapta necta</i>																				
" <i>Pseudosmussia</i> " <i>striata</i>																				
<i>Teixierium rossicum</i>																				
<i>Hemicycloleia baentschiana</i>																				
<i>Hemicycloleia kuzedeica</i>																				
<i>Hemicycloleia kamaensis</i>																				
<i>Hemicycloleia securiformis</i>																				
<i>Fernandoalmeidium flavioi</i>																				

Fig. 2. — Table of stratigraphic distribution of the Diplostraca specimens housed in Lille University.

Fig. 2. — Tableau montrant la répartition stratigraphique des spécimens de Diplostraca conservés à l'Université de Lille.

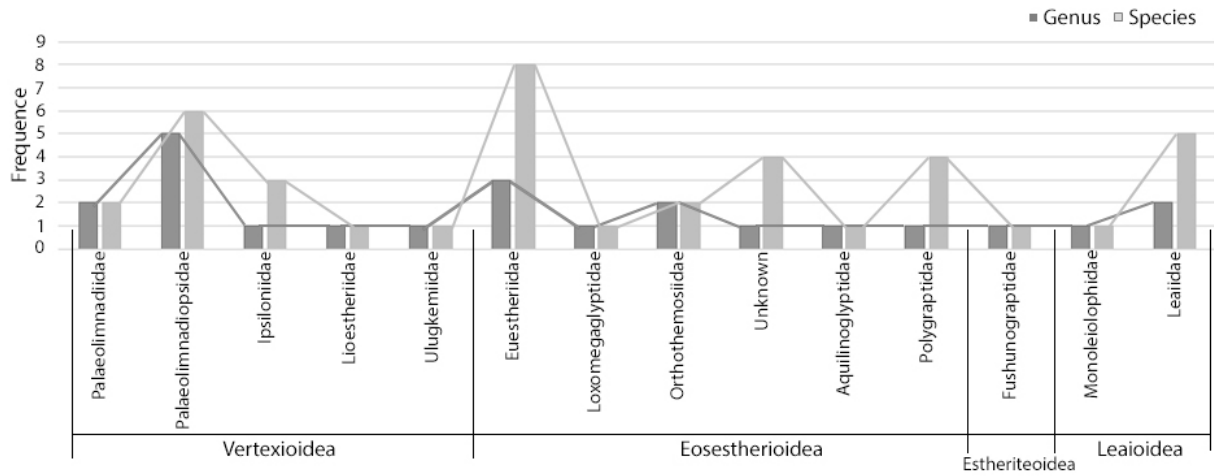


Fig. 3. — Histogram of Diplostraca genera and species corresponding to families housed in Lille University.

Fig. 3.— Histogramme de fréquence des genres et des espèces correspondant aux familles de Diplostraca conservées à l'Université de Lille.

species of *Keratestheria* and four species of *Polygrapta* come from the same locality and stratigraphic level. However, our catalogue demonstrates the great value of the Defretin's and Novozhilov's work. Some taxa, like *Estheriina*, *Taimyrites*, *Fernandoalmeidium*, *Pseudestheria*, and *Teixeirium*, are considered as dubious by different authors. It appears clearly, after our preliminary work, that these taxa should be reviewed in light of new methodologies and taxonomic schemes currently employed. Some species are left in open nomenclature due to the poor diagnoses of some genera, e.g., "*Estheria*" *destombesi*, "*Lioestheria*" *toricata*, "*Lioestheria*" *propinqua* and "*Pseudoasmussia*" *striata*. Another interesting point is that we have eight species of the family Euestheriidae, including in particular five belonging to the genus *Euestheria* and ranging from Carboniferous to Cretaceous. That allows to planify future evolutionary studies on this group. The doubtful family Orthothemosiidae is represented by six species (four of which belongs to the problematic genus *Pseudestheria*, included here for the first time in that family) that ranged from Carboniferous to Middle Jurassic. *Pseudestheria* as well as *Estheria*, *Lioestheria* and *Euestheria* are heterogeneous taxa that include many different species and even, different genera.

The presence of five genera of the family Palaeolimnadiopsidae plus one Ipsilonidae, that range from

Devonian to Jurassic, brings a large amount of data on the diversification of the group and permits to clarify the real affinities of the limnadopsiform spinicaudatans (as mentioned by Astrop & Hegna, 2015). Furthermore, it is remarkable that we have seen 21 species belonging to the superfamily Eosestherioidea. Inversely, we remarked the low number of representatives of the superfamily Estheriteoidea (1), and these of the suborder Leaiina (6), in addition to two palaeolimnadids and one Lioestheriidae (Fig. 3). This large amount of materials, ranged from the Devonian to the Jurassic, brings a great possibility of development for different studies on the collection. The early record of Devonian-Carboniferous spinicaudatans provides important information on the early diversification of the group, whereas the Jurassic record informs on their decline.

Acknowledgements. — We are grateful to E. Locatelli for her help in the research of references, to A. Blicek for his editorial advice about the presentation of the catalogue, and to P. Cózar for his help. Thanks also to the students who helped us in the collection inventory at the Lille University – Sciences and Technologies : R. Bernard, C. Colpaert and B. Lachère. Special thanks to T. Hegna (Western Illinois University, USA) for sending us references on the spinicaudatans. Also to the reviewer of the journal Dr. Shen Yan-Bin for his helpful comments that enhance the manuscript.

REFERENCES

- ANONYME (1971). — Webster's Third New International Dictionary of the English language : unabridged with seven language dictionary, vol. 2, (H to R). Encyclopedia Britannica Inc., William Benton Publisher: 1017-1993.
- ASTROP T. & HEGNA T. (2015). — Phylogenetic relationships between living and fossil Spinicaudatan taxa (Branchiopoda Spinicaudata): reconsidering the evidence. *Journal of Crustacean Biology*, **35** (3): 339-354.
- BARNARD K.H. (1929). — Contributions of the Crustacean Fauna of South Africa. *Annals of South African Museum*, **28**: 181-272.
- BEYRICH E. (1864). — Über eine Kohlenkalk Fauna von Timor. *Abhandlungen Akademie Wissenschaften Berlin*: 61-98.
- BLIECK A., CUVELIER J. & OUDOIRE T. (2013). — Euryptéridés des collections de paléontologie de Lille : collections du Musée d'Histoire Naturelle de Lille (VII) et collections de l'Université Lille I (Catalogue I). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2e série, **20**: 31-42.
- BLIECK A. & JANVIER P. (1989). — Vertébrés Agnathes du Dévonien inférieur de l'Artois (Pas-de-Calais, France) : implications biostratigraphiques. *Annales de Paléontologie (Vertébrés-Invertébrés)*, **75** (3): 125-167.

