

# CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT DU PUIT ET DE LA STATION DE POMPAGE DU TERMINAL METHANIER DE DUNKERQUE

## DESIGN AND CALCULATION OF THE PUMPING STATION AND THE TUNNEL SHAFT OF THE LNG TERMINAL IN DUNKIRK, FRANCE

Paul VIDIL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Solétanche Bachy, Rueil-Malmaison, France

**RÉSUMÉ** – Le présent article traite de l'évaluation des poussées au repos, des caractéristiques non drainées/drainées et du gonflement des argiles des Flandres, de l'interception d'ouvrages circulaires, de l'ovalisation liée à des poussées et butées dissymétriques, de grandes ouvertures du puits, de l'application du Séisme Majoré de Sécurité, et de la stabilité du fond de fouille dans les argiles sous 45 m de charges d'eau.

**ABSTRACT** –The hereby article deals with the assessment of the at-rest earth pressures, the un-drained and drained mechanical characteristics, the clay swelling, the circular walls interception, the ovalization due to asymmetrical active and passive earth pressures, the large openings in the shaft, the Safe Shutdown Earthquake application, and the bottom heave of the excavation in the clay layer under 45 m of water pressure.

### 1. Introduction

Le Port Autonome de Dunkerque s'est doté fin 2015 d'un terminal méthanier. Dans ce cadre, Dunkerque LNG (filiale d'EDF, de FLUXYS et de TOTAL) a lancé le projet « Sea Water Tunnel », et a choisi le groupement BESSAC (mandataire) - RAZEL - SOLETANCHE BACHY en solution variante pour la réalisation d'une station de pompage et un puits d'accès, ce dernier servant de puits de départ d'un tunnel de 5 km de long et de 3 m de diamètre intérieur, servant à terme à acheminer les eaux tièdes de la centrale nucléaire de Gravelines vers le terminal méthanier pour regazéifier le Gaz Naturel Liquide (GNL).

SOLETANCHE BACHY a ainsi construit, d'août 2012 à avril 2013 :

- les enceintes en paroi moulée du puits d'accès et de la station de pompage,
- les barrettes de fondation du radier de la station de pompage,
- les poutres de jonction à l'intersection des deux enceintes,
- et les radiers du puits d'accès et de la station de pompage.

Les équipements intérieurs des ouvrages et le reste du complexe industriel de cette zone du terminal méthanier ont quant à eux été réalisés par TS LNG, groupement italo-hispanique composé de TECH-INT et de SENER.

#### 1.1. Présentation des ouvrages

Les enceintes du puits d'accès et de la station de pompage sont des parois moulées circulaires accolées, de profondeurs et de diamètres différents. A l'intersection de ces soutènements, des poutres de jonction en béton armé permettent de reprendre la résultante des deux composantes orthoradiales de poussée annulaire, sur la hauteur terrassée de la station de pompage.

