

Problèmes hydrologiques et géologiques dans les travaux de la Jonction Nord-Midi

La granulométrie des terrains

PAR

J. THOREAU

Professeur à l'Université de Louvain.

On ne peut concevoir qu'un travail de l'importance de la Jonction Nord-Midi, devant entamer le sol profondément, sur une grande largeur et en continuité sur plus de deux kilomètres de longueur, en pleine agglomération bâtie, eût été entrepris sans une étude préalable, très minutieuse, des terrains à traverser. Dès les premiers projets relatifs à cette vaste entreprise, la question du comportement des terrains, des moyens propres à vaincre les obstacles qu'ils devaient opposer au travail, fut posée.

Sans doute les géologues sont-ils informés depuis longtemps des caractères généraux de la structure du sol du versant droit de la vallée de la Senne, dans la zone où devait se réaliser la Jonction des deux stations du Nord et du Midi. Mais, en présence des problèmes techniques posés, il s'agissait de connaître dans le détail la composition du sol, aux points précis où allaient s'établir des puits du chemin de fer et se poser leurs fondations. Double était l'objectif à atteindre : assurer l'exécution de l'ouvrage à l'abri de tout risque d'accident ainsi que sa stabilité et, d'autre part, protéger de tout dommage les édifices situés à proximité de la zone de travail, notamment les monuments historiques que constituent les vieilles églises de la Chapelle et de Sainte-Gudule. Dans la vaste fouille à pratiquer, d'après le mode de travail auquel on s'était arrêté, contenir les terrains; dans les zones extérieures, empêcher tout déplacement et, si possible, tout tassement.

Un facteur essentiel du comportement du sol réside dans ses caractères hydrologiques, eux-mêmes déterminés par la constitution granulométrique des sables et argiles ainsi que par la structure d'ensemble des formations traversées. Il s'imposait donc de reconnaître le sol par des sondages rapprochés; deux lignes de puits furent prévues, à peu près parallèles entre elles, longeant vers l'extérieur l'emplacement futur des deux rideaux de palplanches entre lesquels devait s'établir l'ouvrage. En outre, aux abords des monuments à protéger, quelques sondages étaient disposés sur des lignes transversales, jusqu'à une certaine distance vers l'Est (côté : haut de la ville) du tracé de la Jonction.

Les échantillons de sable méthodiquement prélevés et étudiés à la fois dans leurs caractères généraux, en rapport avec la stratigraphie géologique, et dans leurs caractères granulométriques, ont permis, avant que ne soient entamés les travaux de creusement de la Jonction, d'établir la coupe des terrains traversés et l'allure des surfaces séparant les divers horizons; la connaissance de la nature exacte de ces terrains et de leurs caractères hydrologiques devait permettre de prévoir leur réaction et celui de la nappe aquifère en présence des travaux de pénétration. D'autre part, par l'observation du niveau hydrostatique dans les sondages au cours des diverses phases du travail, avant et après l'établissement des rideaux de palplanches, puis à mesure des progrès du rabattement de la nappe aquifère opérée entre les palplanches, on a pu suivre le comportement de cette nappe dans les zones externes du tracé des puits.

L'objet de la présente note est de dégager les principaux aspects des problèmes ainsi posés au géologue et à l'hydrologue. Après avoir tracé les caractères essentiels de la constitution du sol et de la situation hydrologique souterraine, tels qu'ils ont été révélés par les sondages, nous nous arrêterons à l'étude granulométrique des terrains et aux problèmes intéressés aux données de cette étude. La note se terminera par un aperçu très sommaire du comportement manifesté par la nappe aquifère souterraine au cours des travaux.

STRUCTURE DES TERRAINS.

Sous une certaine épaisseur de terrains remaniés de main d'homme, qu'il était naturel de rencontrer presque partout au cœur d'une vieille ville couverte de constructions, les sondages, menés pour la plupart jusque vers la cote + 5 (au-dessus du niveau de la mer), ont recoupé trois horizons géologiques distincts : des dépôts quaternaires, le bruxellien et l'yprésien supérieur. Mais les deux premiers n'existent pas partout et leur développement peut varier beaucoup, même entre des points rapprochés.

C'est une des observations intéressantes de la reconnaissance systématique effectuée à l'occasion des travaux de la Jonction, que celle relative aux allures de la surface séparant le bruxellien de l'yprésien : des puits distants l'un de l'autre de 20 à 25 mètres ont fréquemment noté des différences de l'ordre de 4 à 5 mètres dans le niveau de cette surface. Dans l'ensemble, cette dernière s'incline vers le talweg de la vallée de la Senne, donc de l'Est vers l'Ouest.

