Ann. Soc. Géol. du Nord.
T. 24 (2ème série), p. 33-41, Décembre 2017.

Séance « Bassin Minier du Nord - Pas-de-Calais »
(Lewarde, 8 février 2017)

PROJET DE MODELISATION EN 4-D DU BASSIN HOUILLER DU NORD – PAS-DE-CALAIS : DES TABLES DE VERRE DU MUSEE DE LILLE A UNE MODELISATION GEOMETRIQUE ET TECTONIQUE PAR ORDINATEUR

Project of 4-D modelling of the Nord – Pas-de-Calais coal basin: from the glass-tables of the Lille museum to a computer-based geometrical and tectonic modelling

par Fabien GRAVELEAU(*), Olivier AVERBUCH(*), Benoît CREPIN(*) & Thierry OUDOIRE(**)

Résumé. – La dynamique d'un front de chaîne de montagnes résulte d'interactions entre les processus de déformation (la tectonique) qui initient les reliefs et les processus de surface (l'érosion, la sédimentation, le climat) qui les détruisent. Souvent étudiée à partir d'exemples naturels récents, cette thématique est peu abordée sur des chaînes de montagnes anciennes. Dans le cadre de cet article, nous nous intéressons au Bassin Houiller du Nord-Pas-de-Calais, bassin d'avant-chaîne localisé au front Nord de la grande chaîne varisque, développée il y a environ 300 Ma. Il s'agit d'un objet géologique dont l'exploitation du charbon en a fait un objet industriel et sociétal singulier qui a façonné l'histoire régionale. Aujourd'hui, il s'agit d'un territoire en reconversion dont le développement s'inscrit dans la durabilité tant industrielle, économique, qu'écologique. Pour soutenir cette démarche, il est nécessaire d'améliorer les connaissances scientifiques et notre compréhension du sous-sol, notamment la géométrie des différents ensembles sédimentaires et des discontinuités qui les affectent. Dans cet article, nous exposons les premières étapes d'un projet plus vaste visant à reprendre les nombreuses données géologiques disponibles sur le bassin (forages, levés de galerie, imagerie géophysique) et d'en proposer une interprétation géologique intégrée dans un environnement en trois dimensions. La quatrième dimension (le temps) sera abordée par la restauration de coupes géologiques et la construction de modèles expérimentaux. L'enjeu est important car ce nouveau modèle du sous-sol pourra servir de support scientifique de base aux problématiques environnementales et énergétiques discutées en région (risques géologiques et environnementaux « après-mine », potentiel géothermique). Il fournira également un outil pédagogique précieux et inédit aux acteurs du développement régional et aux enseignants, leur permettant de mieux faire connaître ce bassin sur lequel vivent aujourd'hui 1,2 million d'habitants.

Abstract. – *The dynamics of mountain belt front results from interaction between deformation processes (tectonics) that create relief, and surface processes (erosion, sedimentation and climate) that destroy them. In the field, it has been studied on recent examples, but also on ancient ones. In this paper, we investigate the Nord-Pas de Calais coal basin, a portion of the northern foreland basin of the Palaeozoic variscan belt, which developed about 300 Myr ago. It represents a field case whose coal mining transformed it into an industrial and societal object that greatly influences the local history. Today, it is located in a reconverting territory whose development is planned for being economically, industrially and ecologically sustainable. To support this approach, it is necessary to improve the scientific knowledge and the understanding of the subsurface, in particular the geometry of the various sedimentary bodies and the faults that affect them. In this paper, we present the first steps of a larger project aimed at synthesizing the numerous geological data available on the basin (drilling, gallery surveys, geophysical imagery) and proposing a modern three-dimensional geological interpretation. The fourth dimension (time) will be implemented through geological cross-section restoration and physical modelling. The challenge is important because this new subsurface model can serve as a scientific support for environmental and energetic discussions that interest the Region (geological and environmental risks, geothermal potential). This will provide a valuable and unprecedented educational tool for regional actors and teachers, enabling them to better communicate about this area where 1.2 million people live.*

Mots-clés. – Chaîne varisque, bassin flexural, charbon, bassin minier, histoire de la géologie.
Key words. – *Variscan belt, flexural basin, coal, mining basin, history of geology.*

I. — INTRODUCTION

Un front de chaîne de montagnes correspond à la zone de transition entre les reliefs orogéniques où se développent les bassins versants et la plaine sédimentaire d'avant-pays qui réceptionne les particules érodées et transportées par les rivières (Fig. 1). Sa dynamique est le résultat d'interactions entre les processus de déformation (tectonique) qui soulèvent les reliefs et les processus de surface (érosion, sédimentation, climat) qui les abaissent (Malavieille, 2010). Ainsi, les paysages des

* Univ. Lille, CNRS, Univ. Littoral Côte d'Opale, UMR 8187, LOG, Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences, F-59000 Lille, France ; Fabien.Graveleau@univ-lille1.fr ; Olivier.Averbuch@univ-lille1.fr ; benoit.crepin@me.com.
** Musée d'Histoire Naturelle de Lille, 19 rue de Bruxelles, F-59000 Lille ; toudoire@mairie-lille.fr

