

## **LA CONCEPTION GEOLOGIQUE DU TUNNEL SOUS LA MANCHE : Choisir les terrains à traverser et non les subir**

**Patrick MARGRON**  
**ANTEA, Groupe BRGM**  
Chef du projet Tunnel sous la Manche pour  
le BRGM de 1985 à 1989.  
Directeur Marketing de la société ANTEA

### **La géologie, fil d'Ariane du Tunnel sous la Manche**

Il n'est pas exagéré de parler de "conception géologique du Tunnel sous la Manche" car cette aventure n'aurait peut être pas été tentée sans le double déterminisme géographique et géologique qui entoure ce projet : à l'endroit où le détroit est le moins large (37 Km) et à cet endroit seulement, nos deux pays sont reliés sous la mer par une couche de roches mince mais continue et idéale pour le creusement d'un tunnel : la "Craie Bleue du Cénomaniens Inférieur" vieille de cent millions d'années. Résistante mais pas trop dure, peu fracturée donc peu perméable, juste assez épaisse (25 à 35 m) pour bien contenir les 3 tunnels, elle est située à une profondeur raisonnable, 30 à 60 m sous le fond de la mer.

L'objectif était donc simple en apparence :

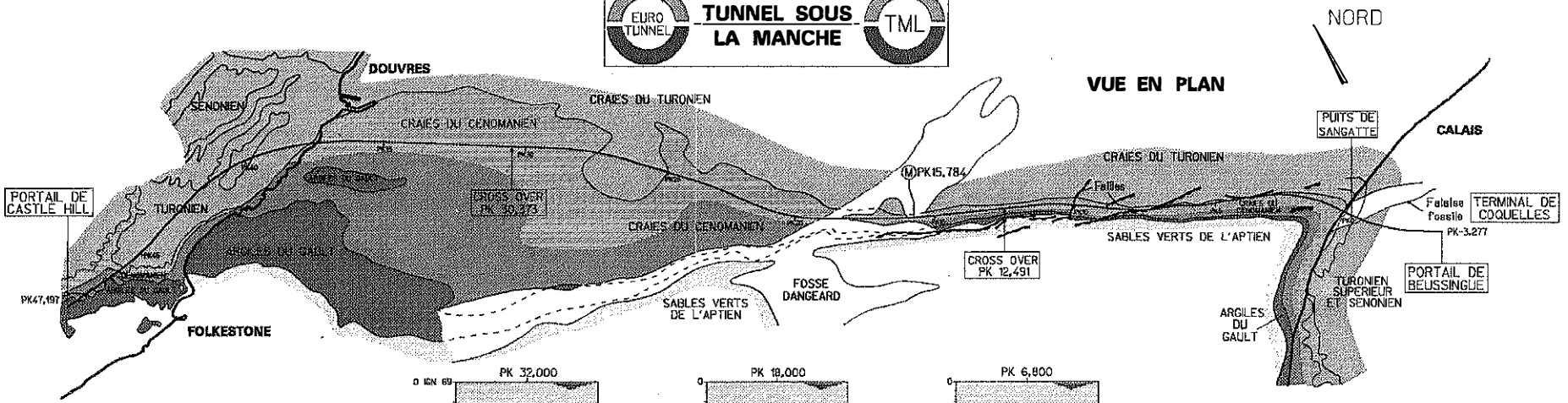
Maintenir les tunnels dans la Craie Bleue et ne sortir, ni au-dessus dans la Craie Grise où les venues d'eaux nombreuses et dangereuses ralentiraient et compliqueraient les travaux, ni au-dessous où règne une couche d'argiles gonflantes -les Argiles du Gault- qui risquait de bloquer les tunneliers et de conduire au surdimensionnement du revêtement des tunnels.

L'enjeu des études géologiques était donc considérable, puisqu'elles allaient définir, pour la sécurité des hommes et des travaux, quelle route allaient choisir et devoir suivre sous la Manche les 150 Km de tunnels qui relient désormais la France et l'Angleterre, 900 000 ans après l'ouverture du détroit.