Mais le bruxellien n'est bien développé qu'aux deux extrémités du parcours souterrain de la Jonction, c'est-à-dire aux environs de l'église de la Chapelle, vers le Sud, et entre la rue Orsendael et le Jardin Bota-

nique, vers le Nord; il existe, de plus, aux environs de l'église Sainte-Gudule et en certains points avoisinant la Banque Nationale. De la rue de l'Escalier jusqu'aux environs de Sainte-Gudule, il n'a pas été rencontré.

Quant aux dépôts rapportés au quaternaire, sables ou limons argilo-sableux, ils se développent surtout des parages de la rue de l'Hôpital jusqu'à la rue de la Madeleine, puis de façon fort irrégulière, en quelques points, entre la rue de Loxum et le Jardin Botanique. Nous faisons abstraction ici des environs immédiats de la Gare du Nord, où, à l'approche du fond de la vallée de la Senne, se retrouvent des dépôts quaternaires très épais. Mais la voie ferrée dans cette zone se rapproche rapidement du niveau du sol pour le dépasser bientôt et pénétrer en viaduc dans la gare surélevée.

On voudra bien noter que nous décrivons ici la situation telle qu'elle se révélait par l'étude des sondages; la distinction entre terres remaniées de surface et terrains sous-jacents en place, parfois malaisée à faire sur les petits échantillons retirés par la sonde, était particulièrement délicate vis-à-vis des dépôts quaternaires.

L'yprésien constitue uniformément, en continuité, la base des terrains que devaient recouper les travaux de la Jonction; les sondages se sont tous arrêtés au sein de cet étage. Surmontés dans les zones indiquées plus haut, soit des sables bruxelliens, soit de dépôts quaternaires, parfois des uns et des autres, les terrains yprésiens s'élèvent en mains endroits jusqu'à la couverture de sol remanié. Presque partout, c'est dans cet horizon que s'est établie l'assiette des puits.

Pour compléter ce schéma de la structure du sol, il importe, avant même que nous analysions les résultats des essais granulométriques, de marquer l'opposition très nette des caractères des sables bruxelliens et des terrains yprésiens, principaux intéressés à la large fouille que devaient pratiquer les travaux de la Jonction: les sables bruxelliens, jaune-pâle à jaune-ocre, rudes, relativement grossiers, souvent un peu graveleux vers la base; les sables yprésiens jaune-gris à gris, beaucoup plus fins et le plus souvent un peu argileux, avec des horizons lenticulaires franchement argileux, véritables argiles sableuses. Dans la zone Sud du souterrain de la Jonction, un lit très argileux existe de façon presque continue en tête même de l'yprésien, sous les sables bruxelliens. On gardera en vue ces caractères pour comprendre le comportement des terrains et celui de la nappe aquifère en présence des travaux de creusement du sol et d'épuisement de l'eau souterraine.

Notons encore que, durant la période préparatoire aux travaux, les sondages ont permis de dresser la carte de la surface de la nappe aquifère, avec ses variations saisonnières. En gros, et abstraction faite des accidents transversaux, cette surface incline de l'Est vers l'Ouest, comme la surface du sol elle-même sur le versant droit de la vallée de la Senne.

ETUDE GRANULOMETRIQUE ET CARACTERES HYDROLOGIQUES DES TERRAINS.

La composition granulométrique intéresse, avant tout, les problèmes divers en rapport avec l'hydrologie souterraine: caractères de la nappe aquifère, problème de l'isolement des terrains de la fouille et des terrains extérieurs, problèmes de l'épuisement lui-même, rayons d'influence et débits des puits filtrants, composition des chemises de filtration, etc.

La définition granulométrique d'un terrain est basée sur des règles en partie conventionnelles. Après classement suivant un mode opératoire, qu'il importe de garder très constant, à l'aide d'un jeu de tamis superposés de maille décroissante du haut en bas de la colonne et soumis à des secousses en nombre bien déterminé dans un dispositif mécanique, les proportions des divers lots obtenus sont traduites dans un diagramme à échelle logarithmique où se lisent deux valeurs qui serviront à caractériser le terrain au point de vue granulométrique: à savoir les diamètres auxquels sont inférieurs, en dimensions, respectivement 60% et 10% de la masse des grains du sable étudié. Si on désigne par d_1 (60%) et d_2 (10%) ces diamètres, d_2 porte le nom de «diamètre effectif», et le quotient d_1/d_2 celui de «coefficient d'uniformité».