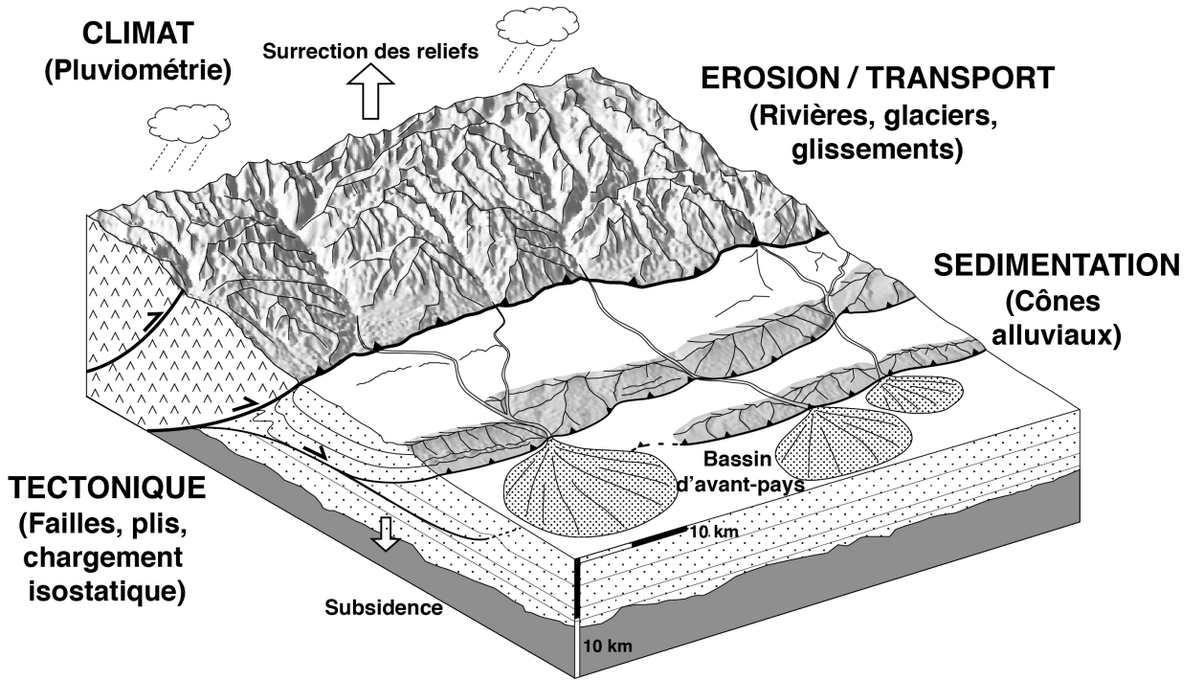

Fig. 1. — Dynamique d'un front de chaîne de montagnes (d'après Graveleau, 2008). Elle résulte d'interactions entre les processus tectoniques (failles, plis) qui déforment les roches et créent du relief et les processus de surface (climat, érosion, transport, sédimentation) qui les détruisent.

Fig. 1. — Dynamics of mountain belt front (after Graveleau, 2008). It results from interaction between tectonic processes (faulting, folding) that deform rocks and create relief and surface processes (climate, erosion, transport, sedimentation) that destroy them.

chaînes de montagnes traduisent les influences mutuelles entre ces processus (Delcaillau, 2004; Graveleau, 2008). De la même façon, le bassin sédimentaire fournit un archivage des évolutions des flux de sédiments qui ont été produits (Métivier *et al*., 1999). Une lecture de leur âge et de leur géométrie permet souvent de renseigner la dynamique morpho-sédimentaire du bassin ainsi que les périodes d'activité des structures tectoniques qui le contrôlent.

La dynamique des reliefs orogéniques et de leurs bassins périphériques est aussi bien explorée sur des cas d'étude récents (Alpes, Pyrénées, Himalaya, Andes, Taiwan) qu'anciens (Appalaches, Montagne Noire). Pour les premiers, les exemples sont nombreux et accessibles à l'observation, ce qui permet de quantifier les processus et mécanismes orogéniques à l'œuvre. Pour les seconds, les exemples sont notablement moins courants parce que plus compliqués, parfois enfouis et moins documentés (Franke *et al*., 2000 ; Lacquement *et al*., 2005 ; Malavieille, 2010 ; Meilliez, 1989). Dans le nord de la France, le Bassin Houiller du Nord – Pas-de-Calais (BHNPC), enfoui sous une centaine de mètres de couverture méso-cénozoïque (Fig. 2), correspond au bassin flexural du front nord de l'ancienne grande chaîne de montagnes varisque qui structurait l'Europe à la fin du Paléozoïque (par ex. Le Gall, 1994 ; Matte, 1986). Ce bassin réceptionnait au Carbonifère les produits de l'érosion de la chaîne et a permis la préservation de strates de charbon, lesquelles témoignent du climat tropical et de la riche végétation de l'époque (par ex. Bouroz, 1969). D'orientation est-ouest, ce bassin flexural se poursuit vers l'est en Belgique (Hainaut) et jusqu'en Allemagne (Ruhr) (par ex. Delmer, 1997 ; Drozdzewski, 1993).

La compréhension de la géométrie en 3 Dimensions du BHNPC a fait l'objet d'une première synthèse lors de la construction de huit « tables de verre » destinées au Musée Houiller de Lille (Küss, 1905). Au milieu des années 1960, une nouvelle synthèse a mis à jour ce modèle en éditant une série de coupes structurales basées notamment sur les archives de forages et de relevés *in situ* (Bouroz *et al*., 1963). Une analyse fine de ces coupes démontre leur insuffisance au regard des progrès réalisés depuis en géologie structurale, par exemple en ignorant le principe de l'équilibrage / restauration des coupes (Dahlstrom, 1969 ; Elliott, 1983) ou encore les mécanismes d'inversion tectonique (Cooper & Williams, 1989). La dernière synthèse géologique sur le BHNPC (Becq-Giraudon, 1983) n'a pas modifié ces coupes géologiques en dépit des nouvelles données acquises jusqu'à la fin de l'exploitation. Le constat est donc simple : la vision structurale que l'on a sur la géométrie du Bassin Houiller date des années 1960. Elle nécessite une révision majeure intégrant : 1) les nouvelles données géologiques acquises après 1963 ; 2) les concepts d'équilibrage et d'inversion tectonique établis dans les années 1970 et 1980.

Ce projet d'envergure, dont cet article se présente comme une pierre fondatrice, a pour objectif de comprendre comment le BHNPC a enregistré dans ses structures et son histoire sédimentaire l'évolution de la déformation au front de la chaîne