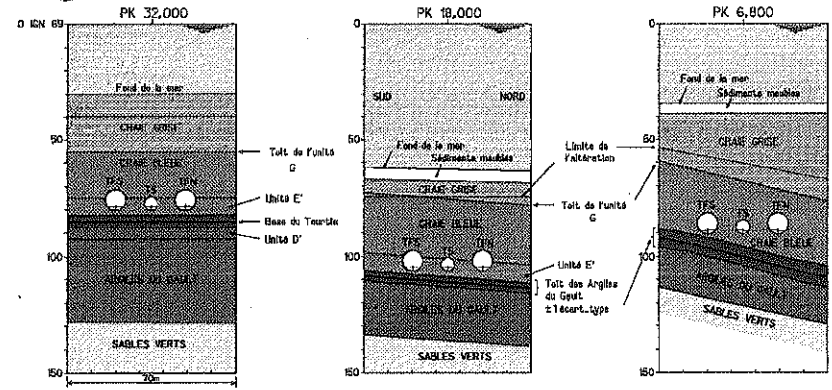
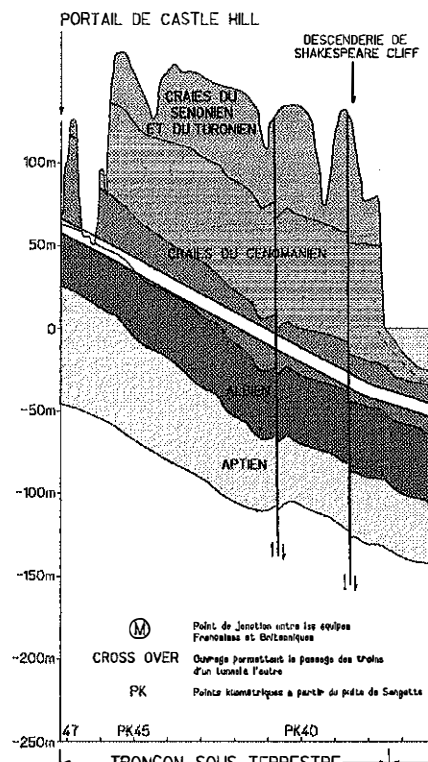
La coupe géologique page suivante illustre bien cette logique et cet enjeu.

De 1985 à 1990, une équipe pluridisciplinaire de 20 ingénieurs et géologues du BRGM ont travaillé pour le compte de TML et en association avec un bureau d'études britannique Mott MacDonald dans un seul et même but : garantir la fiabilité des prévisions géologiques sur la foi desquelles allait s'engager le plus grand chantier du siècle.

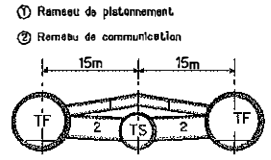
Ici, pour satisfaire aux exigences de sécurité du Génie Civil il a fallu, fait exceptionnel, donner de la géologie une image de précision métrique et probabiliser les valeurs des principaux paramètres, et, à cette échelle, c'est la complexité et la diversité qui l'emportent sur l'apparente simplicité et homogénéité générale de la géologie et de la géotechnique du Tunnel sous la Manche.



**GRANDE BRETAGNE**

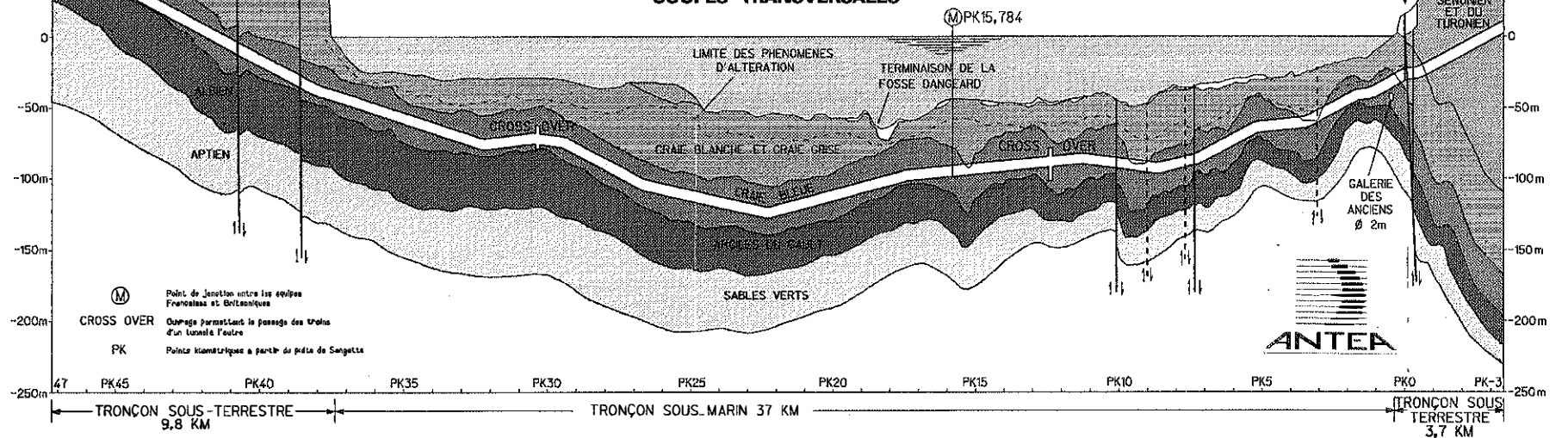


**COUPES TRANSVERSALES**



**TUNNELS FERROVIAIRES**  
 Ø extérieur 8,80m  
 Ø intérieur 7,60m

**TUNNEL DE SERVICE**  
 Ø extérieur 5,74m  
 Ø intérieur 4,80m



**PROFIL GEOLOGIQUE SIMPLIFIE LE LONG DU TUNNEL FERROVIAIRE SUD**

**Bien connaître les terrains pour bien construire aussi loin qu'il est techniquement et économiquement raisonnable.**

La définition de l'étude géologique et géotechnique dans le cadre des grands ouvrages, comme dans celui des petits ouvrages, résulte d'un calcul économique : jusqu'où faut-il pousser les études pour rendre plus sûr le projet, que coûterait tel ou tel incident, que coûte sa prévision, à partir de quand le surcoût de reconnaissance géologique ne se traduit-il plus par une amélioration significative de la sécurité et de la qualité du projet ?

