Bulletin
de la
Classe des Sciences

EXTRAIT

Le tunnel sous la Manche et son contexte géologique

par Francis Amédro
Lauréat du Concours annuel de 2001

6e série
Tome XIV

1-6
2003

ACADÉMIE ROYALE DE BELGIQUE

RÉSUMÉ D'EXPOSÉ

Le tunnel sous la Manche et son contexte géologique

par Françis Amédro (1)
Lauréat du Concours annuel de 2001

La longue histoire du Tunnel sous la Manche, jalonnée depuis le début du XIXe siècle de multiples projets et de deux tentatives de réalisation en 1878 et 1974, s'est achevée le 1er décembre 1990 avec la première jonction franco-anglaise à 100 m sous le niveau de la mer. Ce succès est l'aboutissement d'une longue suite d'investigations géotechniques dont les principales étapes sont les suivantes.

Repères historiques

1867 - Low et Hawkshaw suggèrent indépendamment l'un de l'autre que seul le Chalk Marl ou « Craie bleue » (partie inférieure argileuse et imperméable des craies affleurant en Angleterre dans les falaises entre Douvres et Folkestone, et en France dans les falaises du Cap Blanc-Nez) peut convenir au percement d'un tunnel sous la Manche.

1875 - Potier et de Lapparent établissent une carte géologique du détroit du Pas-de-Calais à partir du dragage de 2 514 échantillons (la première carte géologique sous-marine du monde) et démontrent la continuité des couches de craie entre la France et la Grande-Bretagne.

1878-1883 - Deux puits verticaux de 88 m et 50 m sont creusés respectivement à Sangatte (France) et Shakespeare Cliff (United Kingdom), puis prolongés par des galeries sous-marines de 1683 m (F.) et 1920 m (U.K).

1958-1965 - Un Groupement d'Études du Tunnel sous la Manche (G.E.T.M.), créé en 1957, dénoie le puits de Sangatte et engage une vaste campagne de prospection géophysique complétée par le forage de neuf sondages à terre et 70 sondages en mer réalisés à partir de plates-formes pétrolières.

1971-1972 - La publication des travaux du G.E.T.M. par Destombes et Shephard-Thorn, 1971, et Carter et Destombes, 1972, révèle plusieurs failles vers la côte française et une profonde vallée comblée de sédiments récents au centre du Détroit: la fosse Dangeard. En tenant compte de ces résultats, un projet de tunnel ferroviaire foré dans la « Craie bleue » est établi, contournant la fosse Dangeard par le Nord. Celui-ci comprend deux tunnels ferroviaires à voie unique de 50 km de long, dont 37 sous la Manche, encadrant un tunnel de service: le projet définitif prend forme.

1973-1974 - Les travaux de creusement reprennent momentanément.

1986-1988 - Après ratification par les gouvernements français et britannique du principe d'une liaison fixe, le projet de 1971 est affiné (voir les descriptions géotechniques détaillées *in* Duffaut et Margron, *édit.*, 1990, et Guérillot, coord. *et al.*, 1992) et le puits de Sangatte est creusé.

1er décembre 1990 - Jonction des tunnels de service: l'Angleterre n'est plus tout à fait une île.

22 mai 1991 - Jonction des tunnels ferroviaires Nord.

28 juin 1991 - Jonction des tunnels ferroviaires Sud. Le creusement des galeries est terminé.

Le tunnel en chiffres

Le tunnel, réalisé par le consortium Transmanche Link (T.M.L.) pour le concessionnaire Eurotunnel, présente une longueur de 49,28 km dont 37,73 km en tracé sous-marin.

Il comporte deux galeries ferroviaires de 7,60 m de diamètre intérieur, situées à 15 m de part et d'autre d'une galerie de service de 4,80 m de diamètre intérieur. Tous les 250 m, des rameaux de pistonnement (destinés à la décharge des surpressions d'air) relient les tunnels ferroviaires en passant au-dessus du tunnel de service. Des rameaux d'évacuation, espacés de 375 m, mettent également en communication les trois tunnels.

Le percement des trois galeries de 1988 à 1991 constitue la phase ultime d'un chantier débuté en 1986, et même en 1958, si l'on tient compte des phases de reconnaissances préparatoires. Un chantier de génie civil de l'ampleur du Tunnel sous la Manche demande en effet la prise en compte de nombreuses contraintes géotechniques. La nécessité de trouver une couche imperméable, ici la « Craie bleue », et de pouvoir la suivre dans la partie sous-marine du tracé en est un exemple.