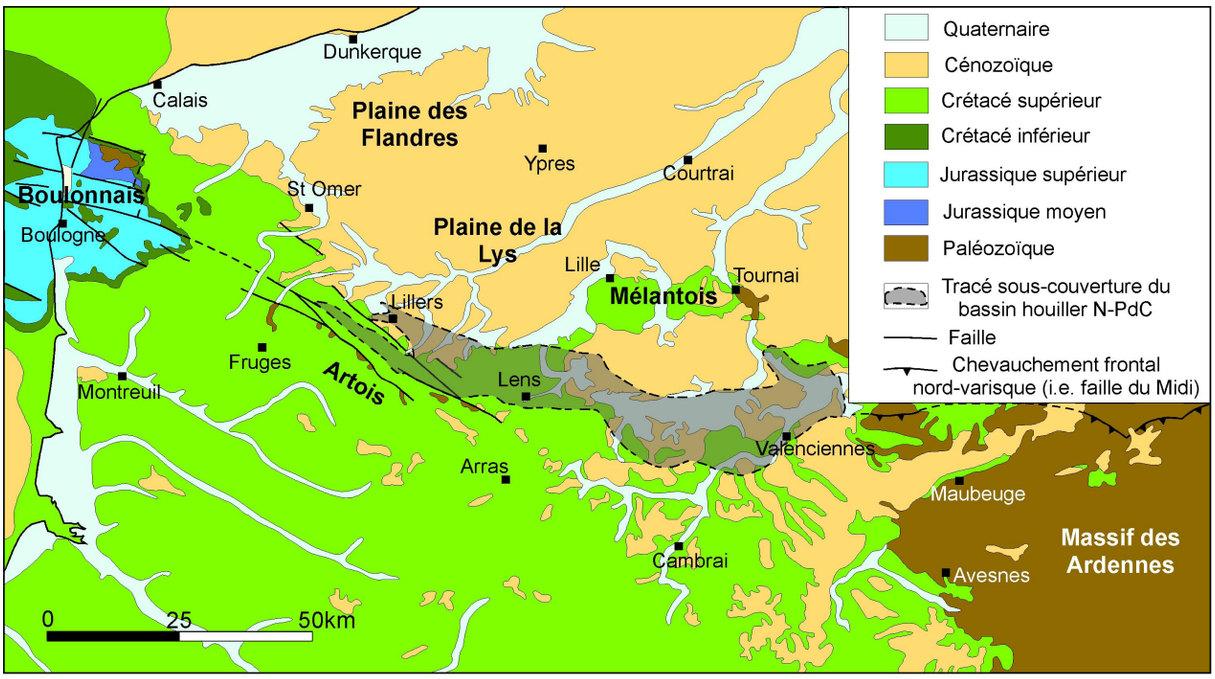

Fig. 2. — Localisation du Bassin Houiller (zone grisée) du Nord – Pas-de-Calais sur la carte géologique simplifiée du Nord de la France et de la Belgique (modifié de Lacquement *et al*., 2004 et Minguely, 2007).

Fig. 2. — Location of the Nord – Pas-de-Calais coal basin (shaded area) on a simplified geological map of northern France and Belgium (modified after Lacquement et al.*, 2004 and Minguely, 2007).*

varisque. Pour cela, l'approche proposée repose sur trois outils : 1) la confection d'une base de données complète référençant les données géologiques existantes sur ce bassin, 2) la réalisation d'un modèle 3-D de la géométrie du bassin, et 3) la réalisation de modélisation expérimentale en laboratoire. Par cela, nous souhaitons apporter des éléments de réponse aux questions suivantes :

- 60 ans après la dernière synthèse structurale sur le BHNPC, quelle vision actuelle peut-on en proposer en intégrant la totalité des données géologiques et géophysiques disponibles et les nouveaux outils logiciels à disposition ?

- Que nous dit cette géométrie sur l'histoire géologique de la chaîne varisque et sur les mécanismes de développement de son front nord ?

L'enjeu appliqué de ce travail est d'apporter une meilleure connaissance du sous-sol du territoire des Hauts-de-France, préambule incontournable à une réflexion éclairée et durable du développement économique et écologique de la région. Dans le cadre de cet article, nous relatons les premiers résultats méthodologiques obtenus suite à la mise en place progressive d'une base de données 3-D référençant les principales données scientifiques (cartes et sondages) sur le Bassin Houiller. Cet article ne présente donc pas en soi de véritables résultats scientifiques nouveaux et ambitionne simplement de relater la démarche initiée depuis quelques années au sein du Laboratoire d'Océanologie et de Géosciences de l'Université de Lille sur cet exemple géologique régional singulier. Cet article s'organise donc autour d'un bilan des avancées du projet de modélisation 3-D de la géométrie du bassin en partant des objets muséographiques les plus anciens (les « tables de verre » du Musée de Lille), leur mise en perspective par ordinateur et en arrivant jusqu'à une ébauche d'actualisation des coupes du bassin.

II. — LES « TABLES DE VERRE » DU MUSEE HOUILLER DE L'UNIVERSITE DE LILLE

A la suite de la création de la Faculté des Sciences de Lille en 1854, celle-ci se voit dotée en 1857 d'une chaire de géologie, dont l'un des premiers titulaires est Jules Gosselet (Thiébault, 2010). En 1902, le Musée Gosselet de Géologie et de Minéralogie est inauguré et rassemble plus de 100 000 roches, minéraux et fossiles collectés sur le terrain depuis 1865 (Cuvelier et Oudoire, 2017). En 1902, Charles Barrois succède à J. Gosselet et devient titulaire de la chaire de géologie. Avec M. Bayet, directeur de l'enseignement supérieur et représentant le ministre de l'instruction publique, il inaugure en 1907 le Musée Houiller de l'Université de Lille (Dhainaut, 2007). L'objectif de ce musée était d'aider les ingénieurs des fosses à déterminer les roches issues des sondages et à comprendre la géométrie des couches du sous-sol. Parmi les nombreux documents et outils qu'il proposait, huit « tables de verre » ornaient le hall de la salle d'exposition (Fig. 3).

Sur le modèle des expositions universelles parisiennes de 1889 et 1900, Arras organise en 1904 l'exposition régionale du Nord de la France. Afin de mettre alors en évidence les progrès réalisés par l'agriculture et les diverses industries du Nord de la France, une place importante est laissée aux compagnies houillères, alors fleuron industriel de la région. Le Service des Mines et les Compagnies des Houillères préparent alors un plan du Bassin Houiller au 1/7 500, accompagné de coupes sur verre, organisées en deux vitrines, et les présentent au pavillon des

Fig. 3. — Hall d'entrée de l'ancien Musée Houiller de l'Université de Lille. Au premier plan, les huit « tables de verre » représentent chacune les connaissances géologiques d'une portion géographique du Bassin Houiller du Nord – Pas-de-Calais (extrait de « Lille et la région du Nord en 1909 », Lille, Imprimerie Danel).

Fig. 3. — Main entrance hall of former Coal Museum of Université de Lille. In the foreground, the eight glass-tables represent the geological knowledge of a portion of the coal basin (extracted from « Lille et sa région du Nord en 1909 », Lille, Imprimerie Danel).

Mines du Pas-de-Calais (Küss, 1905). Ces coupes rencontrent un vif intérêt chez les visiteurs de l'exposition et notamment chez Charles Barrois. Celui-ci songe alors à en installer une reproduction au Musée Houiller qu'il projette de créer. Il en fait la demande à la Chambre des Houillères, par le biais d'Elie Reumaux, directeur général de la Société des Mines de Lens. La Chambre des Houillères décide de faire mieux encore en fournissant au Musée des coupes de l'intégralité du bassin minier, depuis Quiévrechain jusqu'à Ligny-les-Aire (Küss, 1905). Henri Küss, ingénieur en chef des mines de Douai est alors nommé directeur de leur exécution et M. Cailleaux, géomètre en chef de la compagnie de Lens, est chargé de diriger l'exécution matérielle des coupes (Dollé, 1985). Elles sont d'abord présentées lors de l'Exposition Universelle de Liège en 1905, puis envoyées au Musée Houiller de Lille (Fig. 3).