Tous les grands aménagements nécessitent une très bonne compréhension des structures géologiques, au sein desquelles ils s'insèrent, et qui définissent la succession et la disposition des terrains qu'ils vont rencontrer, ou au contraire qu'ils veulent éviter.

Ils requièrent également la connaissance des caractéristiques mécaniques et hydrauliques de ces terrains sur lesquels ils s'appuient ou dont, au contraire, ils subissent les pressions et dont ils perturbent toujours l'équilibre, au moins le temps des travaux.

Ceci est particulièrement vrai des travaux souterrains où les roches et les sols encaissants font corps avec l'ouvrage et constituent un matériau de construction à part entière.

Obtenir ces informations suppose souvent la mise en oeuvre de nombreux métiers très différents, et seules des équipes pluridisciplinaires peuvent concevoir et conduire des reconnaissances bien adaptées au projet, puis obtenir une image de la réalité aussi fiable que possible.

Enfin, il est fondamental de rappeler qu'en géologie et en géotechnique comme ailleurs l'image que l'on a de la réalité est totalement dépendante des objectifs que l'on poursuit et des outils que l'on choisit pour les atteindre. Plus les reconnaissances sont précises et diversifiées plus les méthodes sont sensibles, plus les ingénieurs sont nombreux -de spécialités et d'expériences différentes- et plus cette image de la réalité sera complexe, au point parfois de faire oublier l'essentiel.

### **Les 5 paramètres géologiques dont dépendait la réussite du projet :**

En permanence il a fallu traquer l'erreur de logique, hiérarchiser les objectifs et identifier les causes d'incertitudes lors des 5 phases suivantes :

- Définir les données nécessaires au projet et hiérarchiser leur importance pour la réussite du projet,
- Organiser et concevoir les reconnaissances de telle façon que les données les plus importantes soient le mieux possible appréhendées,
- Mesurer les caractéristiques physiques mécaniques et hydrauliques, en identifiant et en réduisant chaque cause d'erreur ou d'incertitude,
- Interpréter les résultats en tenant compte des incertitudes résiduelles,
- Prévoir les difficultés lors des travaux, compte tenu des particularités de chaque zone.

La connaissance de 5 paramètres déterminait la réussite du projet, et pour chacun d'entre eux, outre la nécessité d'une mesure précise tout le long du détroit, subsistait en 1985 un certain nombre de doutes fondamentaux quant à leur identification ; doutes qu'il a fallu lever :

- ❶ Le toit des Argiles du Gault, la limite inférieure à ne jamais franchir. Il constitue un puissant réflecteur géophysique mais jusqu'en 1986, la position exacte de ce réflecteur n'avait jamais pu être objectivement déterminée sur les coupes géophysiques.
- ❷ Le toit de la Craie Bleue, la limite supérieure sous laquelle se maintenir le plus souvent possible. Sa définition géologique était jusqu'ici très impécise et variable d'un auteur à l'autre, difficile à repérer en sondage ; son identification sur les coupes géophysiques était encore plus problématique.
- ❸ La position et la typologie des failles, qu'il faudra traverser quand elles ne pourront être évitées.
- ❹ La perméabilité du terrain, qui détermine l'importance des venues d'eau. Les mesures disponibles en 1985 étaient de très faibles qualités et très dispersées.
- ❺ La cote des fonds marins, qui définit la surface par laquelle on peut rattacher au système de nivellement la cote des différents horizons géologiques. Toute incertitude sur la bathymétrie devient une incertitude géologique.

### **Les 2 aléas majeurs :**

Il ne faut pas perdre de vue que 2 aléas et 2 seulement pouvaient conduire le projet à la catastrophe :

- Rentrer de façon imprévue dans les Argiles du Gault
- Rencontrer de façon imprévue une zone très aquifère -pouvant conduire à des débits de l'ordre du  $m^3/s$ - telle que faille majeure, craie très altérée ou extension de la fosse Dangeard.

### **Les différences entre la partie Française et la partie Anglaise :**

Distinguer la partie française de la partie anglaise du Tunnel sous la Manche est en principe une hérésie puisque ce qui a rendu possible ce projet, c'est précisément la continuité des structures géologiques au travers du détroit, continuité pressentie dès 1751 et démontrée dès 1877.

Mais continuité ne veut pas dire parfaite homogénéité ou absence de singularités locales.