Quelques aspects liés aux reconnaissances préliminaires pour le choix du tracé et au creusement lors du déroulement du chantier sont illustrés dans la figure 1. Les différents cartouches sont commentés ci-après, suivant les informations publiées par Bruckshaw *et al.* (1961), Destombes et Shephard-Thorn (1971), Carter et Destombes (1972), Duffaut et Margron *édit.* (1990), Guérillot *coord. et al.* (1992), Amédro (1994), Jouchoux (1994) et Harris *et al.* (1996).

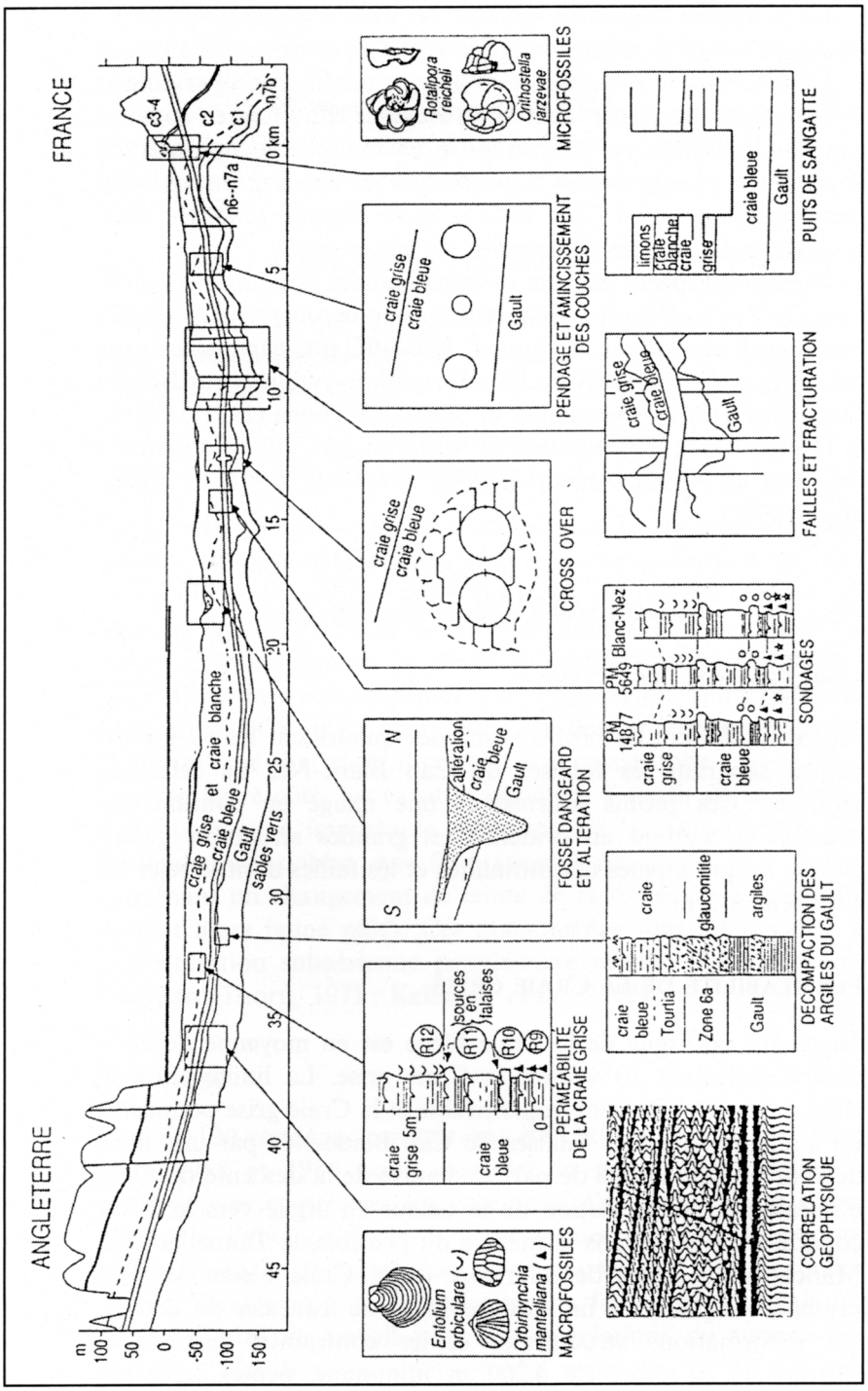

Fig 1. – Le Tunnel sous la Manche : quelques aspects géologiques révélés par les reconnaissances préliminaires et lors du creusement des galeries.