L'emplacement exact des coupes et des cartes horizontales sur verre est établi pour le Pas-de-Calais en s'inspirant des plans établis pour l'exposition d'Arras. En ce qui concerne le Nord, aucune étude préparatoire n'avait été effectuée et seule une carte au 1/40 000 existait. Le résultat choisi est un découpage du BHNPC en 8 zones contiguës, chacune d'une superficie voisine de 200 km^2 et composées de coupes espacées de 1 km (Fig. 4-5A). L'ensemble du travail a nécessité l'équivalent cumulé de 200 journées aux géomètres pour la préparation des coupes sur papier et près de 800 journées pour exécuter les plans et les coupes sur verre (Küss, 1905). Le seul coût matériel pour la fabrication des vitrines (verre, tables en chêne, armatures métalliques) s'élevait à plus de 10 000 francs de l'époque. Cela représenterait à l'heure actuelle une somme de près de 40 000 €, selon le convertisseur disponible sur le site insee.fr, et en tenant compte de l'érosion monétaire.

Après plusieurs années d'exposition au Musée Houiller, les « tables de verre » subissent plusieurs phases de dégâts puis un démantèlement progressif. Le plus important est leur destruction partielle lors de l'explosion d'un dépôt de munition lors de la Première Guerre Mondiale, en janvier 1916. Plusieurs vitrines sont fortement endommagées (Marcel, 1996). Le musée ne ré-ouvre ses portes qu'en 1925 et les tables semblent alors avoir été exposées sans dommage jusqu'à la fin des années 1970. Au cours des années 1980 à 2000, sept des huit tables sont progressivement démontées et une seule (n° 8 ; Fig. 5A) reste actuellement en exposition au Musée d'Histoire Naturelle de Lille (MHNL). Parmi les sept tables démontées, quatre sont conservées dans les réserves du MHNL (n° 1, 2, 4 et 5). Les trois vitrines restantes (n° 3, 6 et 7) sont conservées dans les réserves du Centre Historique Minier de Lewarde. Une opération de retour de ces tables vers le MHNL est en discussion.

En France, on retrouve des tables analogues pour les Mines de Blanzy à Montceau-les-Mines (table datant des années 1920), au

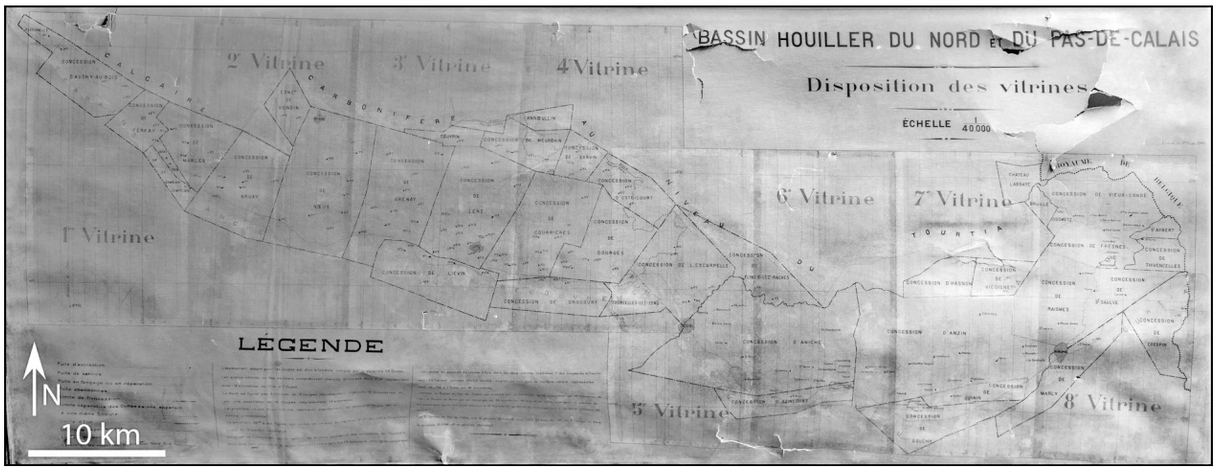

Fig. 4. — Positionnement des huit « tables de verre » (dénommées « Vitrine » sur la figure) au travers du Bassin Houiller du Nord – Pas-de-Calais. Sur chacune des vitrines, on distingue les limites des différentes concessions minières (trait épais) et la position de chacune des coupes N-S espacées de 1 km (trait fin). Le document original est consultable au Musée d'Histoire Naturelle de Lille sur demande.

Fig. 4. — Location of the eight glass-tables (named "vitrine" on the figure) across the Nord – Pas-de-Calais coal basin. On each of the tables, the limits of the mine concessions (thick line) and the location of the 1-km spaced N-S cross-sections (thin line) can be distinguished. The original document can be observed at the present Lille Museum of Natural History.