Ce dernier critère donne la mesure du degré d'hétérogénéité du sable au point de vue de la dimension de ses éléments constituants.

L'analyse granulométrique a été faite, pour chaque sondage, sur un certain nombre des échantillons prélevés systématiquement de 50 en 50 centimètres et, en tout cas, chaque fois qu'un changement se manifestait dans l'aspect du terrain. Le long de la coupe de sondage, on a construit des diagrammes montrant la variation des diamètres d_1 et d_2 et celle du coefficient d'uniformité sur la hauteur du trou.

L'allure de ces diagrammes est immédiatement instructive. Le passage d'une formation géologique à une autre s'y trahit sans ambiguïté. Dans l'yprésien, les diamètres d_1 et d_2 sont toujours très petits et peu variables; le coefficient d'uniformité lui-même est assez constant. Le bruxellien accuse des diamètres sensiblement plus forts, mais un coefficient d'uniformité généralement peu différent de celui de l'yprésien; toutefois, dans le secteur Sud de la Jonction, la base du bruxellien, un peu graveleuse, marque un accroissement du diamètre d_1 et un relèvement important du coefficient d'uniformité. Quant aux dépôts quaternaires, leurs caractères sont beaucoup moins constants; ils peuvent varier assez brusquement sur l'épaisseur du dépôt dans un même sondage. Très souvent, l'analyse accuse une forte hétérogénéité, quant à la dimension des grains, c'est-à-dire un coefficient d'uniformité élevé, d_1 devenant relativement grand tandis que le diamètre effectif d_2 reste petit; mais ce n'est pas une règle constante et il y a des limons uniformément plus grossiers ou plus fins.

Complétées par les données minéralogiques sur la nature des composants, les caractéristiques granulométriques sont les facteurs déterminants du comportement hydrologique des terrains. L'examen minéralogique a suivi régulièrement l'essai granulométrique; il a mis en évidence la part importante prise par les minéraux argileux dans la composition de divers horizons de l'yprésien, et aussi par la glauconie.

Il a paru intéressant d'étudier par l'expérimentation au laboratoire les caractères conférés aux terrains par les facteurs précédents au point de vue de la circulation souterraine de l'eau. Il n'entre dans le cadre de cette note, ni de décrire les dispositifs dont il a été fait usage pour cette étude, ni de donner par le détail les résultats auxquels celle-ci a conduit. Qu'il nous suffise de dire que, dans les conditions de l'expérience, des mesures ont été faites de la vitesse de filtration (V) à travers le sable de l'épreuve et de la perte de charge (J) au cheminement correspondant à des pressions hydrostatiques diverses.

Le coefficient $K = V/J$ présente une valeur voisine de 0,40 dans les sables bruxelliens et de 0,01 dans les sables yprésiens, V s'exprimant en mètre/heure et J en mètres de hauteur par mètre d'épaisseur de sables traversés. La vitesse V est une vitesse réelle, que l'on obtient en divisant la vitesse apparente, estimée d'après le débit à travers une section déterminée de sable, par le coefficient de porosité p ($p = 0,45$ pour le sable yprésien, 0,59 pour le sable bruxellien).

Les caractéristiques hydrologiques du terrain ainsi définies permettaient de prévoir le débit des puits filtrants, créés en vue de l'assèchement des terrains dans la zone comprise entre les rideaux de palplanches, ainsi que l'allure des surfaces de rabattement autour de ces puits. Le choix du diamètre à adopter pour ceux-ci et de leur espacement devait en dépendre. Les essais expérimentaux ont fixé également les vitesses d'entraînement, par l'eau souterraine en mouvement, des particules les plus fines du terrain, vitesses pouvant imposer une limitation du débit des puits en pompage. Enfin l'expérimentation s'est portée sur la composition à adopter pour les sables et graviers des chemises filtrantes de ces puits, afin d'assurer la filtration des eaux, tout en évitant un entraînement des sables susceptible de provoquer des déplacements au sein des formations aquifères.

Mais l'observation des terrains dans les trous de sonde. Leur étude granulométrique et celle de leurs caractères dans la circulation souterraine de l'eau devaient conduire à des constatations d'une portée plus générale. L'ensemble des terrains yprésiens recoupés par les sondages constitue une unité hydrologique, en dépit des subdivisions qu'y établissent les horizons argileux. On a vu, en effet, que ceux-ci ont un caractère lenticulaire; tout au plus confèrent-ils à l'ensemble un certain caractère d'hétérogénéité, les communications entre horizons aquifères secondaires pouvant être difficiles et les pertes de charge élevées. Ce manque d'homogénéité de la nappe a été clairement mis en évidence par les travaux d'épuisement qui sont venus déranger l'équilibre acquis par l'eau souterraine, au cours des temps, au sein du complexe formé par l'yprésien supérieur.