Aspects géologiques et géotechniques

CORRÉLATION GÉOPHYSIQUE

Plus de 1000 km de profils sismiques quadrillent les 37 km du détroit séparant les falaises du Cap Blanc-Nez de celles de Douvres. Ces profils fournissent une image en continu des couches et mettent en évidence les grandes structures géologiques, les principales discontinuités et les failles dont le rejet est supérieur à 3 m.

PERMÉABILITÉ DE LA CRAIE GRISE

La teneur en argile de la Craie bleue est en moyenne de 25 % contre seulement 10 % dans la Craie grise. La limite entre la Craie bleue globalement imperméable et la Craie grise perméable est soulignée dans les falaises du Cap Blanc-Nez par une ligne de sources bien visible de part et d'autre de la descente du Cran d'Escalles. Laugmentation de la teneur en argile vers le bas a conduit à creuser, dans la mesure du possible, le Tunnel sous la Manche dans la partie inférieure de la Craie bleue. Mais la présence de plusieurs failles dans la partie française du détroit, des déformations structurales et les contraintes ferroviaires (rayons de courbure de 4 200 m minimum, pentes de 1, 1 % maximun) entraînent plusieurs points de tangence avec la Craie grise d'où une nécessaire étanchéification des terrains.
Dans les zones concernées, les traitements ont consisté en une injection primaire d'un coulis ciment-bentonite, complétée si nécessaire par une injection secondaire d'une solution liquide de silicate de soude pour colmater les fissures les plus fines.

DÉCOMPACTION DES ARGILES DU GAULT

La décompaction des argiles du Gault entraîne leur gonflement. Pour cette raison, les galeries du tunnel ne s'approchent pas à moins de 4 m du Gault.

FOSSE DANGEARD ET ALTÉRATION

Les profils sismiques ont révélé l'existence de plusieurs chenaux comblés de sédiments meubles dans la partie centrale du Détroit et, en particulier, d'une vallée profonde de plus de 100 m: la fosse Dangeard.
L'origine de cette structure de surcreusement est rapportée aux phases de glaciation et de déglaciation du Quaternaire. Il est heureux de penser que le projet du Tunnel sous la Manche de 1878 ait été abandonné car, devant recouper la Fosse Dangeard sur son tracé, il courait à la catastrophe.
D'un autre côté, les carottes obtenues à partir de la surface ont montré une importante altération de la craie jusqu'à des profondeurs variables, avec fissuration et oxydation de la pyrite entraînant un changement de teinte de la roche (la Craie bleue devient alors jaune pâle). Ces phénomènes sont attribuables à une altération subaérienne périglaciaire intense (Destombes et Shephard-Thorn, 1971 ; Kellaway *et al.*, 1975).

SONDAGES

Plus de 120 sondages carottés ont été réalisés en mer et à terre entre 1958 et 1986 pour identifier la nature des réflecteurs géophysiques et préciser les variations d'épaisseur de la Craie bleue. En l'absence de levés lithologiques détaillés, le recours systématique à la microfaune, et en particulier à des échelles zonales fondées sur les foraminifères, a fourni côté anglais un excellent outil de travail pour les corrélations du tunnel. En revanche, côté français, une nouvelle approche fondée sur une description fine de la lithologie et des biofaciès a été appliquée en plus aux 52 sondages carottés réalisés lors du creusement des galeries (Amédro, 1993, 1994). La continuité à travers le détroit du Pas-de-Calais de plusieurs niveaux-repères calibrés par des marqueurs paléontologiques a servi à repérer constamment la position des tunneliers au sein de la Craie bleue, avec une précision atteignant la rythmicité élémentaire lit-marneux-banc crayeux à la limite Craie bleue-Craie grise, soit 1 à 5 cm (à comparer aux degrés de résolution obtenus par la géophysique: ± 2 à 3 m, ou à la micropaléontologie: ± 0,50 m).
« CROSS OVERS » (OU TRAVERSÉES JONCTIONS)

