

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Tunnel sous la Manche – Calcul de la coupe géologique par interpolation géostatistique entre sondages et profils sismiques

The Channel tunnel – Geostatistical estimation of the geological section by interpolation between boreholes and seismic profiles

R.BLANCHIN, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France

J.P.CHILES, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France

P.MARGRON, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France

J.PIRAUD, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), Orléans, France

RESUME - Les méthodes géostatistiques ont été appliquées à l'étude des surfaces et épaisseurs des différentes couches intéressant le projet. Outre une interprétation optimale des données (sondages et profils de sismique réflexion), elles ont permis de cartographier les incertitudes avec lesquelles étaient connus les différents paramètres du projet, compte tenu de la qualité des données, de leur répartition, de la plus ou moins grande variabilité des paramètres étudiés. Le tracé du tunnel a pu être ainsi optimisé en toute connaissance de cause, en évitant les zones de grande incertitude ou en y adoptant des dispositions spéciales.

1 - INTERET DE LA GEOSTATISTIQUE

On oublie souvent que le dessin d'une coupe géologique le long d'un ouvrage nécessite toujours une interpolation entre des points où l'information est connue (affleurements, sondages, profils géophysiques). Ce dessin, même s'il incorpore toute l'expérience du géologue et bien qu'il soit souvent déterminant pour la sécurité du projet, reste une image en grande partie subjective, dont on ne sait pas évaluer la précision. En effet, toute interpolation introduit une incertitude supplémentaire qui s'ajoute à l'incertitude propre aux données de mesure.

L'intérêt de la géostatistique est d'abord de remplacer ce dessin par un calcul, qui permet d'estimer en tout point la valeur la plus probable du paramètre recherché. Une telle interpolation tient compte à la fois :

- de la densité et de la répartition des données de mesure dans le domaine étudié,
- de la variabilité du paramètre étudié dans l'espace et des tendances régionales qu'il présente,
- de la précision propre à chaque donnée de mesure.

Ensuite et surtout, la géostatistique permet de quantifier tout le long de l'ouvrage l'incertitude qui entache chaque valeur interpolée, puisque par définition la valeur la plus probable est celle pour laquelle l'incertitude d'estimation est minimale.

2 - PROBLEMATIQUE DU TRACÉ DU TUNNEL

Dans le cas du Tunnel sous la Manche, il importait avant tout d'optimiser le tracé pour placer l'ouvrage dans les meilleures conditions géologiques possible.

Pour cela il fallait maîtriser en tout point du détroit dans un couloir large de 1 km et long de 37 km, la précision avec laquelle on pouvait connaître la position, l'épaisseur et la perméabilité de la couche la plus favorable au creusement, à savoir la "Craie Bleue" du Cénomaniens (fig. 1). Le niveau exact du bas de cette couche était un facteur particulièrement critique puisqu'elle surmonte presque sans transition une argile, dite Argile du Gault, dont la traversée poserait d'importants problèmes d'abord pour l'avancement du tunnelier, ensuite pour le soutènement.

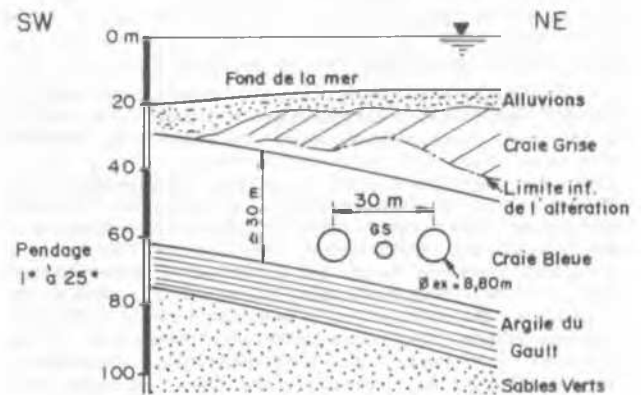


Fig. 1 - Coupe transversale typique du Tunnel sous la Manche (GS = Galerie de service)

Confronté à ce problème, le groupement d'entreprises Transmanche Link, chargé par Eurotunnel de la conception et de la réalisation du Tunnel sous la Manche, a confié au BRGM, en association avec Mott, Hay & Anderson, la définition, le contrôle, l'interprétation et la synthèse des reconnaissances complémentaires nécessaires à cet objectif. Les reconnaissances en mer effectuées en 1986-87 ont compris essentiellement 550 km de profils de sismique-réflexion multitraces, calés sur 12 sondages carottés à partir de plates-formes auto-élévatrices, qui ont complété les 90 sondages réalisés dans le détroit depuis 30 ans.