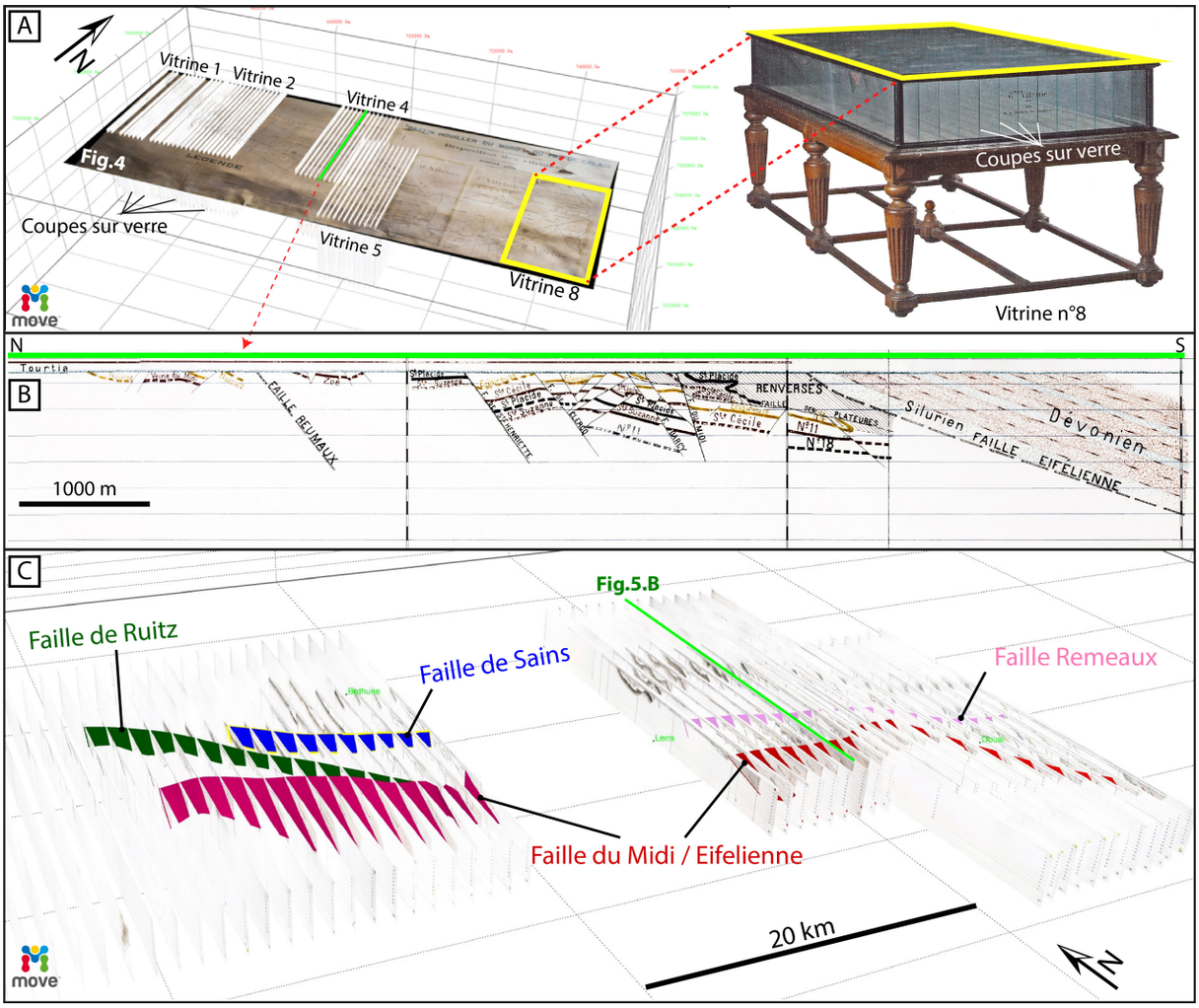

Fig. 5. — Modélisation géométrique 3-D préliminaire de la structure du BHNPC, d'après la conception du bassin en 1905. A) Vue oblique de l'importation des coupes des « tables de verre » n° 1, 2, 4 et 5 (traits blancs). La carte correspond à la Figure 4. La vitrine n° 8 (cadre jaune) est toujours exposée au Musée d'Histoire Naturelle de Lille. B) Coupe n° 48 de la table 4 (portion sud) présentée pour exemple (localisation sur Fig.5A-C grâce à la trace verte). C) Exemple de création d'une surface continue pour les principales failles par numérisation du tracé des failles sur chacune des coupes. Travail de modélisation 3-D réalisé avec l'aide du logiciel Move™ développé par Midland Valley.

Fig. 5. — Preliminary 3-D modelling of the structure of the Nord – Pas-de-Calais coal basin, after the 1905 understanding. A) Oblique view of the uploaded cross-sections of "glass-tables" #1, 2, 4 and 5 (white lines). The map corresponds to figure 4. "Glass-table" #8 (yellow frame) is still exposed at the present Lille Museum of Natural History. B) Cross-section #48 from "glass-table" #4 (south segment) is presented as an example (location on Fig. 5.A-C; green trace). C) Example of major fault surfaces by digitizing fault traces along each section. 3-D modelling work has been carried-out with Move™ software developed by Midland Valley.

Musée de Decazeville (table datant des années 1940) ou encore au Musée de la Mine de Saint-Etienne (table datant de 1889). L'ingénieur en chef des mines de Douai ne s'y était pas trompé car il énonçait en octobre 1905, à l'issu de son intervention lors de la réunion de la Société de l'Industrie minérale à Douai, la recommandation suivante : «*Il me sera permis de terminer par un conseil. Des coupes sur verre analogues à celles dont nous venons de parler peuvent, dans chaque mine, rendre de réels services pour l'étude du gîte à exploiter.*» (Küss, 1905). Ce type de représentation des structures des bassins houillers apparaît donc relativement commun au début du XXe siècle. Ainsi, par bien des aspects, comme la qualité de leur conception et de leur fabrication, l'époque de leur construction ou encore l'étendue qu'elles représentent, les « tables de verre » du Musée Houiller de Lille constituent des témoins historiques précieux, à la fois de la recherche scientifique et de l'activité industrielle de la région Nord – Pas-de-Calais au cours du XXe siècle. Il s'agit par ailleurs d'un objet de communication très pertinent qui aidait les géologues et ingénieurs à visualiser et raisonner en 3 dimensions.

III. — VERS UNE REPRESENTATION EN 3-DIMENSIONS DE LA GEOMETRIE DU BASSIN HOUILLER

Récemment, un projet de numérisation des « tables de verre » a été lancé dans le cadre d'un mémoire de formation de

licence de l'Université de Lille (Crépin, 2013) (Fig.5). A cette occasion, les quatre « tables de verre » démontées du MHNL ont été photographiées afin d'être archivées numériquement et de mener une étude de la géométrie en 3-D du Bassin Houiller. Cela représente les quatre plans sur verre horizontaux correspondant à l'emprise géographique des tables n°1, 2, 4