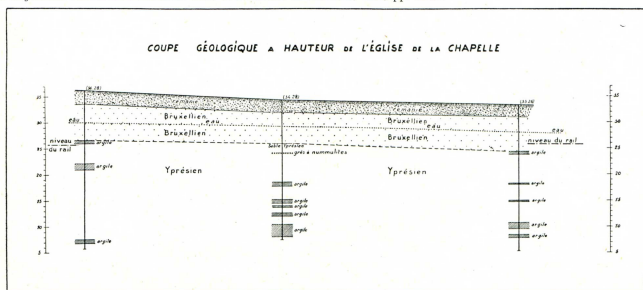
La nappe aquifère yprésien n'est elle-même pas indépendante de celle contenue dans les sables bruxelliens; par endroit (zone de l'église de la Chapelle), l'horizon argileux qui règne de façon assez continue à la tête de l'yprésien tend toutefois à les séparer plus nettement, mais sans aller jusqu'à les isoler l'une de l'autre, ainsi que le montrent les observations dont nous allons parler.

COMPORTEMENT DE LA NAPPE AQUIFERE AU COURS DES TRAVAUX.

La manière dont la nappe aquifère et les terrains saturés d'eau réagiraient devant les travaux à entreprendre constituait le point essentiel des problèmes posés dans l'étude du sol. A la suite des considérations basées sur les données des sondages de reconnaissance et se rapportant aux caractères de structure et de composition des terrains, à l'état d'équilibre de la nappe aquifère avant tous travaux, ainsi qu'aux prévisions qu'on pouvait établir sur le comportement du sol, il est évidemment d'un grand intérêt de placer une analyse des observations qui furent faites au cours même des travaux.

Cette analyse a déjà fait l'objet, dans une forme assez condensée, de notes antérieures (1). Le lecteur pourra s'y référer; nous nous bornerons ici à en rappeler les conclusions essentielles, tout en notant qu'elles

(1) J. THOREAU. — Observations sur les sables aquifères recoupés par les travaux de la Jonction à Bruxelles. Association Française pour l'Avancement des Sciences, 63^e session - Liège - 1939.
 J. THOREAU. — Considérations sur les caractères hydrologiques des sables bruxelliens et yprésiens recoupés par les travaux de la Jonction Nord-Midi à Bruxelles. Ann. Soc. Scientif. de Bruxelles, 1939, pp. 90-96.



ne se rapportent qu'au seul premier tronçon des travaux, à savoir celui s'étendant de l'entrée des puits, côté Sud, jusqu'à la rue de l'Hôpital.

Le plan d'exécution des travaux prévoyait le rabattement de la nappe entre les rideaux de palplanches jusque sous le niveau des fondations des puits, de façon à permettre le travail en terrain sec, ferme. La technique du système d'épuisement des sables aquifères, par batteries de puits filtrants en pompage continu, auquel on eut recours, fera l'objet sans doute d'une autre étude. On a dit plus haut que les caractéristiques hydrologiques du sol, déterminées par l'étude préliminaire, devaient fixer les modalités optima de fonctionnement du système : diamètre et espacement des puits, composition des chemises filtrantes, etc.

Le fonctionnement simultané de puits rapprochés les uns des autres ne permit que dans de rares cas d'analyser isolément les effets du pompage dans la zone d'influence immédiate d'un puits. Là où l'observation fut possible, l'allure de la surface de rabattement de la nappe aquifère autour d'un puits, ainsi que le rapport entre le débit et le rabattement du niveau d'eau dans le puits même semblent avoir été conformes à ce que faisaient prévoir les caractéristiques de vitesse de filtration et de perte de charge, telles qu'elles avaient été établies par l'expérimentation du laboratoire pour chaque terrain. Entre sables aquifères bruxellois et yprésiens l'opposition des comportements est très marquée; à une surface de nappe peu déprimée dans le bruxellois, même sous forts débits, correspondent, au sein de l'yprésien aquifère, des surfaces très creusées avec un rayon d'influence beaucoup plus réduit autour du puits.