- BUSNARDO R. (1969). — Découverte de Phyllopo­des Conchostracés dans le Trias Subbétique (Andalousie, Espagne). *Geobios*, **2**: 89-130.
- CHEN P.J. & SHEN Y.B. (1982). — Late Mesozoic conchostracans from Zhejiang, Anhui and Jiangsu Provinces. *Palaeontologia Sinica*, **161** (17): 1-117.
- CHEN P.J. & SHEN Y.B. (1985). — *An introduction to fossil Conchostraca*. Science Press, Beijing: 241 p.
- CHEN P.J., LI G. & BATTEN D.J. (2007). — Evolution, migration and radiation of late Mesozoic conchostracans in East Asia. *Geological Journal*, **142**: 391-413.
- CHERNYSHEV B.I. (1948). — Conchostraca de la région du gisement de charbon de Buckachackoe (Transbaïkalie orientale). *Recueil d'articles de paléontologie et stratigraphie*, **1** (2): 9-14 [in Russian].
- CUVELIER J., DEVILLE P. & OUODOIRE T. (2011). — Collections géologiques et laboratoires lillois. In : BLIECK A., AUGUSTE P. & DERYCKE C. eds., *GeoReg – Géosciences des régions de France et des pays environnants* (Forum F.F.G., 23-27 oct. 2011, Villeneuve d'Ascq). Programme & résumés: 92.
- DADAY DE DEÉS E. (1914). — Monographie systématique des Phyllopo­des Conchostracés. Première partie. *Annales des Sciences Naturelles, Zoologie*, 9e série, **20**: 39-330.
- DEFRETIN S. (1950a). — Crustacés fossiles du Dévonien de l'Artois et du Boulonnais. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **70**: 55-66.
- DEFRETIN S. (1950b). — Sur quelques *Estheria* du Trias français à faciès germanique et de l'Hettangien. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **70**: 214-227.
- DEFRETIN S. (1953). — Une *Estheria* inédite du Terrain houiller du Nord de la France. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **73**: 231-237.
- DEFRETIN S. & FAUVELET E. (1951). — Présence de Phyllopo­des triasiques dans la région d'Argana-Bigoudine (Haut-Atlas occidental). *Notes et Mémoires du service géologique du Maroc*, **85**: 129-134.
- DEFRETIN-LEFRANC S. (1963). — Révision des conchostracés du Trias français à faciès germanique. In: Colloque sur le Trias de la France et des régions limitrophes. *Mémoire du Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières*, **15**: 524-535.
- DEFRETIN-LEFRANC S. (1965). — Etude et révision de Phyllopo­des Conchostracés en provenance d'U.R.S.S. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **85**: 15-48.
- DEFRETIN-LEFRANC S. (1967). — Etude sur les phyllopo­des du bassin du Congo. *Annales du Musée royal de l'Afrique centrale, Sciences géologiques*, **56**: 122 p.
- DEFRETIN-LEFRANC S. (1969). — Les Conchostracés triasiques du Groenland Oriental. In: DEFRETIN-LEFRANC S., GRASMÜCK K. & TRÜMPY R. Notes on Triassic stratigraphy and palaeontology of north-eastern Jameson Land (East Greenland). *Meddelelser om Grønland*, **168** (2): 124-136.
- DEFRETIN-LEFRANC S. (1970). — Révision des Conchostracés westphaliens du bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **90**: 121-136.
- DEPERET C. & MAZERAN P. (1912). — Les *Estheria* du Permien d'Autun. *Bulletin de la Société d'Histoire naturelle d'Autun*, **25**: 165-173.
- FEYS R. (1953). — Présence de *Leaia tricarinata* Meek et Worthen associée à *Estheria Simoni* Pruvost dans le Terrain Houiller Briançonnais. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **73**: 153-161.
- GALLEGO O.F. (2005). — First record of the family Palaeolimnadiopseidae (Defretin-LeFranc, 1965) from the Triassic of Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, **18**: 223-231.
- GALLEGO O.F. (2010). — A new crustacean clam shrimp (Spinicaudata: Eosestheriidae) from the Upper Triassic of Argentina and its importance for "conchostracan" taxonomy. *Alcheringa*, **34**: 179-195.
- GIEBEL C.G. (1857). — Paläontologische Untersuchungen. *Zeitschrift für Naturwissenschaften Halle*, **10**: 301-317.
- GOLDFUSS A. (1826). — *Petrefacta Germaniae tam ea quae in Museo Universitatis Regiae Borussicae Fridericiae Wilhelmae Rhenanae servantur quam alia quaecunq­ue in Museis Hoeninghusiano Muensteriano aliisque extant, iconibus et descriptionibus illustrata*. Leipzig, Zweiter Theil: 298 p., pl. 72-165.
- HENNON M., CUVELIER J., GALLEGO O., OUODOIRE T. & VACHARD D. (this volume). — Collections of the Natural History Museum of Lille. VIII. — Diplostraca (types and figured specimens). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2e série, **22**: 109-118.
- HOLUB V. & KOZUR H. (1981). — Revision einiger Conchostracen-Faunen des Rotliegenden und biostratigraphische Auswertung der Conchostracen des Rotliegenden. *Geologische-Paläontologische Mitteilungen Innsbruck*, **11** (2): 39-94.
- JONES T.R. (1878). — Notes on some fossil bivalved Entomostraca. *Geological Magazine*, **5** (2): 100-110.
- JONES T.R. (1897). — On some Fossil Entomostraca from South American. *Geological Magazine*, N.S., decade 4, **4** (6): 259-265.
- JONES P.J. & CHEN P.J. (2000). — Carboniferous and Permian Leaoidea (Branchiopoda: Conchostraca) from Australia: taxonomic revision and biostratigraphic implications. *Records of the Australian Museum*, **52**: 223-244.
- KOBAYASHI T. (1954). — Fossil estherians and allied fossils. *Journal of the Faculty of Science, Tokyo University*, **9** (2): 1-192.
- KOZUR H., MARTENS T. & PACAUD G. (1981). — Revision von "Estheria" (*Lioestheria lallyensis* Depéret & Mazeran, 1912 und "Euestheria" *autunensis* Raymond, 1946. *Zeitschrift für Geologische Wissenschaft*, **9** (12): 1441-1449.
- KOZUR H.W. & WEEMS R.E. (2005). — Conchostracan evidence for a late Rhaetian to early Hettangian age for the CAMP volcanic event in the Newark Supergroup, and a Sevatian (late Norian) age for the immediately underlying beds. *Hallesches Jahrbuch für Geowissenschaften. Reihe B: Geologie, Paläontologie, Mineralogie*, **27**: 21-51.
- KOZUR H.W. & WEEMS R.E. (2007). — Upper Triassic conchostracan biostratigraphy of the continental basins of eastern North America: its importance for correlating Newark Supergroup events with the Germanic Basin and the International Geologic Time Scale. In: LUCAS S.G. & SPIELMANN J.A. (eds.), *The Global Triassic. New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin*, **41**: 137-188.
- KOZUR H.W. & WEEMS R.E. (2010). — The biostratigraphic importance of conchostracans in the continental Triassic of the northern hemisphere. In: LUCAS S.G. (ed.), *The Triassic Timescale. Geological Society, London, Special Publications*, **334**: 315-417.
- LYUTKEVICH E.M. (1938). — Triassic Estheriinae from the upper strata of the Tungussk Series. *Institut Arctique, Transactions*, **10** (3): 155-164 [in Russian].
- MAILLIEUX E. (1939). — Un conchostracé nouveau de l'assise des grès et schistes de Wépion (Emsien inférieur). *Bulletin du Musée Royal d'Histoire naturelle de Belgique*, **15** (10): 1-7.
- MARTIN J.W. & DAVIS G.E. (2001). — An updated classification of the recent Crustacea. *Natural History Museum of Los Angeles County, Sciences Series*, **39**: 1-124.

- NECHAEV A.V. (1894). — Faune des dépôts du Permien de la zone orientale de la partie européenne de l'U.R.S.S.. *Travaux de la Société des Naturalistes de l'Université de Kazan*, **27** (4): 374-380.
- NOVOZHILOV N. (1946). — Nouveaux Phyllopo des du Permien et du Trias de la région Nordvik-Khatanga. *Profondeurs de l'Arctique*, **1**: 172-200 [in Russian].
- NOVOZHILOV N. (1954). — Crustacés Phyllopo des du Jurassique supérieur et du Crétacé de Mongolie. *Travaux de l'Institut Paléontologique de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S.*, **48**: 7-124 [In Russian; French translation by Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières].
- NOVOZHILOV N. (1956). — Dvustovorchatye listonogiye rakoobraznye, I. Leaiidy. *Akademiya Nauk. SSSR, Trudy Paleontologicheskii Institut*, **61**: 1-129 [in Russian].
- NOVOZHILOV N. (1958a). — Conchostraca de la super-famille des Limmadiopsidae superfam. nov.. In: NOVOZHILOV N., Recueil d'articles sur les Phyllopo des Conchostracés. *Annales du Service d'information Géologique du Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières (B.R.G.G.M.)*, **26**: 95-127.
- NOVOZHILOV N. (1958b). — Conchostraca du Permien et du Trias du littoral de la Mer des Laptev et de la Toungouska inférieure. In: NOVOZHILOV N., Recueil d'articles sur les Phyllopo des Conchostracés. *Annales du Service d'information Géologique du Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières (B.R.G.G.M.)*, **26**: 15-79.
- NOVOZHILOV N. (1958c). — Deux nouveaux genres et deux sous-familles nouvelles de Leaiidae du Permien supérieur de la région de la Volga. In: NOVOZHILOV N., Recueil d'articles sur les Phyllopo des Conchostracés. *Annales du Service d'information Géologique du Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières (B.R.G.G.M.)*, **26**: 81-84.
- NOVOZHILOV N. (1958d). — Nouveaux Conchostraca fossiles. In: NOVOZHILOV N., Recueil d'articles sur les Phyllopo des Conchostracés. *Annales du Service d'information Géologique du Bureau de Recherches Géologiques, Géophysiques et Minières (B.R.G.G.M.)*, **26**: 7-14.
- NOVOZHILOV N. (1960). — Sous-ordre Conchostraca Sars, 1846. Phyllopo des bivalves. In: *Osnovy Paleontologii, Chlenistologiya Chernysheva. Moscow Gosgeolteknizat*: 220-253 [in Russian].
- NOVOZHILOV N. & VARENTSOV I.M. (1956). — Nouveaux Conchostraca du Givétien de la Touva. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences, U.R.S.S.*, **110** (4): 670-673 [in Russian].
- PRUVOST P. (1911). — Note sur les entomostracés bivalves du terrain houiller du Nord de la France. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **40**: 60-80.
- RAYMOND P. (1946). — The genera of fossil conchostracan order of bivalved crustacea. *Bulletin Museum Comparative Zoology, Harvard College*, **96**: 217-307.
- RENNIE J.V.L. (1934). — Note on an *Estheria* from the Witteberg Series. *South African Journal of Sciences*, **31**: 233-235.
- ROBINEAU-DESVOIDY J.B. (1830). — Essai sur les myodaires. *Mémoires présentés par divers savants à l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, **2**: 813 p.
- SCHNEIDER J.W., GORETZKI J. & RÖSSLER R. (2005). — Biostratigraphisch relevante nicht-marine Tiergruppen im Karbon der variscischen Vorsenke und der Innensenken. *Courier Forschungsinstitut Senckenberg*, **254**: 103-118.
- SHEN Y.B. (1985). — Classification and evolution of the family Palaeolimnadiopsidae (Conchostraca). *Scientia Sinica (Series B)*, **28** (8): 888-894.
- SHEN Y.B. (2003). — Review of the classification of the family Afrograptidae (Crustacea: Conchostraca). *Acta Palaeontologica Sinica*, **42** (4): 590-597.
- TASCH P. (1961). — Data on some new Leonardian conchostracans with observations on the taxonomy of the Family Vertexiidae. *Journal of Paleontology*, **35** (6): 1121-1129.
- TASCH P. (1969). — Branchiopoda. In: MOORE, R.C. ed., *Treatise on Invertebrate Paleontology*. Geological Society of America and University of Kansas, Part R., Arthropoda, **4** (1): R128-R191.
- TASCH P. (1987). — Fossil Conchostraca of the southern hemisphere and continental drift. *Geological Society of America Memoirs*, **165**: 1-290.
- VOLTZ W. (1837). — Notice sur le grès bigarré de la grande carrière de Sultz-les-Bains. *Mémoires de la Société d'Histoire naturelle de Strasbourg*, **2**: 14 p.
- VON ZIETEN C.H. (1833). — *Die Versteinerungen Württembergs*. Stuttgart (Zusammengestellt von C.H. Zieten): 453p.
- WANG S.E. & LIU S.W. (1980). — Fossil conchostracans. In: *Mesozoic Stratigraphy and Palaeontology of Shan-Gan-Ning Basin 2*. Geological Publishing House, Beijing: 84-110.
- WATERLOT G. (1934). — *Première Thèse.— Etude de la Faune continentale du Terrain houiller sarro-lorrain*. Thèse, Faculté des Sciences, Université de Lille (21 déc. 1934), Imprimerie L. Danel, Lille : 317 p., 66 fig., 25 pl. [publiée : Bassin Houiller de la Sarre et de la Lorraine. II. Faune fossile. Etude de la faune continentale du terrain houiller sarro-lorrain. *Etudes des Gîtes et Minéraux de la France, Min. Trav. Publics*, 1934].
- ZHANG W.T., CHEN P.J. & SHEN Y.B. (1976). — *Fossil Conchostraca of China*. Science Press, Beijing: 325 p. [in Chinese].