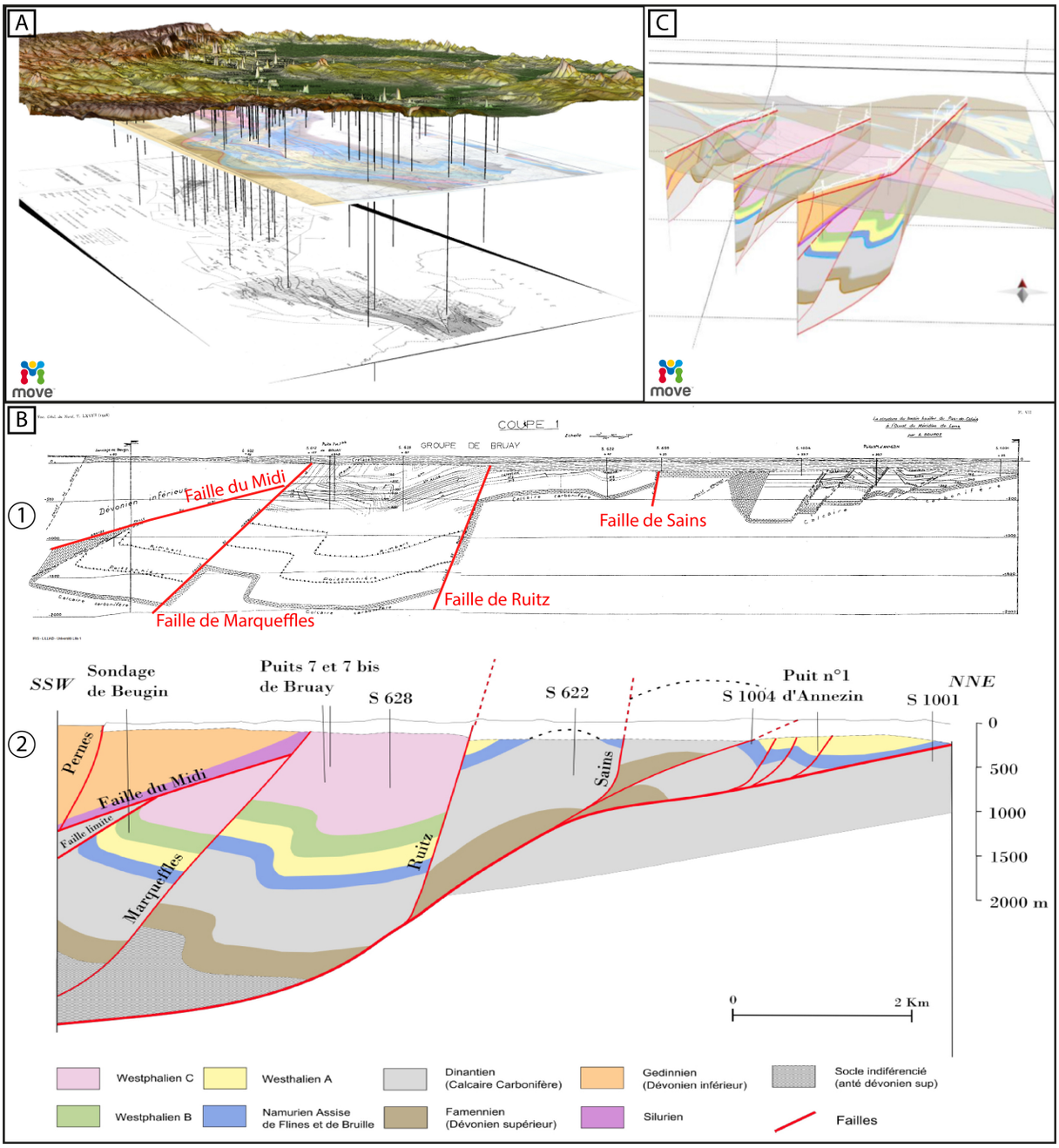

Fig. 6. — Modélisation géométrique 3-D préliminaire de la structure du BHNPC (d'après la conception du bassin en 1960-1980) et actualisation des coupes. A) Le modèle intègre une partie des sondages géologiques et les principales cartes publiées. Les données topographiques proviennent de la BD ALTI® à 25m de l'IGN. Exagération verticale x20. Les deux cartes en dessous de la topographie correspondent, de haut en bas, aux zones stratigraphiques à la profondeur -300 (Bouroz *et al*., 1963) et -1000 (Becq-Giraudon, 1983). B) Essai de rééquilibrage d'une coupe géologique sur la partie ouest du Bassin Houiller (d'après Bouroz, 1948; Junique, 2016). C) Essai de modélisation 3-D de la portion ouest du BHNPC par corrélation latérale de trois coupes géologiques actualisées (Junique, 2016).

Fig. 6. — Preliminary 3-D modelling of the structure of the Nord – Pas-de-Calais coal basin, after the 1960-1980 understanding, and updating of geologic cross-sections. A) The model integrates only a part of the wells and the major published geological maps. Topography dataset is from the 25m resolution BD ALTI® from IGN. Vertical exaggeration is x20. The two maps beneath the topography correspond to, from top to bottom, the stratigraphic zones at the -300m (Bouroz et al.*, 1963) and -1000m depth (Becq-Giraudon, 1983). B) First try of cross-section restoration on the western part of the coal basin (after Bouroz, 1948; Junique, 2016). C) First try of 3-D modelling of the western side of the Nord – Pas-de-Calais coal basin from lateral connexion between three updated sections (Junique, 2016).*

et 5 ainsi que les 58 coupes sur verre illustrant la géométrie des couches en profondeur (exemple sur la Fig. 5B). Les trois tables du Centre Historique Minier de Lewarde et la table n° 8 en exposition au MHNL n'ont pas encore été numérisées. Il est évidemment espéré qu'elles le seront prochainement. Toutes ces coupes et cartes ont ensuite été intégrées au sein d'un logiciel de modélisation structurale Move™ développé par la société Midland Valley et mis en accès gratuitement à l'Université Lille 1 grâce à une licence académique (Fig. 5A). A partir des données d'ores et déjà importées dans le logiciel, il est possible de visualiser la géométrie 3-D des surfaces correspondant aux principales failles de la portion ouest du bassin (Failles de Ruitz, Sains, Remeaux et du Midi/Eifélienne ; Fig. 5C). Ce résultat constitue un intéressant support de valorisation et de vulgarisation des données muséographiques du MHNL.

Ensuite, les données cartographiques et de sondage des synthèses de 1963 et 1983 (Becq-Giraudon, 1983 ; Bouroz *et al.*, 1963) ont été à leur tour partiellement intégrées dans le modèle 3-D (Fig. 6A) (Dahilouni, 2015). Progressivement, les dizaines de coupes géologiques réalisées par ces auteurs seront intégrées afin de construire la vision géométrique 3-D du bassin dans les années 1960.

Enfin, plusieurs travaux d'actualisation des coupes géologiques ont été réalisés lors de stages de recherche d'étudiants en licence et master (Bouchehima, 2016 ; Fetati, 2017 ; Junique, 2016) (Fig. 6B-C). En particulier sur l'une des coupes établies dans l'extrême ouest du bassin (Bouroz, 1948), nous avons cherché à conserver les données contraignant la coupe originale (Fig. 6B.1), notamment les sondages et les relevés *in-situ*, tout en complétant la succession stratigraphique et en proposant une connexion des failles en profondeur (Fig. 6B.2).