Les particularités de la partie française du Tunnel sous la Manche peuvent se résumer en 5 points :

- 1- Une partie sous terrestre traversant des craies Sénoniennes et Turoniennes très différentes des craies Cénomaniennes que le projet rencontrera ensuite tant sous la Manche que dans la partie sous-terrestre anglaise.
- 2- Dans la partie sous-marine, un fort pendage Nord-Nord-Est-Est de 10 à 25° -alors qu'il est quasi nul côté anglais- dont les conséquences pratiques sont, d'une part une plus grande difficulté d'interprétation et de précision des reconnaissances géologiques et géophysiques, et d'autre part une réduction de l'intervalle disponible pour implanter les 3 tunnels dans la fameuse Craie Bleue du Cénomanién (d'autant que la Craie Bleue est moins épaisse côté français).
- 3- La présence de plusieurs failles relativement importantes, alors qu'il n'y en a aucune dans la partie sous-marine anglaise, failles qu'il a fallu repérer très précisément, caractériser et enfin traverser faute de pouvoir les éviter (une seule a été "vue" lors du creusement au PK 7,6).
- 4- Une plus forte perméabilité de la Craie Bleue, due à une plus forte fracturation, elle-même conséquence à la fois d'une tectonique et d'une teneur en calcaire plus importantes que dans la partie anglaise.
- 5- Les Argiles du Gault en épaisseur beaucoup plus faible que du côté anglais (10 à 15 m contre 30 à 45 m) et dont le toit sous le Tourtia est ici argileux contrairement au côté anglais où existe un banc marno-calcaire assez important appartenant aux Craies Cénomaniennes inférieures, avec comme conséquence pratique un plus grand risque de sous-pression due aux Sables Verts de l'Aptien et de fluage des argiles pendant et après le creusement.

En synthèse, malgré une géologie globalement très favorable où de 1986 à 1991 rien de fondamental n'est venu contredire l'enthousiasme de l'ingénieur BRETON qui creusa la 1ère galerie française de 1882 à 1884, des conditions plus délicates que côté anglais qui ont imposé d'abord une plus grande densité de reconnaissances géologiques (les 2/3 des sondages et des levés géophysiques ont été concentrés côté français) et ensuite des méthodes de creusement plus contraignantes (Tunneliers à pression de terre travaillant fréquemment en mode fermé).

## Cadre géologique régional

- ♦ Le détroit du Pas de Calais, profond ici de 60 m au maximum, et qui résulte essentiellement de l'érosion quaternaire, après avoir été plusieurs fois exondé, recoupe sensiblement à angle droit le grand anticlinal du Weald-Boulonnais, d'orientation WNW-ESE, c'est-à-dire parallèle au projet. Le coeur de cette structure anticlinale est occupé par des roches d'âge jurassique, elles-mêmes ceinturées par des assises crétacées (craies et argiles). L'ensemble repose sur le socle primaire, qui affleure dans la région de Marquise mais que l'on a rencontré en sondage à 114 m seulement sous le terrain naturel, au droit du puits d'accès de Sangatte.

Le grand anticlinal du Weald Boulonnais est en fait composé de plusieurs flexures qui déterminent de nombreux petits anticlinaux et synclinaux secondaires, en particulier l'anticlinal de Sangatte-Quenocs qui affecte plus directement le projet côté français.

Le détroit peut-être divisé en deux unités structurales, entre lesquelles il y a continuité :

- la partie anglaise, montrant une structure relativement peu perturbée, et représentant l'extension off shore du bassin du Kent,
- et
- la partie française, plus déformée, marquée par l'anticlinal de Sangatte-Quenocs et quelques failles relativement importantes.
- ♦ Le tracé du Tunnel sous la Manche s'inscrit entièrement dans les couches crétacées qui forment la retombée nord de la structure anticlinale. Au niveau du portail français de Fréthun, les trois tunnels pénètrent dans les craies à silex du Sénonien inférieur et s'enfoncent progressivement dans les craies argileuses du Cénomaniens, qu'ils ne quitteront plus jusqu'au portail anglais.

Dans la région de Sangatte, le pendage général de ces couches crétacées est très faible : 1° à 4° maximum en direction de l'Est.

Mais, dès le début du tronçon sous-marin, en l'espace d'un kilomètre, le pendage NNE, transversal aux trois tunnels, augmente rapidement pour atteindre 20° dans la moitié française. A partir du PK19, tout aussi rapidement, il redevient très faible, 2 à 5° dans la partie anglaise.

Par ailleurs, le fond de la Manche, qui est généralement très plat et globalement incliné en pente douce vers le Sud-Ouest, est souvent entaillé par de profondes vallées fossiles comblées d'alluvions sablo-graveleuses ou de silex arrachés aux craies qui affleurent au Nord et Sud du projet. Ces vallées résultent de l'érosion glaciaire, leur position et leur modelé sont imposés par les grands traits structuraux de la géologie.