ANNEX: SYSTEMATIC INDEX (in alphabetical order)

<i>Anomalonema reumauxi</i> (PRUVOST, 1911)	P. 121	<i>Endolimnadiopsis eichwaldi</i> (NECHAEV, 1894) emend. SHEN, 1985	P. 121
<i>Aquilonoglypta ardua</i> NOVOZHILOV, 1958b	P. 127	<i>Estheria bethunensis</i> DEFRETIN, 1953	P. 120
<i>Belgolimnadiopsis stockmansi</i> (MAILLIEUX, 1939) emend. NOVOZHILOV, 1958a	P. 121	“ <i>Estheria</i> ” <i>destombesi</i> DEFRETIN, 1950b	P. 123, 124
<i>Concherisma tomensis</i> NOVOZHILOV, 1958b	P. 126	<i>Estheria laxitexta</i> (JONES, 1878)	P. 126
<i>Cornia sibirica</i> (NOVOZHILOV, 1958a) emend. DEFRETIN-LEFRANC, 1965	P. 123	<i>Estheria minuta</i> ALBERTI VON ZIETEN, 1833	P. 125
<i>Cycladestheria simoni</i> (PRUVOST, 1911)	P. 125	<i>Estheria ricouri</i> DEFRETIN, 1950b	P. 125
		<i>Estheria stockmansi</i> MAILLIEUX, 1939	P. 121

<i>Estheriina bethunensis</i> (DEFRETIN, 1953)	P. 120	<i>Palaeoestheria evenkiensis</i> (NOVOZHILOV, 1958b)	P. 124
<i>Euestheria bourozi</i> DEFRETIN-LEFRANC, 1970	P. 124	? <i>Palaeolimnadia rogeri</i> NOVOZHILOV, 1958b	P. 121
<i>Euestheria evenkiensis</i> (LYUTKEVITCH, 1938)	P. 124	<i>Palaeolimnadiopsis albertii</i> VOLTZ, 1837	P. 121
<i>Euestheria minuta</i> (VON ZIETEN, 1833) RAYMOND, 1946	P. 125	<i>Palaeolimnadiopsis brevis</i> NOVOZHILOV, 1958a	P. 121
<i>Euestheria ricouri</i> (DEFRETIN, 1950b)	P. 125	<i>Palaeolimnadiopsis eichwaldi</i> (NECHAEV, 1894)	P. 121
<i>Euestheria simoni</i> (PRUVOST, 1911) PRUVOST, 1919	P. 125	<i>Palaeolimnadiopsis kouznetskensis</i> DEFRETIN-LEFRANC, 1965	P. 121
<i>Eulimnadia rogeri</i> NOVOZHILOV, 1958b	P. 121	<i>Pemphicyclus arngastachi</i> NOVOZHILOV, 1946	P. 128
<i>Fernandoalmeidium flavioi</i> NOVOZHILOV, 1958c	P. 130	<i>Polygrapta chatangensis</i> NOVOZHILOV, 1946	P. 127, 128
<i>Gabonestheria sibirica</i> NOVOZHILOV, 1958a	P. 123	<i>Polygrapta laptevi</i> NOVOZHILOV, 1946	P. 128
<i>Glyptoasmussia quadrata</i> NOVOZHILOV, 1958b	P. 126	<i>Polygrapta multinstita</i> NOVOZHILOV, 1946	P. 128
<i>Hemicycloleaia baentschiana</i> (BEYRICH, 1864) RAYMOND, 1946	P. 129	<i>Polygrapta necta</i> NOVOZHILOV, 1946	P. 128
<i>Hemicycloleaia kamaensis</i> NOVOZHILOV, 1956	P. 129	<i>Pseudestheria borisi</i> DEFRETIN-LEFRANC, 1965	P. 127
<i>Hemicycloleaia kuzedeica</i> NOVOZHILOV, 1956	P. 129	<i>Pseudestheria hersinensis</i> DEFRETIN-LEFRANC, 1970	P. 127
<i>Hemicycloleaia securiformis</i> NOVOZHILOV, 1956	P. 129	<i>Pseudestheria tatarimensis</i> DEFRETIN-LEFRANC, 1965	P. 127
<i>Keratestheria bukaczacziensis</i> CHERNYSHEV, 1948	P. 122	<i>Pseudestheria tungussensis</i> (LYUTKEVICH, 1938) emend. DEFRETIN-LEFRANC, 1965	P. 127
<i>Keratestheria kusumii</i> NOVOZHILOV, 1958a	P. 123		
<i>Keratestheria magna</i> CHERNYSHEV, 1948	P. 122, 123	“ <i>Pseudoasmussia</i> ” <i>striata</i> (MÜNSTER IN GOLDFUSS, 1826) emend. DEFRETIN-LEFRANC, 1970	P. 128
<i>Keratestheria rugosa</i> CHERNYSHEV, 1948	P. 123	<i>Rossolimnadiopsis marlierei</i> NOVOZHILOV, 1958a	P. 121
<i>Keratestheria tumida</i> CHERNYSHEV, 1948	P. 123	<i>Sphaerograpta dechaseauxae</i> NOVOZHILOV, 1958b	P. 128
<i>Laxitextella laxitexta</i> (JONES, 1878) emend. KOZUR, 1982	P. 126	<i>Taimyrites strachovi</i> NOVOZHILOV, 1958b	P. 126
<i>Leaia baentschi</i> BEYRICH, 1864	P. 129	<i>Teixeirium rossicum</i> NOVOZHILOV, 1958c	P. 129
“ <i>Lioestheria</i> ” <i>propinqua</i> NOVOZHILOV, 1958b	P. 124	<i>Ulugkemia borisi</i> NOVOZHILOV, 1959	P. 123
“ <i>Lioestheria</i> ” <i>toricata</i> (NOVOZHILOV, 1946)	P. 124		

LISTE DES MEMBRES DE LA SOCIETE GEOLOGIQUE DU NORD

Arrêtée au 10 novembre 2015, établie par Alain BLIECK & Fabien GRAVELEAU

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, paléontologue, chercheure émérite, Université Catholique de Lille – FLST & ISA, Lille (59)

ROBASZYNSKI Francis, géologue, professeur honoraire, Polytech'Mons, Mons (Belgique)

Membres titulaires / personnes morales

ADREMAP, Association pour le Développement, la Recherche et l'Etude en matière de Minéralogie, Archéologie et Paléontologie (amateurs), Grande Synthe (59)

AGEOL, Association Géosciences de Lille 1 (étudiants), Villeneuve d'Ascq (59)

APBG, Association des Professeurs de Biologie et Géologie (enseignants du second degré), Sibiville (62)

CHARLEMAGNE Jean-Marc, Directeur de l'eau, Société des Eaux du Nord (Lyonnaise des Eaux), Lille (59)

PONCELET Benoît, directeur du Conseil d'Architecture, d'Urbanisme et de l'Environnement (CAUE) du Nord, Lille (59)

Membres titulaires / personnes physiques

AMBERG Chloé, doctorante, UFR Sciences de la Terre, Université Lille 1, Villeneuve d'Ascq (59)

AMEDRO Francis, professeur Sciences de la vie et de la Terre, Calais (62)

AUGUSTE Patrick, paléontologue-archéozoologiste, chargé de recherche CNRS, UMR 8198 Evo-Eco-Paléo, UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)

AVERBUCH Olivier, géologue structuraliste, maître de conférence, UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)

BAILLON Christophe, ingénieur, Lille (59)

BALESCU Sanda, maître de conférence, UFR Géographie et Aménagement, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)

BECKARY Sophie, Service du développement durable, Ville de Lille (59)

BERNARD Renaud, étudiant, UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)

BERREHOUC Géraldine, géologue, Responsable Risques Naturels, SEMOFI, Archamps (74)

BEUN Noël, maître de conférence retraité, Université de Picardie Jules Verne, Amiens (80)

BLANDIN Marie-Christine, sénatrice du département du Nord, Ronchin (59)

BLIECK Alain, paléontologue, directeur de recherche émérite au CNRS, UMR 8198 Evo-Eco-Paléo, UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)

BOITEL Laurence, professeure agrégée de lettres, Villeneuve d'Ascq (59)