Bien qu'incomplet pour le moment, un des objectifs de ce projet est de proposer un modèle géométrique complet des structures géologiques du BHNPC sur les périodes 1905, ~ 1960 et aujourd'hui. D'un point de vue épistémologique, il sera intéressant d'analyser et de comparer l'évolution de la vision en 3-D que les géologues ont eue du BHNPC.

IV. — CONCLUSION - PERSPECTIVES

Le Bassin Houiller du Nord – Pas-de-Calais fut un objet géologique très étudié aux XIXe et XXe siècles de par son importance stratégique. Délaissé scientifiquement depuis des décennies (la dernière grande synthèse date de 1963), la géométrie de ses structures profondes reste sous-contrainte parce que : 1) les concepts géologiques modernes tels que ceux associés à l'équilibrage des coupes ou au phénomène d'inversion tectonique n'ont pas été appliqués, et 2) les données acquises jusqu'à la fermeture des concessions n'ont pas été intégrées. A partir d'une approche originale basée sur des outils de modélisation géométrique 3-D, nous souhaitons dans les prochaines années actualiser notre vision des géométries du sous-sol de cette région. Conjugué à une approche de modélisation expérimentale (Graveleau *et al.*, 2012), nous souhaitons étudier l'importance de paramètres stratigraphiques, tectoniques et géodynamiques sur le développement du bassin. Cela devrait permettre de mieux contraindre son évolution et de comprendre son enregistrement de la dynamique de la grande chaîne varisque. Ce travail de réactualisation des connaissances permettra, par ailleurs, de fournir un support scientifique fondamental en amont de nombreuses problématiques régionales dans le domaine de l'environnement et du développement durable. Par exemple, le projet pourra alimenter les études actuelles menées sur le potentiel de développement de la géothermie basse énergie (notamment sur les eaux de mines). Sans une vision actualisée des géométries des roches et des discontinuités géologiques (failles) en profondeur, les modélisations hydrauliques sont empreintes d'incertitudes et les prospectives de développement géothermique sont limitées. Grâce à ce projet, la vision 3-D du sous-sol du Bassin Houiller que nous proposerons viendra documenter en amont les réflexions de développement géothermique.

Différentes instances nationales et régionales sollicitent également le milieu académique afin qu'il apporte son expertise sur l'enjeu de la maîtrise des risques et de leurs impacts environnementaux. Conjuguée à la cartographie précise des « vides miniers » résultant de l'exploitation du charbon, notre modélisation géologique du sous-sol pourrait servir de support aux différentes problématiques concernant les risques géologiques et environnementaux en contexte « après-mine » (Meilliez, 2017 ; Lemal & Meilliez, 2017). Par exemple, grâce à cette nouvelle vision 3-D que l'on aura du sous-sol du Bassin Houiller, il serait possible de mieux cerner les fractures géologiques susceptibles d'être sismogéniques, et de comprendre comment les réseaux de branchement de ces différentes discontinuités peuvent contrôler le transfert des fluides et de chaleur au sein du bassin et vers la surface.

Notre projet repose fondamentalement sur la construction d'un modèle 3-D par ordinateur de la géométrie du sous-sol du BHNPC. Avec cet outil, nous serons capables de produire des documents (images, animations, simulations) et d'illustrer dynamiquement comment le sous-sol est constitué et s'est construit. Ces outils seront directement exploitables par divers publics (d'initiés ou non) afin de leur faciliter la compréhension de « l'invisible sous leurs pieds ».

Enfin, comme nous l'avions précisé dans l'introduction, le BHNPC ne s'arrête pas à la frontière franco-belge mais se poursuit vers l'est avec le bassin houiller du Hainault. Dans un premier temps, la quantité de données (archives) à considérer étant tellement importante du côté français, nous n'envisageons pas de mener le même type d'étude du côté belge. Cependant, au fur et à mesure de la progression de notre travail, nous ne manquerons pas de nous rapprocher du Service Géologique de Belgique afin de discuter de la cohérence de notre démarche vis-à-vis des informations dont recèle leur partie du bassin d'avant-pays nord varisque.

Remerciements. — La mise en route de ce projet a été rendu possible grâce au concours de nombreux étudiants de licence et master de l'Université de Lille 1 cités dans le texte. De nombreuses institutions de la région des Hauts-de-France travaillant sur le BHNPC, à savoir la Mission Bassin Minier, le Centre Historique Minier de Lewarde, le Musée d'Histoire Naturelle de Lille, l'Unité Territoriale Après Mine Nord et le BRGM, sont ici chaleureusement remerciées pour leur soutien et leur enthousiasme à soutenir ce projet. Francis Meilliez et Noël Vandenberghe sont chaleureusement remerciés pour leurs commentaires constructifs délivrés dans une version préliminaire de ce manuscrit. Enfin, la société Midland Valley est remerciée pour la mise à disposition gratuite du logiciel Move™ dans le cadre d'une licence académique accordée à l'Université Lille 1. Ce travail n'a malheureusement bénéficié d'aucun soutien programmatique dédié.

BIBLIOGRAPHIE

BECQ-GIRAUDON J.-F. (1983). — *Synthèse structurale et paléogéographique du bassin houiller du Nord et du Pas-de-Calais*. Éditions du BRGM, Orléans, 67 p.

BOUCHEHIMA K. (2016). — *Modélisation structurale du bassin houiller Nord-Pas de Calais (partie Est)*. Mémoire de Licence, UFR Sciences de la Terre. Université de Lille 1, 25 p.

BOUROZ A. (1948). — La structure du Bassin Houiller du Pas-de-Calais à l'Ouest du Méridien de Lens. *Annales de la Société Géologique du Nord,* **68** : 93-105.

BOUROZ A. (1969). — Le Carbonifère du Nord de la France. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **89** : 47-65.

BOUROZ A., STIEVENARD H., BUISINE M., DALINVAL A., DOLLE P., PINEL G. & PUIRABAUD G. (1963). — *Carte des zones stratigraphiques à la côte - 300 m* du Bassin Houiller du Nord et du pas de Calais, édit. Institut Géographique National, Paris.

COOPER M.A. & WILLIAMS G.D. (1989). — Inversion tectonics. *Geological Society, London, Special Publication*, **44** : 375 p.

CREPIN B. (2013). — *Modélisation Géométrique 3D dans le bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais à partir de données historiques du Musée de Lille : Les Tables de Verre*. Mémoire de Licence, UFR Sciences de la Terre. Université de Lille 1, Villeneuve d'Ascq, 27 p.