En ce domaine le projet a soigneusement évité la fosse Dangeard profonde de 80 m et située 500 m au Sud du tracé au centre du détroit à la jonction entre les parties françaises et anglaises.

- ♦ La fracturation des terrains crayeux que le projet traverse, est dû au faible rejeu, après sédimentation des craies, des failles qui existaient dans les roches jurassiques et primaires sous jacentes, et à la formation de l'anticlinal du Weald Boulonnais.

La formation des reliefs hercyniens (massif armoricain par exemple), a provoqué le plissement, l'écaillage et la fracturation des roches primaires, sur lesquelles se sont ensuite déposés les roches jurassiques et les terrains crétacés.

Il y a eu également un contrôle tectonique de la sédimentation, c'est-à-dire que l'anticlinal du Weald Boulonnais a commencé à se former pendant le dépôt des terrains crétacés. La conséquence la plus concrète est que l'ensemble des différentes couches crétacées est moins épais côté français où la sédimentation s'effectuait sur fonds déjà un peu pentés et peu profonds que côté anglais, où les sédiments argileux et crayeux se sont déposés sur des fonds subhorizontaux et plus profonds, au point que certaines couches à la base du Cénomaniens ne se sont déposées que côté anglais.

Depuis la fin de l'ère primaire la Manche a subi successivement deux phases tectoniques distensives, une phase compressive puis une nouvelle phase distensive :

- un premier épisode distensif a donné naissance dès le début de l'ère secondaire au demi-fossé d'effondrement de la Manche occidentale,
- une seconde phase distensive a duré de la fin du jurassique au Crétacé moyen (argiles du Gault, Craies Cénomaniennes) et peut être mise en relation avec le début de l'ouverture du golfe de Gascogne,
- juste après la fin du Crétacé (début de l'ère tertiaire), la couverture est soumise à une légère compression, cette déformation à grand rayon de courbure (larges anticlinaux et synclinaux du Weald Boulonnais) est contemporaine des plissements pyrénéens,
- enfin, la plupart des failles affectant aujourd'hui la couverture et intéressant le tunnel sont apparues, fin Tertiaire début Quaternaire, à l'occasion d'une troisième phase distensive au moment où se formaient les fossés tectoniques d'Alsace, de la Bresse et du Massif Central. Cette troisième phase a fait rejouer les anciennes failles du socle qui ont alors traversé la couverture crétacée qui les avait en quelque sorte scellées jusqu'ici.

L'intensité avec laquelle ces mouvements se sont effectués, en particulier le dernier mouvement distensif, n'est pas la même partout, et il est important de souligner que le projet a été situé au Nord juste à l'extérieur de la zone fortement tectonisée, et explique pourquoi le tracé ne recoupe somme toute que peu de failles majeures.

## **Stratigraphie**

Si les séries crétacées dans lesquelles s'inscrit entièrement le projet, comportent parfois des couches de nature et de propriétés très différentes, argiles, craies glauconieuses, craies à silex, elles comportent également des couches dont les frontières sont difficiles à établir parce que les changements de nature ou de propriétés sont très progressifs. Tel est en particulier le cas de la frontière entre la "Craie Bleue" et la Craie Grise sus-jacente, ou les frontières entre les Craies à silex du Sénonien et du Turonien.

Du haut vers le bas, de la plus récente à la plus ancienne, les couches qui intéressent le projet sont les suivantes, et elles sont dans cet ordre, rencontrées par le projet depuis le portail français de Frethun :

### **Craies Sénoniennes à lits de silex continus**

Les silex sont décimétriques et forment des lits quasi-continus, espacés de 0,50 à 1 m.

Le projet ne traverse ces craies que dans la partie sous-terrestre, à partir du portail de Frethun sur environ 1,5 km (PK -1,7).

### **Craies Turoniennes**

D'abord Craies Blanches à lits de silex, cette couche épaisse de 10 à 15 m sera traversée par le projet après les Craies Sénoniennes dont le faciès est identique.

Ensuite Craies Blanches à silex rares, cet ensemble épais de 12 m est formé d'une Craie Blanche, granuleuse à filets argileux verdâtres.

Après la traversée de cette couche, au PK -1, les tunnels ne rencontreront plus de silex jusqu'au portail anglais.

Enfin, Craie Marneuse, épaisse de 24 m, puis Craie Noduleuse, épaisse de 19 m côté français, 15 m côté anglais, formés de nodules de craies durcies, jaunâtres, dans une matrice crayeuse à filets marneux verdâtres.

Au total, le Turonien présente une épaisseur de 60 à 70 m.

### **Craies Cénomaniennes**

Le projet les rencontre peu avant le puits de Sangatte (PK -0,2) et ne les quitte plus jusqu'au portail anglais.

Ce qui caractérise la série des Craies Cénomaniennes c'est la diminution de leur teneur en carbonate de calcium, et corrélativement l'augmentation de leur teneur en argile, au fur et à mesure que l'on descend dans la série vers les Argiles du Gault.