BONAVENTURE Maryse, professeure Sciences de la vie et de la Terre retraitée, Berck-s/Mer (62)

BONAVENTURE Patrick, pharmacien retraité, Berck-s/Mer (62)

BOUCHAIN Judith, ingénieure géologue (mines et carrières), Eiffage, Machemont (60)

BOUSSIN Jean-Marie, géologue responsable Bureau d'Etude SEISM (59)

BOUTON Pascal, géologue, gérant d'Oolite SARL, Monnières (44)

BRETON Gérard, conservateur du patrimoine retraité, Le Havre (76)

BROQUET Paul, professeur honoraire, Université de Franche-Comté, Besançon (25)

BUDZIK Edmond, consultant, directeur de société Schistes du Nord et du Pas-de-Calais (SNPC), Givenchy-en-Gohelle (62)

CADART Raoul, professeur de SVT retraité, Roellecourt (62)

CAPETTE Ludovic, Namur (Belgique)

CHARLET Jean-Marie, professeur émérite, Polytech'Mons, Mons (Belgique)

COEN-AUBERT Marie, chercheuse, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (IRSNB), Bruxelles (Belgique)

COULON Annie, professeure des écoles, Chérens (59)

COULON Hervé, géologue, Département Risques et Développement des Territoires - CEREMA - Direction Territoriale Nord Picardie (ex CETE Nord-Picardie), Sequedin (59)

CREPIN Benoît, étudiant, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)

CUIR Pierre, professeur agrégé honoraire de SVT, Ronchin (59)

CUVELIER Jessie, ingénieure d'étude CNRS, UMR 8198 Evo-Eco-Paléo, UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)

DANELIAN Taniel, paléontologue, professeur, UMR 8198 Evo-Eco-Paléo, UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)

DE BAERE Jean-Pierre, géologue, ex-Chef du Groupe Géotechnique du Laboratoire Régional de Lille, retraité du Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE) Nord-Picardie, Lambersart (59)

† DELMER André, Ancien ingénieur au Corps des Mines (Belgique), Directeur honoraire du Service Géologique de Belgique, Bruxelles (Belgique)

DEROO Gérard, L'Etang La Ville (78)

DESCHODT Laurent, géoarchéologue, Mons-en-Barœul (59)

DE WEVER Patrick, professeur (patrimoine géologique), Département Histoire de la Terre, Muséum national d'Histoire naturelle, Paris (75)

DEZWARTE Jean-Marie, hydrogéologue retraité du BRGM, Marcq-en-Barœul (59)

DUCHAUSOIS François, professeur de SVT retraité, Neuville-Saint-Amand (02)

- DUPUIS Christian, géologue, professeur, Polytech'Mons, Mons (Belgique)
- EL KHATTABI Jamal, maître de conférence, Polytech'Lille (géologie de l'ingénieur), vice-président Université de Lille – Sciences et technologies (délégué vie étudiante), Villeneuve d'Ascq (59)
- FAÏ-GOMORD Ophélie, ingénieure géologue, Wezembeek-Oppen (Belgique)
- FERRANDON Alain, retraité, Paris (75)
- GAYOT Philippe, Conservateur du patrimoine, président de l'Association des Conservateurs des Musées du Nord – Pas-de-Calais, La Madeleine (59)
- GIGAUX Alain, professeur de SVT retraité, vice-président de l'APBG, Sibiville (62)
- GOEMAERE Eric, géologue, Service Géologique de Belgique, Bruxelles (Belgique)
- GOMEZ Gustave, retraité, membre de la FFAMP, Calonne-sur-la-Lys (62)
- GOURVENNEC Rémy, paléontologue, chargé de recherche CNRS, Université de Bretagne Occidentale, Brest (29)
- GRAVELEAU Fabien, géologue, maître de conférence, UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)
- GUILLOT François, chercheur associé, UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)
- GUYETANT Gaëlle, géologue, 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-sur-Mer (62)
- HENNION Marie, technicienne, Biogéosciences, Université de Bourgogne, Dijon (21)
- HUBERT Benoit, maître de conférence, Université Catholique de Lille – FLST & ISA, Lille (59)
- † HUVELIN Paul, Naix aux Forges (55)
- JULLIEN Claire, ingénieure hydrogéologue, Antea Group, Lezennes (59)
- Famille LALLEMAND Thomas, designer, Marcq-en-Barœul (59)
- LASSERRE Emilie, jardinière et animatrice, Association la Maison du Jardin, Roubaix (59)
- LAUWERS Alain, géologue, société Lhoist, Bouge (Belgique)
- LAVEINE Jean-Pierre, professeur de paléobotanique, retraité de l'Université de Lille – Sciences et technologies, conservateur universitaire au Musée d'Histoire Naturelle, Lille (59)
- LECAILLE Sybil, professeure de SVT, Néchin (Belgique)
- LEGRAND Jean-Marc, retraité, Cappelle-Brouck (59)
- LEGRAND Marie-France, retraitée, Cappelle-Brouck (59)
- LEGRAND Philippe, ingénieur, docteur d'université, Lempdes (63)
- LEGRAND Philippe, ingénieur géologue, retraité Exploration pétrolière, Gradignan (33)
- LEGRAND-BLAIN Marie, paléontologue, retraitée de l'université (ex-Universités d'Alger, Pau et Bordeaux 3), Gradignan (33)
- LEMOINE Guillaume, géologue et écologue, Etablissement Public Foncier du Nord – Pas-de-Calais, EurLille (59)
- LEPLAT José, géologue, retraité du BRGM, Linselles (59)
- LESAGE Francis, retraité de l'Education nationale, membre de l'Association Echinologique et de la FFAMP, Steenwerk (59)
- LOONES Christian, paléontologue, retraité du secteur hospitalier, Loos (59)
- MAILLET Sébastien, A.T.E.R. UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)
- MAITTE Bernard, historien des sciences et cristallographe, professeur émérite, UFR de Physique, Université Lille 1, Villeneuve d'Ascq (59)
- MANIA Jacky, professeur honoraire, Polytech'Lille, Villeneuve d'Ascq (59)
- MARECHAL Christine, professeure des écoles, Coudekerque-Branche (59)
- MATRION Antoine, chargé de mission patrimoine, PRES Université Lille Nord de France, Lille (59)
- MATRION Bertrand, paléontologue, Association Géologique Auboise, Pont-Sainte-Marie (10)
- MAURIAUD Pierre, géologue, General Manager Xuancheng Shale Gas Project, Total (China), Nanjing (Chine)
- MAVEL Joris, hydrogéologue, chef de projet, ICEA, Besançon (25)
- MEILLIEZ Francis, géologue, professeur émérite, UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d'Ascq (59)
- MISTIAEN Bruno, paléontologue, professeur émérite, Université Catholique de Lille – FLST & ISA, Lille (59)
- MONNET Claude, paléontologue, ingénieur de recherche, UMR 8198 Evo-Eco-Paléo, UFR Sciences de la Terre, Université Lille 1, Villeneuve d'Ascq (59)
- MORTIER Thierry, Polytech'Mons, Mons (Belgique)
- MOULLET Jean-Marc, La Madeleine (59)
- NICOLLIN Jean-Pierre, paléontologue, professeur, Université Catholique de Lille, Groupe ISA, Lille (59)
- NICOLLIN Sylvie, professeure de SVT, La Madeleine (59)
- NODIN Sabine, étudiante en Master Sciences de l'Antiquité, Université de Lille – Sciences humaines et sociales, Villeneuve d'Ascq
- NOLF Dirk, chef de travaux honoraire, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (IRSNB), Sint-Andries (Belgique)
- NUTTEN Claire, sans profession, Spycker (59)
- NUTTEN Jean-Marc, instituteur spécialisée, Spycker (59)
- OUALI MEHADJI Abdelkader, enseignant-chercheur, Université d'Oran (Algérie)
- OUDOIRE Thierry, conservateur du patrimoine, Musée d'Histoire Naturelle, Lille (59)
- PAMART Laëticia, enseignante, Jolimetz (59)
- PENISSON Jean-Pierre, président de la Société d'Histoire Naturelle des Ardennes, Bogny-s/Meuse (08)
- PICHARD Olivier, directeur d'étude Biodiversité au CEREMA (Centre d'Etudes et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement), Saint-André-lez-Lille (59)
- PICKAERT Ludivine, responsable du Service Ressource en Eau - NOREADE, Bourghelles (59)
- PINTE Emilie, enseignant-chercheur, Université Catholique de Lille, Groupe ISA, Lille (59)