3 - CALCUL DE LA COTE DU TOIT DES ARGILES DU GAULT

La cote du toit des Argiles (G), c'est-à-dire de la base de la "Craie Bleue" se déduit des levés bathymétriques et de la lecture des sections sismiques par la formule :

$$G = M + V (t_{\frac{1}{2}} - t_m) / 2, \text{ avec}$$

- M = profondeur de la mer mesurée à l'échosondeur,
- V = vitesse moyenne du son entre le fond de la mer et le sommet des Argiles,
- $t_{\frac{1}{2}}$ et t_m = temps doubles ou sont pointés respectivement le réflecteur associé au Toit du Gault et le fond de la mer.

Il importe ici de souligner qu'un tel calcul n'a été possible que grâce aux mesures effectuées dans les sondages carottés, qui ont permis d'identifier objectivement la signification stratigraphique des différents réflecteurs géophysiques (méthode des traces sismiques synthétiques).

Chacun de ces 3 paramètres M, V et At a fait l'objet, de manière indépendante, d'une analyse géostatistique qui a conduit à diviser le détroit en zones homogènes où chaque paramètre présente un même degré de variabilité. Puis chaque paramètre a été "estimé" (c'est-à-dire interpolé), au droit des noeuds d'une grille de maille élémentaire 20 x 40 m, couvrant tout le corridor "utile" du détroit. Le calcul d'interpolation, appelé krigage, a ainsi concerné près de 50 000 points.

Une fois M, V et At calculés aux noeuds de la grille, un contrôle de cohérence et diverses corrections ont été effectués grâce à l'édition automatique, pour chaque paramètre, d'une part de cartes d'iso-valeurs à 1/5 000, d'autre part de cartes d'iso-incertitude également à 1/5 000. La cote résultante du sommet des Argiles du Gault a alors été calculée et cartographiée, ainsi que d'autres paramètres sans signature géophysique qui ont été interpolés par géostatistique à partir des seuls forages en mer (épaisseur de la Craie Bleue, épaisseur de craie non altérée, et perméabilité de la Craie Bleue).

Les résultats ont été remis à Transmanche Link sous forme d'un fichier informatique, donnant la cote des différentes couches géologiques (y compris le fond de la mer) dans tout le couloir intéressé par le projet. Le croisement de ce fichier avec les coordonnées (X,Y) des divers tracés en plan envisagés a permis de tracer par ordinateur des coupes géologiques longitudinales ou transversales à différentes échelles, telle que celle présentée ci-après (fig. 2). La validité de ce fichier a été vérifiée d'une part en ré-estimant les points expérimentaux, d'autre part en s'assurant que l'interpolation géostatistique directe des différents paramètres au droit du tracé ne conduisait pas à des résultats significativement différents de l'interpolation entre les noeuds de la grille.

4 - CALCUL DE L'INCERTITUDE SUR LES RESULTATS

L'incertitude sur la cote du sommet des Argiles du Gault calculée en tout point résulte de la combinaison des trois couples d'incertitude (erreur absolue sur les mesures et incertitude due à l'interpolation) associés aux paramètres M, V et At. Elle s'exprime sous la forme d'un "écart-type d'estimation" σ , qui dans une répartition Gaussienne (ce qui est grosso modo le cas ici) permet de définir un intervalle $[x-\sigma, x+\sigma]$ qui contient 68 % des valeurs qui seront rencontrées.