Cette variation ne se fait pas de façon totalement progressive : la sédimentation des craies est cyclique avec une phase argileuse au début et une phase calcaire à la fin. Chaque cycle représentant au total 0,2 à 2 m de craies. L'enrichissement progressif en argile se traduit par des interbanes argileux de plus en plus épais et de plus en plus argileux vers la base de la série. La Craie Bleue est précisément caractérisée par ses larges interbanes marneux qui l'on rendu moins sensible à la fracturation et à l'altération, et donc moins perméable que les craies sus-jacentes.

### **Craies Cénomaniennes supérieures**

L'équivalent des anciennes craies "blanches et grises". Il s'agit de craies calcaires, organisées en quatre unités aux faciès lithologiques bien distincts :



- au sommet sous le Turonien. L'unité K épaisse de seulement 1 à 2 m, succession de petits lits marneux,
- l'unité j (10 à 15 m). Craie blanche grisâtre massive, avec quelques minces interlits marneux,
- l'unité I (15 à 18 m). Ensemble finement rythmé à bancs crayeux pluri-décimétriques avec à la base de minces lits marneux bleuâtres à verdâtres,
- l'unité H (6 à 8 m). Craie granuleuse avec de fréquents petits hardgrounds, bancs métriques de craie calcaire séparés par de très minces lits marneux. Craie indurée fréquente à la base de la formation. C'est souvent au milieu de cette unité H qu'apparaît la couleur bleue.

Le projet traverse ces craies principalement du puits de Sangatte au PK 0,5 et en quelques points du tronçon sous-marin.

### **Craies Cénomaniennes moyennes**

Equivalent thématique de l'ancienne "Craie Bleue" ou "Chalk Marl". Elles s'organisent en trois unités :

- G (7 à 10 m). Toit de la "Craie Bleue", bancs métriques de craie marneuse, souvent bleue, séparée par de larges interbancs marneux de teinte bleue plus sombre, repérable en sondage grâce à deux microfossiles spécifiques du toit de G (R. Reicheli et C. Formosus).
- F (6 à 9 m). Souvent de teinte plus claire, bancs crayeux massifs, séparés d'interlits très marneux,
- E (6 à 9 m). Chaque banc est formé à la base par des marnes qui passent progressivement vers le haut à des craies marneuses. Des bancs d'éponges se sont fréquemment installés sur les sommets crayeux des cycles de sédimentation et forment des petits niveaux décimétriques très indurés, riches en silice épigénisée.

L'épaisseur de ce que nous continuerons par commodité à appeler "Craie Bleue", est minimale au droit de l'anticlinal des Quenocs, au début du tracé sous-marin, 18 à 20 m, et augmente ensuite assez régulièrement vers l'Angleterre, 28 à 30 m.

### **Craies Cénomaniennes inférieures**

Jusque là les couches étaient communes à la partie française et la partie anglaise.

Les craies cénomaniennes inférieures s'organisent en trois unités dont seulement la seconde, D ou Tourtia, existe en égale répartition des deux côtés du détroit :

- E'. Craie massive très argileuse, épaisse de 5 à 7 m constamment présente côté anglais, et seulement du PK10 au PK17 côté français sur 1 à 2 m d'épaisseur,
- D. Tourtia ou Craie Glauconieuse (2 à 4 m). Le faciès du Tourtia est très irrégulier, il varie du grès aux sables argilo-calcaires, et le passage est toujours très progressif avec le banc supérieur (E ou E'). La base est par contre toujours indurée, et de plus forte densité, avec des nodules phosphatés, et provoque la réflexion des ondes sismiques,

- D'. Craie argileuse, crayeuse, grisâtre, au faciès intermédiaire entre les Craies Moyennes et les argiles du Gault sous-jacentes, 4 à 6 m, irrégulièrement répartie côté anglais, à l'état de trace côté français (1 à 2 m du PK10 au PK17).

L'ensemble -Craies moyennes + Craies inférieures, non compris l'unité D- atteint fréquemment 32 à 35 m et constitue, grâce à l'optimisation du tracé, 90 % de l'encaissant des trois tunnels dans le tronçon sous-marin.

♦ ARGILES DU GAULT (Albien)

Argiles noires à la base plus grises au sommet (car plus riches en carbonate de calcium), contenant de nombreux niveaux phosphatés.