Deux vastes cavernes sous-marines de 165 m de long et de 20 m de diamètre intérieur permettent, par croisement, la communication des voies ferrées des tunnels ferroviaires, respectivement à 12,4 km et 30,4 km du Puits de Sangatte. Ces ouvrages, qui sont les plus vastes cavernes sous-marines du monde, sont situés approximativement au tiers et deux tiers du tunnel. Pour des raisons d'étanchéité leur creusement a été réalisé entièrement dans la Craie bleue. La méthode de creusement choisie côté français a consisté à réaliser une série de galeries jointives de faible diamètre, remplies de béton aussitôt après leur excavation, puis à enlever le noyau séparant les deux tunnels ferroviaires.

FAILLES ET FRACTURATION

Sept failles d'un rejet supérieur à 3 m recoupent le tracé du tunnel dans la partie française du Détroit. À cela, il convient d'ajouter une importante fracturation de la Craie bleue dans le même secteur. La traversée de ces zones très aquifères a nécessité des injections menées à partir de la galerie de service, soit à l'avant du tunnelier, soit au-dessus de l'ouvrage à l'aide d'une série de forages exécutés en éventail.

PENDAGE ET AMINCISSEMENT DES COUCHES

Alors que le pendage moyen des couches varie entre 5° et 9° N dans la plus grande partie du tracé, les approches de la côte française sont caractérisées par une forte augmentation du pendage qui atteint 25° aux abords de la structure des Quénocs.
Corrélativement, une réduction d'épaisseur de la Craie bleue se manifeste, celle-ci passant de 34 m en moyenne dans le détroit à 26 m dans l'axe de la structure des Quénocs, jusqu'à 18 m dans certains sondages. Dans la mesure où les trois galeries s'inscrivent dans un couloir de 30 m de large et 9 m de haut, il a fallu maîtriser ici le tracé du tunnel avec une précision encore plus grande.

PUITS DE SANGATTE

Ce gigantesque ouvrage en béton armé de 55 m de diamètre et 66 m de profondeur recoupe dans sa partie inférieure les trois galeries. Sa taille est telle qu'il pourrait contenir en entier l'Arc de Triomphe de Paris! Durant la phase des travaux souterrains, le puits de Sangatte a servi d'accès au chantier, mais l'ouvrage traversant une zone aquifère sur plus de 40 m de haut, il a fallu le protéger en premier lieu par un important rabattement de la nappe.

L'étanchéification permanente du puits a été assurée également par une paroi de bentonite-ciment coulée avant le creusement et formant une enceinte elliptique de 200 m de long, 100 m de large et 60 m de profondeur. Aujourd'hui, en phase d'exploitation, le puits de Sangatte abrite divers équipements de refroidissement, ventilation et sécurité. Le drainage est abandonné, mais le puits a reçu un lest de plusieurs milliers de tonnes pour compenser la poussée hydrostatique.

CONTRÔLE GÉOLOGIQUE À L'AVANCEMENT

Parmi tous les aspects décrits ci-dessus, le repérage précis de la position du tunnel au sein de la Craie bleue mérite une mention particulière. La décompaction des Argiles du Gault situées en dessous de la Craie bleue et la perméabilité de la Craie grise audessus ont conditionné en grande partie le tracé du tunnel et constitué une contrainte géotechnique très stricte au cours du creusement des galeries.

Lors de l'avancement du chantier, pour vérifier si les épaisseurs de Craie bleue situées de part et d'autre de la galerie de service étaient conformes aux prévisions, 52 sondages carottés ont été effectués dans la partie française du Détroit, dirigés le plus souvent vers le haut, mais parfois aussi vers le bas (fig. 2).