Pour chaque paramètre intermédiaire, puis pour le paramètre résultant G, cet écart-type a été calculé en tout point de la grille, puis cartographié (fig. 3) et reporté sur les coupes géologiques. Dans le couloir d'étude du projet, l'écart-type d'estimation sur la cote du Toit des Argiles varie de 2 à 6 m, mais sur les 3/4 du tracé sous-marin projeté cet écart-type est de 2 à 3 m seulement et il n'excède pas 4 m dans le quart restant. L'optimisation du profil en long s'est faite en respectant quasi systématiquement une distance d'au moins un écart-type entre la cote du radier et la cote moyenne du sommet des Argiles. Concrètement cela signifie qu'en plaçant le radier des tunnels à un écart-type au-dessus de la cote moyenne calculée, la probabilité de tangenter ou traverser les argiles n'est que de 16 % (voir tables de la loi normale, probabilité de rencontrer une valeur supérieure à une valeur donnée). En se plaçant à deux écarts-types au-dessus, cette probabilité n'est plus que de 2,3 %.

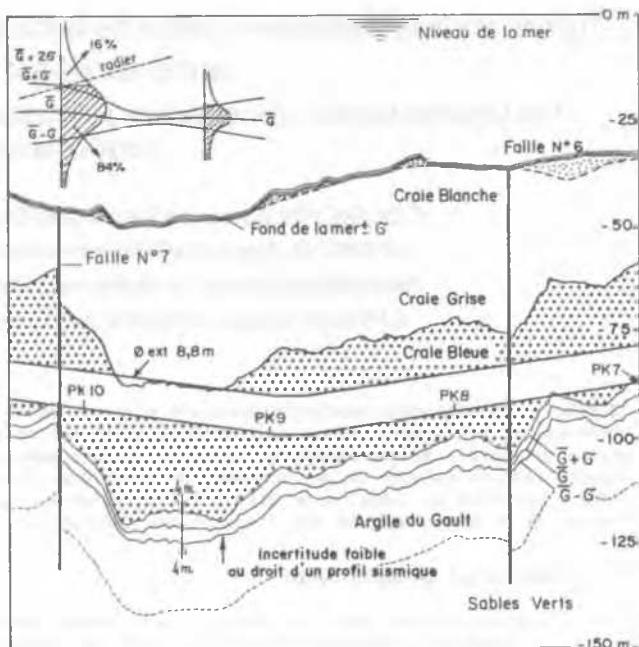


Fig. 2 - Coupe géologique tracée par ordinateur (PK7 à PK10), avec indication de l'écart-type d'estimation sur le sommet des Argiles du Gault

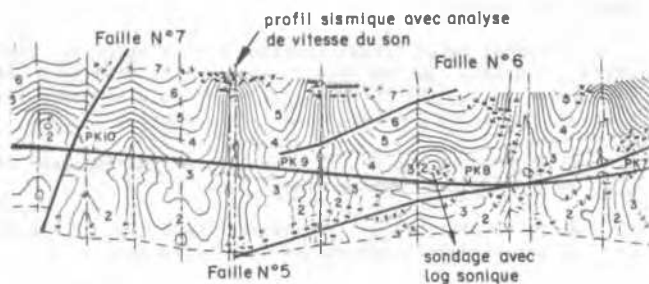


Fig. 3 - Carte d'iso-incertitude (σ en mètres) sur le sommet des Argiles du Gault. Equidistance des courbes = 0,5 m

Là où les contraintes géométriques propres à un tracé ferroviaire ou à des ouvrages particuliers empêchent de maintenir le tracé à l'extérieur de la zone d'incertitude, il a ainsi été possible non seulement de quantifier de façon statistique le risque encouru, mais aussi de calculer quelle densité et quelle configuration donner aux reconnaissances complémentaires (sondages et géophysique) pour abaisser ce risque au-dessous du seuil souhaité. C'est cette seconde démarche qui a été suivie pour définir les reconnaissances qui permettront d'optimiser la position des deux "cross-over", ouvrages de 24 m de diamètre et 250 m de long qui assureront la jonction des tunnels ferroviaires.