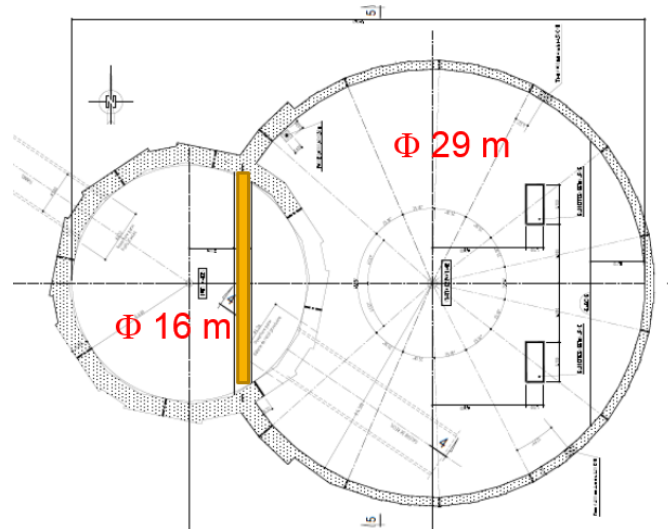


Figure 1. Vue en plan de la station de pompage et du puits

Le diamètre intérieur du puits est de 16 m, tandis que celui de la station de pompage est de 29 m (Figure 1). L'épaisseur de la paroi moulée du puits est égale à 1.20 m, et la base de la paroi moulée est à la cote de -55 CMG (Cotes Marines de Gravelines), profondément dans les argiles des Flandres (Figure 2) ; soit une hauteur de paroi moulée de 65 m avec des joints waterstop entre panneaux descendus sous le fond de fouille à 55 m de profondeur. Le radier du puits est un radier souple non butant composé d'un complexe géotextile et de gabions sur une couche drainante.

L'épaisseur de la paroi moulée de la station de pompage est égale à 0.60 m, et la base de la paroi moulée est à -24 CMG, juste en tête de l'argile des Flandres, afin de limiter les débits d'exhaure en phase travaux. Le radier de la station de pompage est un radier résistant prenant appui sur la paroi moulée et sur deux barrettes.

Les parois moulées et les ouvrages de Génie Civil font l'objet d'une protection cathodique par anodes sacrificielles.

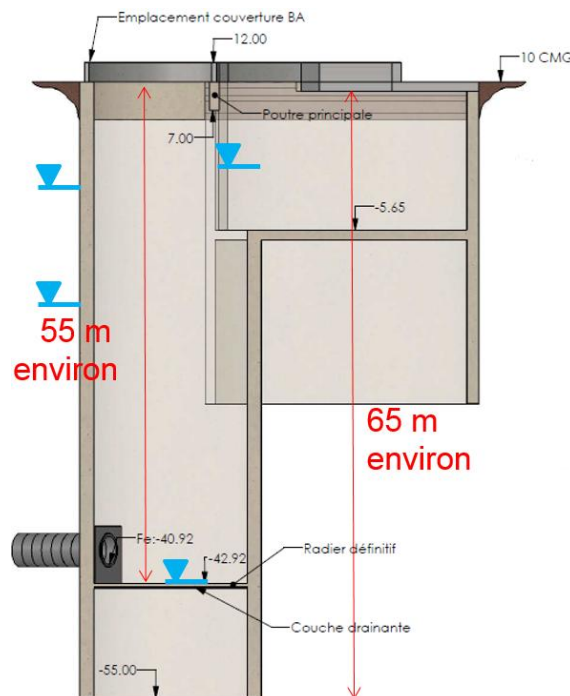


Figure 2. Coupe de la station de pompage et du puits

## 1.2. Phasage des travaux

Les principales phases de construction du puits et de la station de pompage sont les suivantes :

- depuis la plate-forme à +10 CMG, réalisation des parois moulées du puits d'accès et de la station de pompage, deux panneaux étant coulés en arase basse à l'intersection de ces enceintes pour limiter la démolition ultérieure,
- réalisation des poutres de couronnement en tête de parois moulées, et de la poutre supérieure de jonction, terrassement au fond de fouille de la station de pompage, avec rabattement par puits profonds, et réalisation de deux autres poutres de jonction,
- réalisation du radier de la station de pompage (Figure 3),
- terrassement au fond de fouille du puits,
- réalisation des drains verticaux, du complexe drainant et pose des gabions,
- réalisation du radier provisoire de recharge pour mise à niveau pour le tunnelier,
- réalisation de la galerie arrière, et départ du tunnelier du puits.