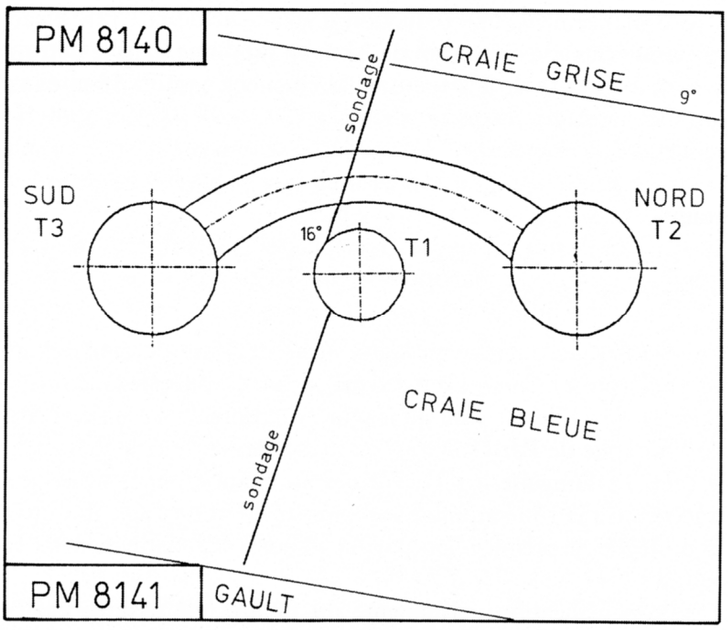

Fig. 2. - Conditions d'implantation des sondages réalisés lors du creusement des galeries à partir du tunnel de service. Les distances (Points métriques PM) sont comptées à partir de l'axe du puits de Sangatte.

L'originalité tient à la méthode d'investigation appliquée avec succès pour le repérage stratigraphique au sein de la succession crayeuse. Celle-ci, rapide et précise, a consisté en une description fine de la lithologie et des biofaciès de tous les sondages carottés réalisés au fur et à mesure du creusement des galeries afin d'identifier un ensemble d'événements à caractère lithologique ou écologique. Il s'agit du principe de la stratigraphie événementielle développée d'abord dans les craies du Nord-Ouest de l'Allemagne (Ernst et *al*, 1983), puis étendue au Sud-Est de l'Angleterre (Mortimore, 1983, 1986; Robinson, 1986; Gale, 1989, 1995, 1996) et au Nord de la France (Amédro, 1993, 1994; Amédro et Robaszynski, 1999, 2001 a, b, c, d).

APPLICATION DE LA STRATIGRAPHIE ÉVÉNEMENTIELLE

Il y a environ 98 millions d'années, à l'époque du dépôt de la Craie bleue dans le Sud-Est de l'Angleterre et le Nord de la France, la mer de la craie couvrait une grande partie de l'Europe du Nord.

Un certain nombre d'événements identifiables sur des distances dépassant parfois plusieurs centaines de kilomètres et entraînant la genèse de niveaux-repères ont affecté cette mer de la craie.

Dans de nombreux cas, il s'est agi de changements rapides de la hauteur relative du niveau marin, c'est-à-dire d'événements eustatiques dont certains étaient accompagnés par une anoxie.

Dans d'autres cas, des éruptions volcaniques à caractère explosif entraînèrent le dépôt de cendres très fines à l'origine d'horizons centimétriques de bentonites. Enfin des variations des paramètres orbitaux de la Terre (excentricité, obliquité et précession des équinoxes), suivant des cycles respectivement d'environ 100 000, 40 000 et 20 000 ans, ont induit le développement de rythmes lithologiques marqués par une alternance de niveaux marneux et de bancs crayeux corrélables sur de grandes distances.

.