- PINTE Pierre, géologue, responsable Q.S.E. Carrières, Eiffage Travaux Publics Est, Noyelles-Godault (62)
- POTY Edouard, géologue, professeur, Département de géologie, Université de Liège, Sart Tilman (Belgique)
- PRUDHOMME Agnès, PRAG (professeure agrégée), UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d’Ascq (59)
- QUESNEL Bernard, retraité de l’enseignement technique, Calais (62)
- REYNAUD Jean-Yves, professeur, UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d’Ascq (59)
- RICOUR Jean, ingénieur géologue, retraité du BRGM, Marseille (13)
- ROBERT Nicolas, chargé d’étude géotechnique, St Quentin (02)
- ROBITAILLE Yves, ingénieur géologue, Groupe Carrières du Boulonnais, Ferques (62)
- ROHART Jean-Claude, retraité de l’enseignement du second degré (professeur de SVT), Dunkerque (59)
- ROUGE Jacques, géologue, retraité de GDF Suez, Lompret (59)
- RUCAR Joaquim, professeur de SVT, Lille (59)
- † SARTENAER Paul, paléontologue, retraité, Institut Royal des Sciences Naturelles de Belgique (IRSNB), Bruxelles (Belgique)
- SCHIETTECATTE Jean, géologue pétrolier, retraité du Groupe Shell, Mouvaux (59)
- SCHRAEN Patrick, Villeneuve d’Ascq (59)
- SOMME Jean, professeur émérite, UFR Géographie et Aménagement, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d’Ascq (59)
- STYZA André, ingénieur automaticien, formateur au Campus Véolia Nord Europe, Lomme (59)
- SWIALKOWSKI Mickaël, professeur de SVT, Lesquin (59)
- TIEGHEM Gilbert, Watrelos (59)
- TRENTESAUX Alain, géologue, professeur, UFR Sciences de la Terre, Université de Lille – Sciences et technologies, Villeneuve d’Ascq (59)
- VACHARD Daniel, retraité du CNRS, Gruson (59)
- VANDENBERGHE Noël, géologue, professeur émérite, Katholieke Universiteit Leuven (Belgique)
- VANDYCKE Sara, géologue, professeure, Polytech’Mons, Mons (Belgique)
- VAN WELDEN Aurélien, Mouchin (59)
- VERGNE Virginie, maître de conférences, UFR de Géographie et Aménagement, Université Lille 1, Villeneuve d’Ascq (59)
- VERNIERS Jacques, paléontologue, professeur retraité de l’Université Gent (Belgique)
- VIDIER Diane, géologue, retraitée de la SNCF, Coulogne (62)
- VILAPLANA Françoise, retraitée, Hoymille (59)
- VILAPLANA José, retraité, Hoymille (59)
- VILLAIN Alain, “lithothécaire”, Président de “Escaut Vivant / Levende Schelde”, Valenciennes (59)
- VREULX Michel, professeur de SVT, Lille (59)
- YANS Johan, géologue, professeur, Département de géologie, Université de Namur (Belgique)
- ZERHOUNI Youssef, professeur, Faculté des Sciences Ben Msik, Université de Casablanca (Maroc)

ANNALES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

INSTRUCTIONS AUX AUTEURS

Ligne éditoriale

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

Informations générales

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

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

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

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

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

Structure et format des « manuscrits »

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

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
c/o Université Lille 1 – Sciences et Technologies
UFR des Sciences de la Terre, bâtiment SN5
F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France)
Directeur de la Publication : sgn-edition@univ-lille1.fr

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

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

Les articles sont rédigés en français ou en anglais de style scientifique. Les auteurs francophones se reporteront à l'ouvrage suivant : David L. 2011 – *Ecrire les sciences de la nature. Tout ce qu'il faut savoir pour rédiger mémoires, thèses & articles*. Vuibert et Soc. Géol. Fr. édit., coll. « Interactions » : 217 p. ; Paris. Les articles en français doivent respecter les règles du « **Lexique des règles typographiques en usage à l'Imprimerie nationale** » : <http://j.poitou.free.fr/pro/html/typ/resume.html>. Les articles en anglais pourront suivre les conseils de Lindemann & Cartwright (2000) : <http://www.skidmore.edu/~mmarx/sewid/geosci.htm>. Ils doivent comporter les rubriques suivantes :

- Titre en français ;
- Titre en anglais (traduction exacte) ;
- Prénom(s) et NOM(S) de(s) auteur(s) avec en appel (*) leur(s) adresse(s) professionnelle(s) et électronique(s) ;
- Résumé en français n'excédant pas 350 mots ;
- Abstract en anglais (traduction exacte) ;
- 5 mots clés en français ;
- 5 key words en anglais (traduction exacte) ;
- Texte de l'article avec la chronologie suivante des titres :

I. — INTRODUCTION ;

1) Historique ;

a) Premières études ;

éventuellement un paragraphe de remerciements mentionnant les rapporteurs.

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

- De même, dans le texte courant, les auteurs suggéreront l'emplacement souhaitable de leurs illustrations par la mention suivante, écrite **en rouge et gras** : **[Insérer ici Fig. X (ou Tabl. Y) sur 1 (ou 2) colonne(s)]**

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

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

NOM Initiale du prénom, 2^{ème} NOM Initiale du prénom, etc. (Année). — Titre. *Revue*, **Volume** [en gras] : pages.

NOM Initiale du prénom, 2^{ème} NOM Initiale du prénom, etc. (Année). — *Titre du livre ou du volume*. Collection [facultatif] ; Editeur, Ville : pages.

NOM Initiale du prénom, 2^{ème} NOM Initiale du prénom, etc. (Année). — Titre. *In* : NOM Initiale du prénom, 2^{ème} NOM Initiale du prénom, etc. (ed.), *Titre du livre ou du volume*. Collection [facultatif] ; Editeur, Ville : pages.

NOM Initiale du prénom, 2^{ème} NOM Initiale du prénom, etc. (Année). — Titre. *In* : NOM Initiale du prénom, 2^{ème} NOM Initiale du prénom, etc. (ed.), *Titre du volume ou du fascicule*. *Revue*, **Volume** [en gras] : pages.

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

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

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

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

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

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

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

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

Droits d'auteurs / copyright

Dans tous les cas, si une illustration comporte un ou des éléments d'origine extérieure à l'auteur (photo ou dessin repris d'un autre article par exemple), l'origine de cet élément ou de ces éléments doit être indiquée clairement (auteur, année, référence, éditeur, copyright, etc.). De la même façon, si un extrait de texte d'un autre article ou chapitre de livre ou article issu du World Wide Web est cité dans le texte, l'origine de cet extrait doit être indiquée clairement (auteur, année, référence, éditeur, copyright, etc.).

Pour de plus amples informations sur la réalisation technique d'un article, vous pouvez consulter le Directeur de la Publication : sgn-edition@univ-lille1.fr, qui transmettra à l'imprimeur.

Conditions de publication aux Annales

Un membre SGN doit être à jour de 3 années de cotisation + abonnement à la Société pour pouvoir soumettre un article aux *Annales* dans les conditions accordées aux membres. Une seule cotisation annuelle ne suffit pas. La franchise accordée annuellement est de 8 pages [texte, illustrations et bibliographie compris - une page complète des *Annales* comportant environ 8 200 caractères et espaces] pour les membres de la SGN à jour de leur cotisation + abonnement ; cette franchise peut être portée à 10 pages si plusieurs co-signataires de la même note sont membres de la Société (à jour de leur cotisation + abonnement). **Le prix de la page de dépassement (texte ou planche) en N&B est fixé à 10 €, et en couleurs à 25 €, avec une possibilité de réduction de la facturation au cas par cas, sur décision du Conseil d'administration (*).**

Pour les non-membres ou des personnes devenues membres depuis moins de 3 ans, s'il s'agit d'un article qui est sollicité dans le cadre, par exemple, d'une séance thématique de la SGN, une franchise de pages peut être accordée par le Conseil Scientifique et Editorial de la SGN au cas par cas, en fonction en particulier des possibilités financières de la Société. **Pour les non-membres, le prix d'une page de texte de dépassement (texte ou planche) en N&B aux *Annales* est de 20 €, et en couleurs de 50 €. (**)**

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

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

Pour toute question complémentaire, veuillez contacter le Directeur de la Publication : sgn-edition@univ-lille1.fr, ou le Président de la Société : sgn-president@univ-lille1.fr.

ANNALES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

INSTRUCTIONS TO AUTHORS

Scope of the journal

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

General information

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

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

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

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

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

Structure and format of the « manuscripts »

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

SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD
c/o Université Lille 1 – Sciences et Technologies
UFR des Sciences de la Terre, bâtiment SN5
F-59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France)
Directeur de la Publication : sgn-edition@univ-lille1.fr

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

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

Papers are to be written in simple, concise and scientific French or English. French authors should follow the following book: David L. 2011 – *Ecrire les sciences de la nature. Tout ce qu'il faut savoir pour rédiger mémoires, thèses & articles*. Vuibert et Soc. Géol. Fr. édit., coll. « Interactions » : 217 p. ; Paris. French papers must respect the rules of the « **Lexique des règles typographiques en usage à l'Imprimerie nationale** » : <http://j.poitou.free.fr/pro/html/typ/resume.html>. English papers could follow the instructions of Lindemann & Cartwright (2000) : <http://www.skidmore.edu/~mmarx/sewid/geosci.htm>. They should be organized as follows:

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

1. — INTRODUCTION ;

1) Historical context ;

a) First studies ;

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

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

- Authors will suggest the desirable location of their illustrations in the text by writing the following information, **in red bold characters** : [Insert here Fig. X (or Table Y) on 1 (or 2) column(s)]

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

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

NAME First name initial(s), 2nd NAME First name initial(s), etc. (Year). — Title. *Journal*, **Volume** [in bold] : pages.

NAME First name initial(s), 2nd NAME First name initial(s), etc. (Year). — *Book or issue title*. Collection [eventually]; Publisher, Town : pages.

NAME First name initial(s), 2nd NAME First name initial(s), etc. (Year). — Title. *In*: NAME First name initial(s), 2nd NAME First name initial(s), etc. (ed.), *Book or issue title*. Collection [eventually]; Publisher, Town : pages.

NAME First name initial(s), 2nd NAME First name initial(s), etc. (Year). — Title. *In*: NAME First name initial(s), 2nd NAME First name initial(s), etc. (ed.), *Book or issue title*. *Journal*, **Volume** [in bold] : pages.