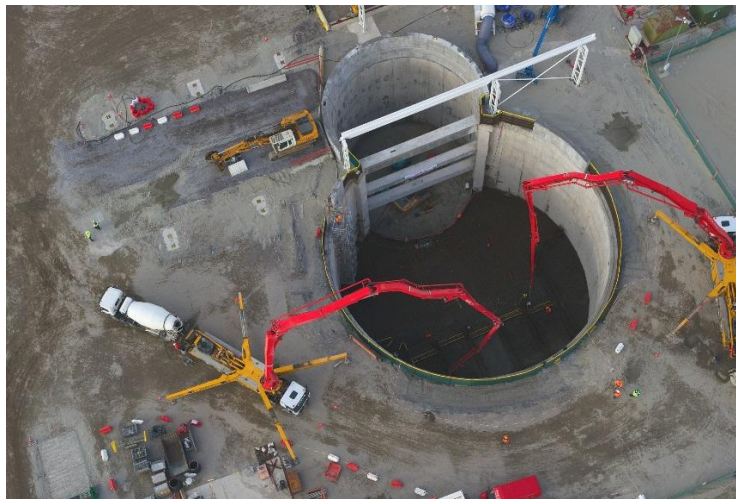


Figure 3. Bétonnage du radier de la station de pompage

## 2. Hypothèses géotechniques

### 2.1. Hydrogéologie

Une partie de l'emprise du projet du terminal est gagnée sur la mer ; du remblai hydraulique a donc été mis en place au droit des futurs ouvrages sur environ 6 m de haut. La stratigraphie est ensuite la suivante, représentative des terrains de bord de mer dans le nord de la France :

- sables du Quaternaire sur 28 m de haut ; ce sont des sables compacts avec quelques rares intercalations de sables limoneux de moindres caractéristiques,
- argiles des Flandres sur 80 à 90 m d'épaisseur ; il s'agit d'argiles surconsolidées et gonflantes ; le tracé du tunnel se fait intégralement dans cette couche.

Le niveau de la nappe à l'extérieur varie de - 0.7 CMG (nappe la plus basse) à 9.3 CMG (en phase d'exploitation). Le niveau le plus bas est particulièrement à étudier dans le cas où le puits est rempli d'eau (ce qui est son fonctionnement permanent) ; le puits n'est en effet vide qu'en cas exceptionnel.

Au niveau des caractéristiques mécaniques des terrains fournies dès l'Appel d'Offres, il est à noter pour les argiles des Flandres :

- Les paramètres de cisaillement sont  $c' = 0$  et  $\varphi' = 23^\circ$ , et  $c_u = 50 - 5(z+20)$  en kPa (avec  $z$  l'altitude en CMG) et  $\varphi_u = 0$  ; soit  $c_u = 65$  kPa en tête de couche, et 225 kPa en pied de puits. Un gradient de cohésion non drainée dès le début de la couche est certes inhabituel dans des terrains surconsolidés où il est courant de constater d'abord une cohésion constante sur une certaine hauteur puis un gradient de cohésion ; dans le cas présent, cela provient sans doute de la grande profondeur à laquelle sont rencontrées les argiles des Flandres. Les calculs sont menés en faisant l'enveloppe des comportements drainé et non drainé.
- Le coefficient de poussée au repos  $K_0$  vaut 1 ; cette valeur élevée est une conséquence de la surconsolidation de cette couche. Concernant l'effet du gonflement des argiles sur la paroi moulée, nous considérons que le gonflement est susceptible de ramener la poussée à un état au repos (poussée horizontale  $K_0$ ), sur le long terme, d'où le calcul que nous menons en phase service avec  $K_a = K_0 = 1$  dans les argiles.
- Le module d'Young à court terme est de 46 MPa, et à long terme de 15 MPa. Cette différence traduit ainsi la diminution bien connue du module des terrains argileux en passant d'un comportement non drainé à un comportement drainé.

## 2.2. Campagne de sol complémentaire

A la demande du groupement, FUGRO a mené une campagne de sol complémentaire composée d'essais pénétrométriques statiques dans les sables, d'essais de dissipation dans les sables, d'essais œdométriques haute-pression, et d'essais de gonflement selon la méthode Huder-Amberg (Huder et Amberg, 1970).

L'essai œdométrique haute-pression permet de :

- vérifier dans quel domaine les échantillons sont sollicités au cours des essais,
- approcher l'OCR (Over Consolidated Ratio) et la qualité du prélèvement,
- solliciter l'échantillon dans le domaine normalement consolidé (c'est-à-dire au-delà de la contrainte effective de préconsolidation  $\sigma'_p$ ), à la différence de l'essai Huder-Amberg pendant lequel l'échantillon reste dans le domaine surconsolidé (c'est-à-dire en dessous de  $\sigma'_p$ ).