CUVELIER J. & OUDOIRE T. (2017). – Le musée houiller de Lille et ses collections : un héritage remarquable de l'activité minière du Nord – Pas-de-Calais. Annales de la Société Géologique du Nord, 2e série, 24 : 43-50.

DAHILOUNI C. (2015). — *Mise en place d'une base de données pour la modélisation géométrique en 3-D du bassin minier du Nord-Pas de Calais*. Mémoire de Master, UFR Sciences de la Terre. Université Lille 1, 29 p.

DAHLSTROM C.D.A. (1969). — Balanced cross sections. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **6** : 743-757.

DELCAILLAU B. (2004). — *Reliefs et tectonique récente*. Nouveau Précis de Géomorphologie, Vuibert, Paris, 259 p.

DELMER A. (1997). — Structure tectonique du bassin houiller du Hainaut. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **5** (2ème série) : 7-15.

DHAINAUT A. (2007). — Géologues et ingénieurs des mines à la découverte du sous-sol. *In* : BECKARY S. ed., Pays'âges. Musée d'Histoire naturelle de Lille, Lille, 108 p.

DOLLE P. (1985). — L'histoire de la géologie et de son évolution dans le Bassin Houiller du Nord-Pas de Calais, de son origine à 1960. *Travaux du Comité Français d'Histoire de la Géologie*. *Annales des Mines*, Deuxième Série, **Tome 3 :** 41-73.

DROZDZEWSKI G. (1993). — The Ruhr coal basin (Germany): structural evolution of an autochthonous foreland basin. *International Journal of Coal Geology*, **23** (1) : 231-250.

ELLIOTT D. (1983). — The construction of balanced cross-sections. *Journal of Structural Geology*, **5** : 101.

FETATI S. (2017). — *Modélisation structurale 3D du bassin houiller du Nord-Pas-de-Calais : équilibrage et restauration des coupes*. Mémoire de Master, UFR Sciences de la Terre. Université de Lille 1, 30 p.

FRANKE W, HAAK V., ONCKEN O. & TANNER, D. (2000). — Orogenic Processes: Quantification and Modelling in the Variscan Belt. *Geological Society, London, Special Publications*, **179** : 459 p.

GRAVELEAU F. (2008). — *Interactions Tectonique, Erosion, Sédimentation dans les avant-pays de chaînes: Modélisation analogique et étude des piémonts de l'est du Tian Shan (Asie Centrale)*. Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Montpellier : 487 p.

GRAVELEAU F., MALAVIEILLE J. & DOMINGUEZ S. (2012). — Experimental modelling of orogenic wedges: A review. *Tectonophysics,* **538-540** : 1-66.

JUNIQUE T. (2016). — *Modélisation géométrique 3D du front de la chaîne varisque et du bassin houiller Nord-Pas-de-Calais (partie Ouest): Apport de l'équilibrage des coupes*. Mémoire de Master, UFR Sciences de la Terre. Université de Lille 1 : 34 p.

KÜSS H. (1905). — Les coupes des bassins du Nord et du Pas-de-Calais. *Annales de la Société Géologique du Nord*, **34** : 398-408.

LACQUEMENT F., AVERBUCH O., MANSY J.-L., SZANIAWSKI R. & LEWANDOWSKI M. (2005). — Transpressional deformations at lateral boundaries of propagation thrust-sheets: the example of the Meuse Valley recess within the Ardennes Variscan fold-and-thrust belt (N France-S Belgium). *Journal of Structural Geology*, **27** : 1788-1802.

LACQUEMENT F., BARCHI P. & QUESNEL F. (2004). — *Carte géologique harmonisée de la région Nord- Pas de Calais*. Rapport BRGM/RP53484-FR, 188 p.

LE GALL, B. (1994). — Deformation of the Nord-Pas-de-Calais Carboniferous Coalfield (France) in the Variscan Frontal Tectonic Pattern. *In* : MASCLE A. (ed.), *Hydrocarbon and Petroleum Geology of France*. Springer, Berlin, Heidelberg, 379-398.

LEMAL S. & MEILLIEZ F. (2017). – L'après-mine, un nouveau chapitre scientifique du bassin houiller du Nord – Pas-de-Calais. *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2e série, **24** : 59-67

MALAVIEILLE J. (2010). — Impact of erosion, sedimentation, and structural heritage on the structure and kinematics of orogenic wedges: Analog models and case studies. *Geological Society of America, Today*, **20** : 4-10.

MARCEL R. (1996). — *Le Musée d'Histoire Naturelle de Lille de 1820 à 1980, Histoire de la Faculté des Sciences de Lille et de l'Université Lille1 - Sciences et Technologies*. Association de Solidarité des Anciens de l'Université Lille 1. Disponible à l'adresse URL : http://asa3.univ-lille1.fr/

publications/Tome1_faculte_des_sciences.pdf ; consultée le 29/06/2017.

MATTE P. (1986). — La chaîne varisque parmi les chaînes paléozoiques péri-atlantiques, modèle d'évolution et position des grands blocs continentaux au Permo-Carbonifere. *Bulletin de la Société Géologique de France*, (8), **tome II,** n° 1 : 9-24.

MEILLIEZ F. (1989). — *Importance de l'évènement calédonien dans l'allochtone ardennais ; Essai sur une cinématique paléozoïque de l'Ardenne dans la chaîne varisque*. Thèse de doctorat d'état, Université du Maine, Le Mans : 518 p.

MEILLIEZ F. (2017) – Héritages de l'exploitation industrielle et scientifique du gisement Houiller du Nord et du Pas-de-Calais (Carbonifère supérieur), une longue histoire (XVIIe – XXIVe siècles). *Annales de la Société Géologique du Nord*, 2e série, **24** : 17-31

METIVIER F., GAUDEMER Y., TAPPONNIER P. & KLEIN M. (1999). — Mass accumulation rates in Asia during the Cenozoic. *Geophysical Journal International,* **137** : 280-318.

MINGUELY B. (2007). — *Caractérisation géométrique 3-D de la couverture sédimentaire méso-cénozoïque et du substratum varisque dans le Nord de la France*. Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille : 230 p.

THIEBAULT F. (2010). — *Histoire de la Géologie à la Faculté des Sciences de Lille 1857 - 1970. Histoire de la Faculté des Sciences de Lille et de l'Université de Lille 1 - Sciences et Technologies*. Disponible à l'adresse URL : http://asa3.univ-lille1.fr/publications/Tome8_geologie.pdf ; consultée le 29/06/2017.