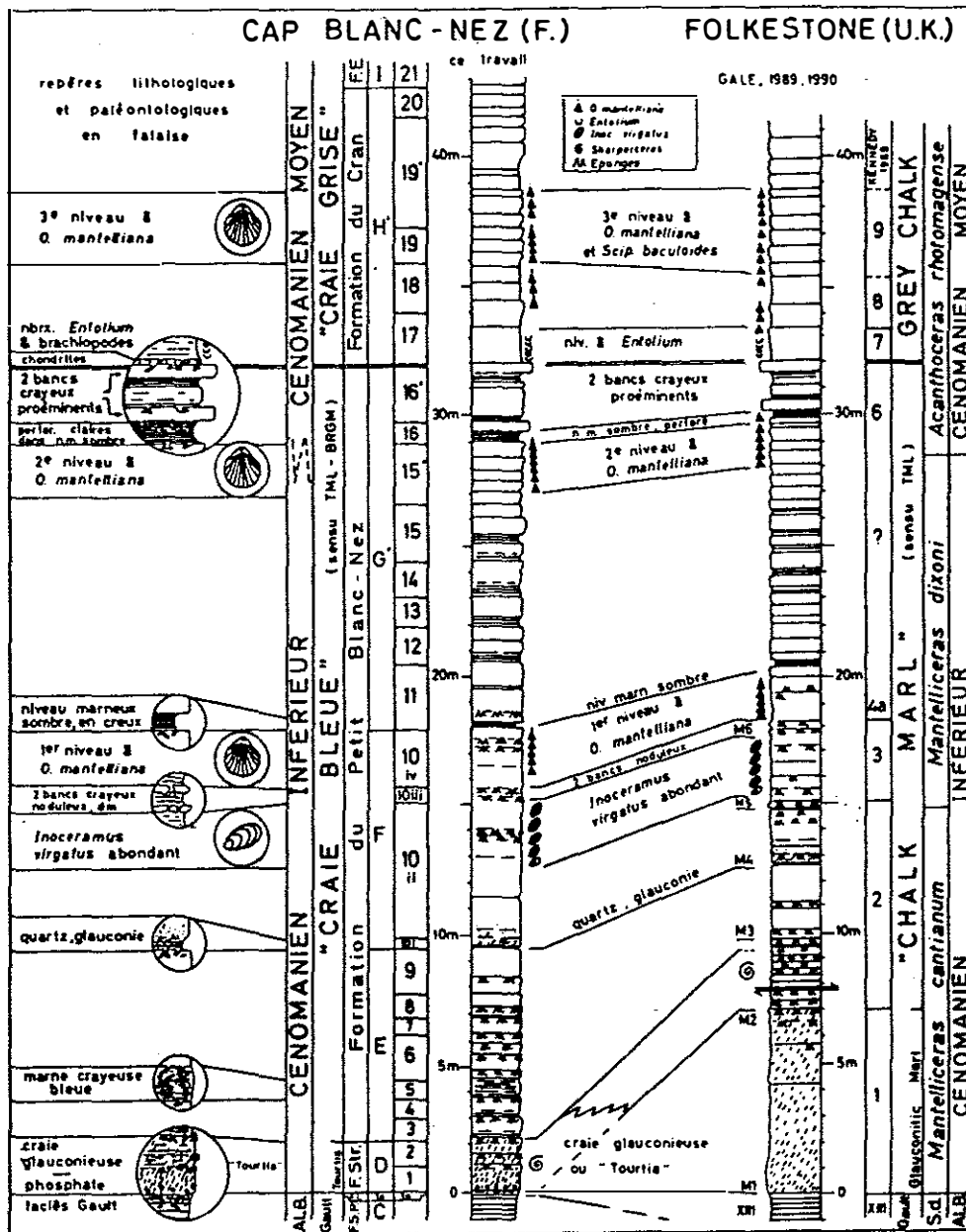
Leur épaisseur est minimale côté français, 10 à 12 m, et croît régulièrement vers l'Angleterre pour atteindre 40 m et plus.

La base de la formation est caractérisée par un petit niveau de sables glauconieux grésifié qui réfléchit les ondes sismiques.

♦ SABLES VERTS (Aptien)

Sables argileux glauconieux aux stratifications entrecroisées, 15 m côté français, 25 m côté anglais.

Les Sables Verts affleurent sur des grandes surfaces au fond du détroit à quelques kilomètres au SW du tracé, au droit des tunnels, leur niveau piézométrique devrait donc être confondu avec le niveau de la mer, les argiles de Gault formant par ailleurs un horizon étanche.