Le système d'épuisement de l'eau souterraine dans les chantiers de travail fonctionna parfaitement; il réalisa son objet, sauf à laisser parfois la surface de la nappe aquifère un peu au-dessus du niveau de base des faux puits destinés à recevoir les fondations des puits. C'est là qu'on eut l'occasion d'observer le comportement très différent des sables aquifères bruxellois et des sables yprésiens dans les fouilles pénétrant sous le niveau de la nappe. L'yprésien aquifère s'était montré bouillant dans certains sondages; mais, dans la plupart des faux-puits au sein de l'yprésien asséché les parois se maintinrent suffisamment fermes pendant le creusement et les soutènements d'eau furent assez lents pour n'offrir aucun obstacle à la coulée des semelles de béton. Il n'en alla pas de même dans le bruxellois, où le caractère bouillant du sable, même asséché, fut cause de petites difficultés en l'un ou l'autre point.

Mais l'intérêt majeur des observations hydrologiques auxquelles donnèrent lieu les travaux de la Jonction nous paraît résider dans le rôle que jouèrent les rideaux de palplanches. Le relèvement du niveau hydrostatique qui se manifesta à l'Est du rideau, avant que ne soient entrepris les travaux d'épuisement et de creusement dans les chantiers, a mis en évidence qu'il existait un courant d'eau souterrain se conformant, par le sens d'écoulement, à l'allure de la surface du sol sur le versant droit de la vallée de la Senne; ce mouvement de l'eau sous le niveau de la nappe est un phénomène général, bien connu sans doute, mais qui semble parfois perdu de vue dans le traitement des problèmes hydrologiques. La réaction de la nappe souterraine devant l'écran métallique fut celle d'un cours d'eau devant un barrage.

D'autre part, comme prévu, il est apparu que les rideaux de palplanches n'isolaient pas complètement, au point de vue de l'hydrologie souterraine, les terrains aquifères de la zone des chantiers d'avec ceux situés à l'extérieur des rideaux. Dans ces conditions, les palplanches métalliques, qui avaient à contenir de façon aussi parfaite que possible les terrains enserrant le vaste creux créé pour l'établissement des puits, ne devaient servir, au point de vue hydrologique, qu'à faciliter grandement l'assèchement mécanique complet du terrain, gorgé d'eau, se trouvant à l'intérieur des deux rideaux de palplanches.

Le but à atteindre était, en effet, d'une part, de rendre possible la pose des fondations et des superstructures dans les meilleures conditions d'un sol asséché et stable, ne subissant aucune poussée latérale et, d'autre part, de laisser absolument inchangées les conditions d'équilibre du sol extérieur, afin d'éviter tout dommage aux constructions qu'il portait, notamment aux vieilles églises de la Chapelle et de Sainte-Gudule. Ce dernier but réclamait l'absence du plus léger déplacement latéral des terrains et de tout tassement; pour éviter le tassement, il fallait réaliser un desideratum auquel on attachait une grande importance: l'immuabilité du niveau de la nappe aquifère à l'extérieur des palplanches (côté Est).

L'étude des déplacements et tassements minimes qui se produisirent et furent enregistrés par des appareils de précision installés dans les monuments à protéger n'entre pas dans le cadre de cette note. Nous devons nous borner ici aux observations faites sur la nappe aquifère. Voici ce qui fut constaté:

Le rabattement de la surface de cette nappe, dans le chantier, sous l'action des puits filtrants en pompage, après s'être arrêté pendant quelque temps au rideau même, a, peu à peu, manifesté ses effets au delà du rideau, vers l'extérieur: le niveau hydrostatique s'y abaisse progressivement. Il fallut la fermeture des puits filtrants, au fur et à mesure des progrès des travaux de construction des puits et de leur superstructure, pour amener l'arrêt du mouvement, puis un léger relèvement, suivi d'une stabilisation définitive obtenue par un écoulement naturel des eaux de drainage vers les égouts du centre de la ville.

La part étant faite aux effets d'un manque d'étanchéité local des palplanches, il ne paraît pas douteux que le mouvement général observé doive être attribué à l'interdépendance des sous-horizons aquifères au sein de l'yprésien, et à celle des nappes bruxelloise et yprésienne elles-mêmes. Ces palplanches ne prennent pas appui sur un horizon imperméable, continu, de grande extension et une circulation d'eau souterraine se poursuit sous l'écran.

Le niveau définitif auquel s'est fixée la nappe à l'extérieur du rideau, vers l'Est, correspondrait à un état d'équilibre entre l'afflux d'eau souterraine venant du plateau (haut de la ville), l'obstacle constitué par l'écran de palplanches et le drainage permanent fonctionnant sous les puits.

Article reproduit avec l'autorisation de la revue « Science et Technique ».