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

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

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

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

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

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

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

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

Author's rights / copyright

In all cases, if an illustration includes one or several elements that are not from the author him(her)self (as, e.g., a photograph or a drawing copied after another paper), the origin of this element or these elements must be clearly indicated (author, year, reference, publisher, copyright, etc.). In the same way, if part of a text coming from another paper or chapter of a book or an article posted on the World Wide Web is cited in the text, the origin of this part must be clearly indicated (author, year, reference, publisher, copyright, etc.).

For more informations on the technical processing of a paper, please contact the Editor-in-chief: sgn-edition@univ-lille1.fr, who will transmit to the publisher.

Conditions for publishing in the Annales

To be subject to conditions applied to members of the Société Géologique du Nord, the author must have been a regular paying member (annual subscription to the Society + annual subscription to the *Annales*) for at least three years to be authorized to submit a paper to the *Annales*. A single yearly subscription is not enough. Under such conditions, each SGN member may publish a 8 page-long paper per year, free of charge [including text, illustrations and reference list — one full page of text of the *Annales* includes ca. 8200 characters and spaces]. In case of more than one author, and if at least two are SGN members (having paid their subscriptions to the Society and the *Annales*), the paper may be 10 page-long, free of charge. Each exceeding B&W page (either text or plate) is rated at 10 €, each exceeding colour page (either text or plate) is rated at 25 €. In case of too many pages, there is a possibility of a reduced rate after submission to and decision of the Executive Committee of the Society (*).

For non-members or colleagues who have been members for less than 3 years, if the submitted paper has been requested by the SGN (for instance in the frame of a thematic session), a set of free-of-charge pages may be offered by the SGN Scientific and Editorial Committee, according to the financial possibilities of the Society. For non-members, each exceeding B&W page (either text or plate) is rated at 20 €, each exceeding colour page (either text or plate) is rated at 50 €. (**)

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

(**) In case of a paper which has been asked for by the Society, and is more than the number of free-of-charge pages offered, part or whole of the extra-expenses may be paid by the Society. This is negotiable.

For any complementary question, please contact the Editor-in-chief: sgn-edition@univ-lille1.fr, or the President of the Society : sgn-president@univ-lille1.fr.

ANNALES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

POLITIQUE ET ÉTHIQUE ÉDITORIALES

Ligne éditoriale

Les *Annales de la Société Géologique du Nord* sont une revue annuelle consacrée à tous les aspects de la recherche en Sciences de la Terre (géosciences), à savoir les sciences qui traitent de la composition, de la structure, de l'histoire et de l'évolution de la Terre (s'appliquant à la fois aux environnements terrestres et marins) et des planètes, ce qui englobe l'enseignement et la recherche correspondants ainsi que les applications dans tous les domaines impliquant le sol et le sous-sol. Elle publie des résultats de recherche tant fondamentale qu'appliquée, consacrés en particulier au nord de la France et aux régions limitrophes telles que la Belgique, la Picardie, la Manche ... Cependant, des résultats issus d'autres régions françaises et d'autres pays y trouvent aussi leur place. Les *Annales* peuvent publier des fascicules thématiques sous la responsabilité d'un ou de plusieurs éditeurs invités.

Les *Annales* sont fondées sur le principe d'évaluation par les pairs (« *peer reviewed* »).

La Société s'interdit, de façon générale et dans ses publications en particulier, toute discussion ou dissertation politique, économique, philosophique ou religieuse.

Politique générale

Auteurs d'articles

Soumettre un article pour publication aux *Annales* implique que celui-ci n'ait pas été simultanément soumis à une autre revue. Les données présentées doivent être des résultats originaux n'ayant pas encore fait l'objet d'une publication dans une autre revue, un autre livre, voire un site du World Wide Web.

L'acceptation ou le rejet d'articles soumis pour publication aux *Annales* est du ressort du Conseil scientifique et éditorial (CSE) de la revue. Ce Conseil scientifique et éditorial est chargé : d'assister la Société dans sa politique scientifique ; et de seconder le Directeur de la publication dans toute décision de publication de projets d'articles (« manuscrits »). Il est composé des membres du Bureau en exercice de la Société (Président, Premier Vice-président, deux Seconds Vice-présidents, Secrétaire, Secrétaire-adjoint, Trésorier, Bibliothécaire, Directeur de la Publication) et de six Conseillers extérieurs choisis parmi les scientifiques français ou étrangers en Sciences de la Terre. Sur conseil du CSE, chaque article est évalué indépendamment par au moins deux relecteurs extérieurs (rapporteurs). En cas de sérieux différend, un troisième relecteur peut être sollicité. Depuis le tome 18 (2^e série – 2011) la liste des relecteurs des articles de chaque tome des *Annales* est publiée en tête du tome de l'année correspondante.

Un auteur qui n'est pas d'accord avec les commentaires ou les corrections demandées par les relecteurs peut l'expliquer dans un courrier adressé au Directeur de la publication. La décision finale d'acceptation ou de refus d'un article est de la responsabilité du Directeur de la publication. Un auteur qui ne serait pas d'accord avec cette décision peut contacter le Directeur de la publication et/ou les membres du CSE.

Les Instructions aux auteurs sont publiées dans chaque tome annuel des *Annales* et mises à jour régulièrement. Elles sont également publiées en ligne sur le site Web de la Société.

Relecteurs (rapporteurs)

Les instructions aux relecteurs sont explicitées dans le courrier (courriel) qui leur est envoyé au moment où ils sont sollicités par la revue d'une part, et dans le formulaire d'évaluation qui leur est envoyé en même temps que les fichiers de l'article à évaluer (fichier texte et fichiers des illustrations - figures, tableaux, planches, photographies) d'autre part. Il est demandé, dans ce formulaire, de fournir des évaluations précises sur l'article soumis ainsi qu'un commentaire général expliquant ces évaluations. Les relecteurs peuvent choisir d'être identifiés ou non auprès du ou des auteurs des articles soumis.

Tant que les articles soumis pour publication n'ont pas été revus, corrigés et acceptés par la revue, ils doivent être considérés comme confidentiels et ne sont pas susceptibles d'être diffusés en dehors du CSE.

A l'intention des lecteurs

Les lecteurs des articles des *Annales* doivent être avertis que les opinions exprimées par les auteurs d'articles sont de leur seule responsabilité. L'origine du financement des recherches dont les résultats sont publiés aux *Annales* est identifiée soit par l'intitulé de l'adresse des auteurs (université, établissement public scientifique ou technique, institution privée ...) soit dans le paragraphe de remerciements rédigé à la fin de chaque article (financements récurrents ou sur projets, contrats d'agences publiques ou privées, fondations, etc.).

Code d'éthique

Cadre général

Les *Annales* veillent à ce que soient respectées, dans ses colonnes, les règles généralement admises en matière d'éthique éditoriale scientifique. Une attention particulière doit être apportée aux comportements de plagiat et d'autoplagiat, qui consistent à reproduire tout ou partie du contenu d'un article déjà publié par un autre ou par soi-même – ces pratiques devant être bannies. Tout emprunt ou citation d'un ou plusieurs passages d'articles publiés, qu'ils soient de l'auteur ou d'autres chercheurs, doit être clairement identifié comme tel, et cité entre guillemets avec renvoi explicite à l'article ou aux articles d'origine.

La publication de résultats issus de recherches faites par des étudiants (en Master par exemple) ou des doctorants doit être soumise à l'accord de ceux-ci au cas où ils ne seraient pas coauteurs du ou des articles soumis.

La politique de confidentialité des données industrielles qui pourraient être publiées aux *Annales de la SGN* est de la responsabilité des auteurs et non de celle de la revue.

Le Directeur de la publication veille à ce que les relecteurs, aidés par le CSE, prennent en compte ces aspects de l'édition.

Les auteurs d'articles, les relecteurs, les éditeurs pourront s'inspirer du code et des avis du Comité d'éthique du CNRS (COMETS) : <http://www.cnrs.fr/comets/>

Poursuites

Il est du rôle du Directeur de la publication de dénoncer d'éventuelles dérives aux règles généralement admises en matière d'éthique éditoriale scientifique. Ceci peut être fait à chaque étape du processus d'édition : soumission des « manuscrits », évaluation par les relecteurs, acceptation ou rejet des articles soumis, prépresse, etc. Il ne suffit pas de rejeter un article où auraient été relevées de telles dérives. Le ou les auteurs doivent être directement interpellés. En cas de besoin, leur employeur doit être averti. Tout doit être mis en œuvre pour trouver une solution au problème de façon de préférence consensuelle.

Au cas où un article publié dérogerait à ces principes, il devra être retiré des supports de diffusion de la revue (versions papier, versions en ligne).

Aspects commerciaux

Des aides financières peuvent être apportées à la Société Géologique du Nord pour ses publications. Elles peuvent relever soit d'organismes publics soit de structures privées (associations, fondations, entreprises du secteur marchand...). Ces aides ne doivent en aucun cas influencer le processus d'édition des articles des *Annales* qui sont fondées sur le principe d'évaluation par les pairs. En cas de diffusion de tirés à part, soit sous forme imprimée, soit sous forme électronique (fichiers pdf), ceux-ci doivent être strictement conformes à leur version publiée dans les *Annales* – sauf si des corrections ultérieures, demandées par le ou les auteurs et/ou le Directeur de la publication, sont clairement identifiées.

Les auteurs, relecteurs, éditeurs et le Directeur de la publication doivent à tout moment du processus d'édition être capables de déclarer d'éventuels conflits d'intérêts avec tel ou tel aspect des articles soumis pour publication.