Ref. F. ROBASZYNSKI et F. AMEDRO

## Géotechnique, altération et fracturation des craies

- ♦ Les caractéristiques lithologiques et géotechniques originelles des craies peuvent être modifiées par des phénomènes d'altération plus ou moins intenses, qui ont progressé depuis la surface jusque profondément dans la série crayeuse aux époques glaciaires où le Déroit était exondé. Différents degrés croissants d'altération ont été définis, ce qui a permis finalement de définir à travers le Déroit un front inférieur de progression de l'altération. On a pu montrer qu'en général, l'épaisseur de craie saine comptée depuis le toit du Gault était une fonction linéaire de l'épaisseur de terrain située au dessus du Gault.
- ♦ On considère que les propriétés géotechniques de la matrice rocheuse ne sont pas modifiées par l'altération avant le degré III, tandis que la perméabilité du massif augmente sensiblement dès le degré II du fait de l'ouverture des fissures. Cependant l'altération est un phénomène diffus et progressif que l'on ne peut presque jamais délimiter au mètre près : l'altération commence d'abord par décolorer en jaune les épontes des fractures, puis progresse vers le centre des blocs en ne laissant subsister qu'un noyau de roche saine, avant de concerner enfin la totalité du massif. De plus, on a constaté qu'elle pénétrait plus profondément dans le massif crayeux au voisinage des failles et probablement aussi au voisinage des zones fortement fracturées.
- ♦ La perméabilité du massif crayeux résulte du réseau de fractures qui le parcourt. La matrice crayeuse est en elle-même quasi imperméable : des mesures sur échantillons au laboratoire ont donné des valeurs de l'ordre de  $10^{-10}$ m/s pour la "Craie Grise" et de  $10^{-11}$ m/s à  $10^{-12}$  pour la "Craie Bleue", la plus argileuse et la moins poreuse. La perméabilité du massif fracturé, au moins 100 fois plus élevée, dépend à la fois :
  - de la géométrie du réseau de fractures (densité, orientation, extension et surtout degré d'interconnexion des différentes familles directionnelles) ;
  - de la conductivité hydraulique de chaque fracture individuelle (ouverture, remplissage, rugosité, continuité...).

La maille de fracturation est presque toujours inférieure à 1 mètre dans les craies cénomaniennes, sauf dans la partie inférieure de la "Craie Bleue" là où l'on a cherché à placer les Tunnels, où elle peut atteindre jusqu'à 2,5 mètres, d'où une assez faible perméabilité de l'ordre de  $1.10^{-9}$ m/s.

- ♦ Ce phénomène d'altération, la fracturation diffuse et irrégulière des terrains et la cyclicité décimétrique des dépôts de craies compliquent considérablement la détermination et le choix des caractéristiques physiques, mécaniques et hydrauliques à retenir pour les calculs des ouvrages.

**Conclusion** : Une première mondiale : l'utilisation de la géostatistique pour caler le tracé d'un ouvrage de Génie Civil.

Une démarche originale et pleine de bon sens avait été retenue pour optimiser le tracé des 150 Km de Tunnel qui relie désormais la France et l'Angleterre 900 000 ans après l'ouverture du détroit : grâce aux méthodes géostatistiques, connaître en tout point -dans un couloir de 1 Km- la précision avec laquelle est prévu chacun des principaux paramètres du projet ; toit de Gault, toit

de la Craie Bleue, perméabilité de la Craie Bleue etc. pour faire passer les tunnels là où la précision est la meilleure. Si cela n'était pas possible, soit faire face au risque correspondant en adaptant le calage du tracé au degré de confiance que l'on peut accorder aux paramètres clés, ou en adaptant les méthodes de travaux, soit améliorer cette précision en conduisant de nouvelles reconnaissances, démarche suivie pour l'implantation des 2 Cross over.

Cette précision dépend de la précision des données elles-mêmes, de leur répartition, de la complexité du phénomène à représenter **et surtout de l'inévitable interpolation entre les données, fait généralement et bizarrement toujours "oublié"**.

Les méthodes géostatistiques ont permis de faire ces calculs, d'optimiser les reconnaissances et leur interprétation a permis de définir par exemple la position du toit du Gault avec un écart type de seulement  $\pm 2$  à 3 m en partie courante et  $\pm 1$  à 1,5 m au droit du Cross over.

Côté français ce paramètre a été vérifié pendant les travaux environ tous les 250 m et dans 44% des cas l'écart avec la prévision est resté dans un intervalle de  $\pm 1$  m et dans 82% des cas dans un intervalle de  $\pm 2$  m, c'est-à-dire des résultats sensiblement meilleurs que les écarts statistiquement prévus et ayant servi de base au calage du projet.

Cela valide à la fois l'ensemble de la chaîne des reconnaissances dont chacune des phases avait été rigoureusement optimisée et poussée à ses limites technologiques, et les méthodes géostatistiques qui ont permis de faire passer les Tunnels dans les meilleures conditions géologiques possibles, et ce sans aucune surprise importante.

## **BIBLIOGRAPHIE**

Pierre DUFFAUD - Patrick MARGRON  
Le Tunnel sous la Manche -géologie et géotechnique-  
1990 - Presse de l'Ecole Nationale des Ponts & Chaussées.

Raymonde BLANCHIN - Patrick MARGRON - Jean PIRAUD  
Tunnel sous la Manche -les calculs géologiques à l'épreuve des faits.

Franchissements souterrains pour l'Europe.  
A.A BALKEMA - 1990

F. ROBASYNSKI et F. AMEDRO  
Les falaises crétacées du Boulonnais  
La coupe de référence du Cap Blanc Nez dans un contexte  
sédimentaire global.  
1991 - Annales de la Société Géologique du Nord - Lille