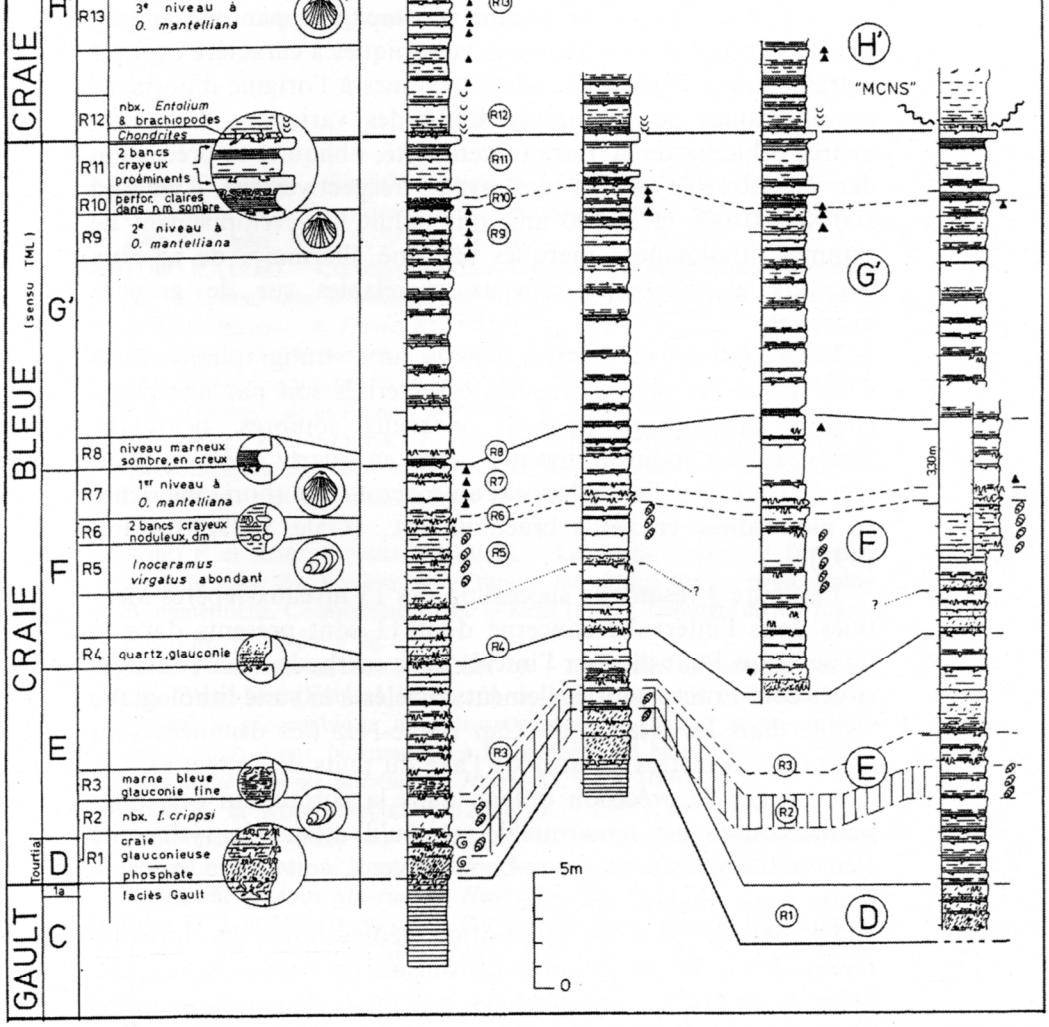

Fig. 3. – Position des niveaux repères correspondant à des événements lithologiques et écologiques dans la Craie bleue et la base de la Craie grise (Cénomanien inférieur et moyen *pars*) au Cap Blanc-Nez et corrélation avec quelques sondages situés dans la partie française du détroit du Pas-de-Calais. L'implantation des sondages est comptée en mètres à partir de l'axe du puits de Sangatte.

La figure 3 résume la succession des 13 niveaux-repères identifiés dans l'intervalle concerné dont 11 sont présents dans la Craie bleue. Pour illustrer l'intérêt de la méthode, trois sondages situés côté France sont également corrélés à la suite lithologique visible dans les falaises du Cap Blanc-Nez (les distances sont comptées en mètres à partir de l'axe du puits de Sangatte).

Le degré de précision obtenu dans la corrélation des différentes coupes est remarquable puisqu'il atteint la rythmicité élémentaire niveau marneux-banc crayeux, soit 1 à 5 cm à la limite Craie bleue-Craie grise.

De plus le suivi de la position géométrique des niveaux repères RI et R2 révèle un diachronisme de la base de la Craie bleue, le niveau RI, constitué par une craie glauconieuse, apparaissant comme un faciès transgressif de base dont l'âge varie suivant les points. De cette façon, la stratigraphie événementielle a servi à situer avec précision l'avancement des tunneliers dans la couche de Craie bleue imperméable lors du creusement (Amédro, 1993, 1994). À plusieurs reprises, une étanchéification préventive des terrains et même un ajustement local du tracé ont été décidés à la suite de l'identification des niveaux-repères dans les sondages, permettant d'apprécier l'épaisseur de Craie bleue restant de part et d'autre du Tunnel.

Ainsi, à l'aube d'un nouveau millénaire largement dominé par les outils informatiques et les méthodes d'investigation sophistiquées, l'approche naturaliste, c'est-à-dire l'observation directe du terrain, garde encore toute sa valeur.