Autres éditions de la Société Géologique du Nord

Ces dispositions sont applicables à toutes les autres éditions de la SGN : *Mémoires*, *Publications*, livres édités ou coédités, et tout autre support de publication.

Comité d'éthique

En l'absence d'une structure nationale 'académique' d'éthique en matière d'édition scientifique (université, CNRS, Académie des Sciences, autre), les éventuelles dérives relevées au sein des *Annales de la Société Géologique du Nord* seront réglées en interne. Cependant, une concertation peut être engagée avec d'autres sociétés savantes dans le domaine des Sciences de la Terre et en particulier avec la Société Géologique de France (dont la SGN est partenaire), ceci afin d'aider les membres du CSE dans leur appréciation de faits problématiques.

N.B.- Le présent code de politique et éthique éditoriales s'inspire des recommandations du « *Code of Conduct* » du « *Committee on Publication Ethics* » (COPE) : <http://publicationethics.org>

Adopté par le Conseil d'administration de la SGN le 4 février 2015

ANNALES DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DU NORD

PUBLICATION POLICY AND ETHICS

Publication scope

The *Annales de la Société Géologique du Nord* is a yearly journal devoted to all aspects of Earth Sciences (Geosciences), that is, sciences that deal with composition, structure, history and evolution of the Earth (concerning both terrestrial and marine environments) and planets ; this includes both teaching and research as well as applied topics in all areas concerned with soils and the subsurface. It thus publishes results of research both in fundamental and applied geosciences, particularly on northern France and surrounding regions such as Belgium, Picardy, and the Channel. However, results from other French regions and from other countries are welcome. Thematic issues may be published under the responsibility of one or several guest editors.

The *Annales* are based upon the principle of peer-reviewed process of evaluation.

The Société Géologique du Nord does not accept submissions for publication, of any discussion or development in political, economic, philosophical or religious matters.

General policy

Relations with authors of papers

The submission of a paper to the *Annales* implies that it is not being simultaneously submitted for publication elsewhere. The data included in the paper must be original ones, having not been published in another journal, another book or volume, or in the World Wide Web.

Acceptance or rejection of papers that are submitted for publication in the *Annales* falls within the competence of the Scientific and Publication Committee ('Conseil scientifique et éditorial' or CSE). This Scientific and Publication Committee is in charge of assisting the Society in its scientific policy, and support of the Editor-in-chief ('Directeur de la publication') in his decisions concerning publication of submitted papers ('manuscripts'). It is composed of the members of the Executive Committee ('Bureau') of the Society (President, President elect, two Vice-Presidents, Secretary, Assistant Secretary, Treasurer, Librarian, Editor-in-chief) and six external Councillors chosen among French and foreign geoscientists. After advice of the Scientific and Publication Committee, each paper is independently evaluated by at least two external referees. If there is an important disagreement between both referees, a third referee will be requested. Beginning with volume 18 of the second series (2011), the list of referees of papers of each volume of the *Annales* is published.

If an author disagrees with the comments and corrections asked for by the referees, he (she) may express this disagreement in a letter to the Editor-in-chief. The final decision of acceptance or rejection of a paper falls within the responsibility of the Editor-in-chief. When an author disagrees with such a decision, he (she) may directly contact either the Editor-in-chief or members of the Scientific and Publication Committee.

Instructions to authors are published in each annual volume of the *Annales*. They are regularly updated. They are also published online on the SGN Web site.

Relations with referees (reviewers)

Instructions to referees are explained in the mail (e-mail) that is sent to them when they are requested for a review, and in the evaluation form that is sent together with the files of the paper to be evaluated (text and illustration files – figures, tables, plates, photographs). In the evaluation form, referees are asked to provide precise evaluations of the submitted paper as well as a general comment in order to explain the evaluation. Referees can choose to be identified or not by the author(s) of the submitted papers.

As long as the submitted papers have not been reviewed, corrected and accepted for publication, they must be considered as confidential and can not be distributed to anybody outside the Scientific and Publication Committee.

Relations with readers

Readers of papers and articles that are in the *Annales* should understand that the opinions which are expressed by the authors of papers are their own responsibility, and do not necessarily reflect those of the Society. The origin of funding of research whose results are published in the *Annales* is indicated either by the heading and address of the authors (university, scientific or technical public institution, private institution ...) or in the acknowledgment section at the end of each paper (regular funding, project funding, public or private institution contracts, foundations ...).

Ethical guide

General context

The *Annales* will ensure that research material they publish conforms to internationally accepted ethical guidelines. Special attention will be given to such behaviours as plagiarism and self-plagiarism that consist in reproducing all or part of the content of a paper that has already been published by somebody else or by the author himself (herself). Such practices must be banished. Each borrowing or citation of one or several parts of published papers, either of the author himself (herself) or of other authors, must be clearly identified as such, and must be cited between inverted commas with a clear reference to the original article(s).

Publication of results of research activities produced by students (Master students and Ph. D. students in particular) must have been agreed by the students themselves in case where they are not co-authors of the submitted paper(s).

The confidentiality policy for industrial data that might be published in the *Annales de la SGN* is the responsibility of the authors, and not of the journal.

The Editor-in-chief will ensure that the referees, helped by the Scientific and Publication Committee members, take these aspects of scientific ethics into account.

Authors of papers, referees and editors may be helped by following the recommendations of the CNRS Ethical Committee (COMETS): <http://www.cnrs.fr/comets/>

Pursuing misconduct

One job of the Editor-in-chief is to reveal possible lapses to internationally accepted ethical guidelines. This may be made during each step of the editing process : submission of paper, evaluation by the referees, acceptance or rejection of the paper, or preprint. To reject a paper where such lapses have been observed is not sufficient. The author(s) must be directly questioned. In case of need, their employer must be made aware of the lapse. Preferably all procedures should be considered in order to find a consensus solution to the problem.

In the case that a published paper appears to not respect these principles, it will be deleted from the various means of distribution of the journal, either its printed or its online version.

Commercial considerations

Financial supports may eventually be given to the Société Géologique du Nord for its publications. They may come from either public institutions or from private structures such as associations, foundations, or enterprises of the commercial or industrial sector. In no case should these supports be allowed to influence the editorial process of the articles in the *Annales*, which are based upon a peer-reviewed procedure. In the case of distribution of separates, either as printed papers or as electronic files (pdf files), these must be strictly identical to their published version in the *Annales* – except if later, clearly identified corrections have been made after a query by either the author(s) or the Editor-in-chief.

The authors, referees, editors and the Editor-in-chief have to be able, at any stage of the editorial process, to declare a possible conflict of interest with any part of the submitted papers.

Other editions of the Société Géologique du Nord

The present guidelines are applicable to all the other SGN editions, i.e., *Memoirs*, *Publications*, edited or co-edited books, and any other mean of publication.

Ethics Committee

In the absence of a national academic structure dedicated to ethical aspects of scientific editing (universities, CNRS, Academy of Sciences, other), possible deviations that could be observed in the *Annales de la Société Géologique du Nord* will be treated internally. However, a co-operation with other academic societies in geosciences, in particular with the Société Géologique de France which is a SGN partner, could be followed in order to help the Scientific and Publication Committee members evaluate problematic conducts.

N.B.- The present guidelines for a publication policy and ethics has greatly benefited from the recommendations of the *Code of Conduct* of the *Committee on Publication Ethics* (COPE) : <http://publicationethics.org>

Carried by the SGN Administrative Council on February 4th, 2015

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).

Chaque Tome ordinaire des <i>Annales</i> (dans la limite de disponibilité des anciens numéros)	10 €
La série complète des <i>Annales</i> (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)
8 € par Table

Les Tables générales n° 5 et 6 des *Annales*, des *Mémoires* et des *Publications* sont accessible en ligne en version numérique : <http://sgn.univ-lille1.fr/sgn.php?page=Publications> ; la Table 6 a été imprimée dans le Tome 20 (2013) des *Annales*.

N. B. - 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 16 (2^e série, 1991-2009) des *Annales*, et les tomes I (1876) à XVI (1983) des *Mémoires* sont numérisés et accessibles gratuitement en ligne sur le site IRIS (bibliothèque numérique en histoire des sciences de l'Université de Lille) aux adresses suivantes : <http://iris.univ-lille1.fr/handle/1908/32/browse> et <http://iris.univ-lille1.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>

Fascicules thématiques des Annales de la Société Géologique du Nord

<i>Constant Prévost – Coup d'œil rétrospectif sur la géologie en France pendant la première moitié du XIX^e siècle</i> , par GOSSELET J. (Ann. SGN, XXV : 346 p., 1896)	15 €
<i>Contribution à la connaissance des bassins paléozoïques du Nord de la France (avec l'Ecorché géologique infra-mésozoïque)</i> , par C.F.P.(M.), COPESEP & S.N.P.A. (Ann. SGN, LXXXV (3), 1965)	15 €
<i>Géologie du Nord de la France</i> (Ann. SGN, LXXXIX (1), 1969)	10 €
<i>Rapport des Travaux du Centenaire 1870-1970</i> (Ann. SGN, XC (4), 1970, publié 1971)	15 €
<i>Rupture des roches et massifs rocheux</i> (Ann. SGN, XCV (3), 1975)	10 €
<i>Données nouvelles sur le Paléozoïque de l'Europe occidentale</i> (Ann. SGN, XCVI (4) et XCVII (1), publié 1977)	15 €
<i>Apports récents à la géologie du Gondwana</i> (Ann. SGN, XCVII (4), 1977, publié 1978)	15 €
<i>Géologie de l'Europe, du Précambrien aux bassins sédimentaires post-hercyniens</i> (Ann. SGN, XCIX (1), 1979, publié 1980)	20 €
<i>Géologie appliquée aux problèmes d'énergie et de matières premières</i> (Ann. SGN, CII (2), 1982)	10 €
<i>Tectonique cassante en distension et coulissement</i> (Ann. SGN, CIII (2-3), 1983, publié 1984)	20 €
<i>Aspects de la géologie de l'Ardenne, hommage au Professeur Beugnies</i> (Ann. SGN, CV (2), 1985, publié 1986)	10 €
<i>Paléozoïque supérieur continental</i> (Ann. SGN, CVI (2), 1986, publié 1987)	15 €
<i>Actualisation de quelques thèmes géologiques – Conférences</i> (Ann. SGN, CVI (4), 1986, publié 1988)	10 €
<i>Aspects de la géologie du Gondwana</i> (Ann. SGN, CVII (1), 1987, publié 1988)	10 €
<i>Géologie et aménagement régional</i> (Ann. SGN, CIX (1-2), 1989, publié 1990)	15 €
<i>Le Nord et son environnement géologique</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 2 (1), publié 1993)	10 €
<i>Le Jurassique du Boulonnais</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 4 (4), 1996)	8 €
<i>Séance spécialisée - bassins houillers du nord de la France et du sud de la Belgique</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 5 (1), 1997)	8 €
<i>Dossier consacré au Dévonien de l'Ougarta (Sahara occidental, Algérie)</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 5 (2), 1997)	8 €
<i>La craie : objet géologique, réservoir, matériau et paysage</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 5 (3) et 5 (4), 1997)	15 €
<i>Colloque Artois-Brabant</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 6 (2), 1998)	8 €
<i>North Gondwana Mid-Palaeozoic Bioevent / Biogeography patterns in relation to crustal dynamics</i> (IGCP 421, Isfahan) (Ann. SGN, 2 ^e série, 7 (1) et 7 (2), 1999)	15 €
<i>2^e Journées Nationales du Patrimoine Géologique</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 7 (4), 2000)	15 €
<i>New systematic and palaeobiogeographic data from the Palaeozoic of Central Iran</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 8 (2), 2000)	8 €
<i>The Cambrian and Lower Ordovician of the southern Montagne Noire (Languedoc, France) – A synthesis for the beginning of the new century</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 8 (4), 2001)	8 €
<i>La nouvelle carte géologique de Marquise (Ed. 2000)</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 9 (1-2), 2002)	15 €
<i>Centenaire du Musée Gosselet</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 10 (2-3), 2003)	15 €
<i>Dossier spécial : Stratigraphie du Paléozoïque</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 11 (4), 2005)	8 €
<i>GeoReg – Géosciences des régions de France et des pays environnants</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 19, 2012)	35 €
<i>Les enjeux « naturels » du développement urbain (séance A. Bonte) & 6^e Table générale</i> (Ann. SGN, 2 ^e série, 20, 2013)	35 €

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'Anceins, 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 Gigantotraccés 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 €

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 Saravejo (Yougoslavie), 554 p., 21 pl., 1 carte hors texte. [**volume de texte épuisé ; carte disponible**] 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 méridionale (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 Houllier Sarro-Lorrain (Systématique – Stratigraphie) ; 2 vol., 480 p., 100 pl. 15,00 €
- Publication N° 11.** — B. MISTIAEN (1985) Phénomènes récifs 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). Evolution de la sédimentation et enseignements sur les événements anoxiques ; 614 p., 18 pl. 22,00 €
- Publication N° 26.** — T. PLETSCH (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. PELLENNARD (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 €

Des roches aux paysages dans le Nord – Pas-de-Calais – Richesse de notre patrimoine géologique (dans le cadre de l'Inventaire National du Patrimoine Géologique et de l'Année Internationale de la Planète Terre), par F. Robaszynski & G. Guyétant (coord., 2009), co-édition Conserv. Sites Natur. Nord & Pas-de-Calais & Soc. Géol. Nord **épuisé**

[ce livre ainsi que les autres publications de la SGN sont accessibles dans de nombreuses bibliothèques : bibliothèque de l'Université de Lille – Sciences et Technologies, de l'UMR 8198 du CNRS, bibliothèque de la Ville de Lille, au Conservatoire d'Espaces Naturels, à l'APBG, etc.]

(*) Veuillez noter que les prix ci-dessus sont TTC (TVA 5,50 % 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 le Trésorier, M. Thierry OUDOIRE : toudoire@mairie-lille.fr
Les commandes sont à envoyer à : Société Géologique du Nord, M. le Trésorier, c/o Université de Lille – Sciences et Technologies, UFR Sciences de la Terre, SN5, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex (France).
Le catalogue avec son bon de commande est téléchargeable sur le site Web : <http://sgn.univ-lille1.fr>

Obtenez vos résultats de datation
avant que votre projet ne se fossilise

BETA

Beta Analytic

Datation au radiocarbone
depuis 1979

- Délais de livraison à partir de 2 à 3 jours
- Réponses à vos questions sous 24 heures
- Résultats disponibles en ligne

Australia Brazil China India Japan Korea UK USA

www.radiocarbon.com

SOMMAIRE
Tome 22 (2^e série)
parution 2015

	Pages
Avant-propos : vie de la Société.....	1
La Société géologique du Nord il y a 50 ans.	7
JOURNEE « Ressource en eau du bassin Artois-Picardie » (3 décembre 2014)	
Francis MEILLIEZ, Jean PRYGIEL & Hervé COULON. — Etat des eaux et protection de la ressource dans le Bassin Artois-Picardie	11
Francis MEILLIEZ & Annick GEORGET. — Le citoyen consomm'acteur de l'eau	15
Ghislain de MARSILY. — L'eau, une ressource renouvelable convoitée et inégalement répartie	17
Frédéric DELAY & Philippe ACKERER. — La réduction des modèles hydrologiques pour des applications pratiques moins fastidieuses	29
JOURNEE « Géoarchéologie » (25 mars 2015)	
Laurent DESCHODT. — L'apport des opérations archéologiques à la connaissance du Pléistocène régional - Exemple des fonds de vallées du bassin français de l'Escaut	41
Sylvie COUTARD, Pierre ANTOINE, Emilie GOVAL, David HERISSON & Jean-Luc LOCHT. — Apports des opérations archéologiques à la connaissance du Pléistocène régional - Exemple de la couverture loessique du Nord de la France	57
Luc VALLIN & Bertrand MASSON. — Impact taphonomique des phénomènes périglaciaires - L'exemple des pipkrakes ou aiguilles de glace	59
Emmanuelle MARTIAL. — Les ressources en silex et en grès dans le Nord de la France - Exploitation au III ^e millénaire avant notre ère	61
Hélène COLLET — Les minières néolithiques de Spiennes - Modalités d'exploitation d'un gisement de silex exceptionnel du Bassin de Mons (Hainaut, Belgique)	63
Muriel BOULEN — Palynologie et géoarchéologie - Complémentarité pour la restitution des paléoenvironnements ..	65
Kai FECHNER. — L'évolution différentielle des sols et de l'érosion depuis 6 000 ans en Nord - Pas-de-Calais (France) et en moyenne Belgique - Etudes archéopédologiques appliquées aux suivis de fouilles préventives sur limons	67
Frédéric BROES, Viviane CLAVEL, Kai FECHNER, Yves CRETEUR, Guillaume HULIN, Cécile MAICHER & Matthieu LE BAILLY. — Environnement fonctionnel d'habitats anciens (néolithiques, protohistoriques, gallo-romains et médiévaux) du Nord de la France (Picardie, Nord - Pas-de-Calais) - Approche par la cartographie du phosphore	71
Murielle MEURISSE-FORT. — Géoarchéologie entre zones littorales et systèmes continentaux (Mer du Nord - Manche, Nord de la France)	73
Olivier COLLETTE. — La géoarchéologie en Wallonie	75
Denise BRICE. — Paul Sartenaer (1925 - 2015)	77
Jean-Marie CHARLET & Abdellah EL HAJI. — Evolution polyphasée du massif granitique de la Maladeta (Pyrénées centrales espagnoles) - Synthèse des données pétrographiques	85
Denise BRICE & Bernard MOTTEQUIN. — Un nuculinide (Brachiopoda, Rhynchonellida) nouveau de l'Emsien (Dévonien) du Massif armoricain (France)	93
Francis MEILLIEZ. — Paléoaltérations et paléomorphologies, des observations éphémères - Exemples autour de Fourmies (Nord)	101
Marie HENNION, Jessie CUVELIER, Oscar F. GALLEGRO, Thierry OUDOIRE & Daniel VACHARD. — Collections of the Natural History Museum of Lille. VIII. — Diplostraca (types and figured specimens)	109
Jessie CUVELIER, Marie HENNION, Oscar F. GALLEGRO & Daniel VACHARD. — Palaeontological collections of Lille 1 University. II. — Diplostraca (types and figured specimens)	119
Liste des membres de la Société géologique du Nord	135
Instructions aux auteurs / Instructions to authors	139
Code de Politique et éthique éditoriales / Code of Publication policy and ethics	143
Catalogue des éditions	147

© 2015 Société Géologique du Nord Editeur, Lille

Toute reproduction, même partielle, de cet ouvrage est interdite.

Une copie ou reproduction par quelque procédé que ce soit, photographie, microfilm, bande magnétique, disque ou autre, constitue une contrefaçon passible des peines prévues par la loi du 11 mars 1957 sur la protection des droits d'auteurs.

Imprimé en France (Printed in France)