Références

AMÉDRO F et ROIBASZYNSKI F. (1999). - Les craies cénomaniennes du Boulonnais. Comparaison avec l'Aube (France) et le Kent (Royaume-Uni). *Géologie de la France, B. R, G. M.,* 2, 33-53, 2 pl.

AMÉDRO F. et ROBASZYNSKI F. (2001a). - Événements sédimentaires et bioécologiques dans les craies du Boulonnais: des repères pour des corrélations précises intra- et inter bassins. *Ann. Soc. géol. Nord,* 8, 159-171, 5 fig.

AMÉDRO F. et ROBASZYNSKI F. (2001b). - Les craies à silex du Turonien au Santonien du Boulonnais (France) au regard de la stratigraphie événementielle. Comparaison avec le Kent (U.K.). *Géologie de la France, B.R. G. M.,* 4, 39-56, 9 fig.

AMÉDRO F. et ROBASZYNSKI F. (2001 c). - Les craies cénomaniennes du Cap Blanc-Nez (France) au regard de la stratigraphie événementielle. Extension géographique de niveaux-repères du bassin anglo-parisien (Boulonnais, Kent, Normandie) à l'Allemagne du Nord. *Bull. Soc. géol Normandie et Amis Muséum du Havre,* 87, 9-29, 10 fig., 3 pl.

AMÉDRO F. et ROBASZYNSKI F. (2001 d). - Les craies turoniermes du Boulonnais (France) au regard de la stratigraphie événementielle. Comparaison avec le Kent (U.K.) et la Normandie (F). *Bull. Soc. géol Normandie et Amis Muséum du Havre,* 87, 31-49, 2 pl.

CARTER D. J. et DESTOMBES J. P. (1972). - Stratigraphie du Cénomanien du Détroit du Pas-de-Calais. *Mém. B.R G. M.* n° 79, Coll. Géol. Manche, 117-121, 1 fig.

DESTOMBES J.P. et SHEPHARD-THORN E. R. (1971). - Geological results of the Channel Tunnel site investigation 1964-1965. *Nat. Env. Research Counc., Instit. Geol Sc.,* Report 71/11, 12 p., 3 tabl., 1 carte.

DUFFAUT P. et MARGRON P. *édit.* (1990). - Le Tunnel sous la Manche. Géologie et géotechnique. *Presses École nat. Ponts et Chaussées,* Paris, 329 p.

ERNST G., SCHMID F. et SEIBERTZ E. (1983). - Event-Stratigraphie im Cenoman und Turon von NW-Deutschland. *Zitteliana,* 10, 531-554

GALE A. S. (1989). - Field meeting at Folkestone Warren, 29th November, 1987. *Proc. Geol. Ass.,* 100, 73-82.

GALE A. S. (1995). - Cyclostratigraphy and correlation of the Cenomanian stage in Western Europe. *Geol. Soc., spec. publ.,* 85, 177-197.

GALE A. S. (1996). - Turonian correlation and sequence stratigraphy of the Chalk in Southern England. *In* HESSELBO S. P. and PARKINSON D. N (edit.), 1996, Sequence Stratigraphy in British Geology. *Geol. Soc., spec. publ.,* 103, 177-195.

GUÉRILLOT, H., coord. *et al.* (1992). - Le projet du Tunnel sous la Manche. *Tunnels et ouvrages souterrains,* n° 109, 9-55.

HARRIS C. S., HART M. B., VARLEY P. M. and WARREN C. D. *ed* (1996).
- Engineering geology of the Channel Tunnel, Thomas Telford Public., 526 p.

MORTIMORE R. N. (1983), The stratigraphy and sedimentation of Turonian-Campanian in the Southern Province of England. *Zitteliana*, 10, 27-41.

MORTIMORE R. N. (1986), Stratigraphy of the Upper Cretaceous White Chalk of Sussex. *Proc. Geol. Ass.*, 97, 97-139.

POTIER A. et LAPPARENT, A. de (1875), Rapport sur l'exploration géologique sous-marine du Pas-de-Calais. Chaix, Paris, 16 p., 6 fig., 1 carte.

ROBINSON N.D. (1986), Lithostratigraphy of the Chalk Group of the North Downs, Southeast England. *Proc. Geol. Ass.*, 97, 141-170.