Les essais Huder-Amberg permettent de différencier le gonflement mécanique (de relaxation, sans apport d'eau) et le gonflement hydrique (resaturation d'une partie des argiles des Flandres), et cela afin d'estimer les soulèvements à terme du fond de fouille. Les argiles sont en effet saturées in-situ mais le terrassement à l'intérieur du puits sur plus de 50 m occasionne une légère désaturation d'une partie des argiles ; il suffit de quelques pourcents de désaturation pour permettre le gonflement hydrique.

FUGRO estime un gonflement à long terme des terrains en fond de fouille à l'axe du puits de l'ordre de 45 cm, résultat de la différence entre

- le gonflement hydrique différé total par apport d'eau, estimé à environ 65 cm.
- le gonflement mécanique sans apport d'eau, évalué à environ 20 cm ; ce gonflement se faisant en pratique au fur et à mesure d'excavation, il n'est pas à considérer après la phase d'excavation en fond de fouille final.

L'essai Huder-Amberg tient ainsi compte en quelques sortes du phasage.

Cette valeur de 45 cm se situe au centre de l'excavation. Sur les bords, la paroi moulée freine le gonflement, à hauteur du frottement latéral. En partant de la pression de gonflement résiduel (120 kPa d'après les essais œdométriques), la contrainte équivalente de frottement le long de la fiche de paroi moulée équilibre dans le cas présent à peu près la pression de gonflement.

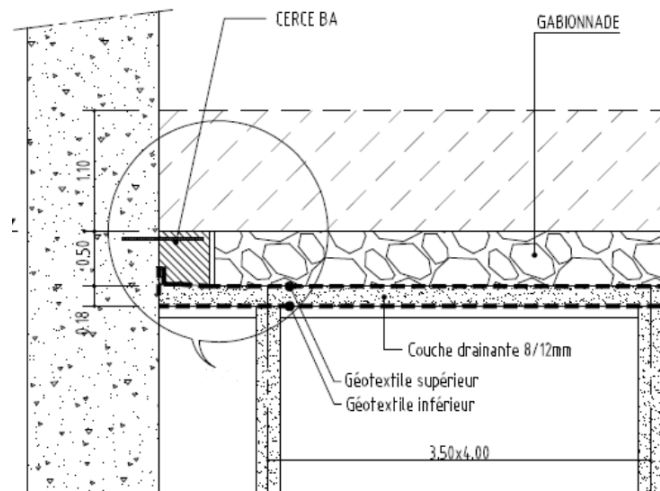


Figure 4. Détail du radier souple du puits d'accès

Ces soulèvements totaux et différentiels sont de grande amplitude, et varient avec le temps ; ils ne constituent cependant qu'une estimation du comportement des argiles sous le fond de fouille. Cela nous a conduit à proposer un radier souple pouvant non seulement encaisser des différences importantes de soulèvement dans le temps, et entre le centre et sa périphérie, mais aussi pallier l'incertitude liée à l'interprétation de ce phénomène complexe qu'est le gonflement. Nous avons ainsi suivi l'adage qui est que la meilleure façon de gérer le gonflement est de le laisser s'opérer.

C'est pourquoi une gabionnade sur un complexe drainant entre deux géotextiles (Figure 4) est apparue plus appropriée que le radier en béton armé initialement prévu.

### 3. Principaux résultats

#### 3.1. Stabilité des fonds de fouille

Le radier de la station de pompage étant résistant, la vérification de la stabilité verticale a été menée classiquement en modélisant le radier sous ROBOT 2D.

En revanche, pour le puits d'accès, nous avons fait face à la problématique usuelle de stabilité verticale dans les terrains argileux, ce qui nous a conduit à faire des calculs de renard solide en contrainte totale ( $c_u$ ,  $\varphi_u = 0$ , sans écoulements), et en contrainte effective ( $c'$ ,  $\varphi'$ , avec prise en compte des écoulements).

Le calcul du renard solide en phase service a imposé la présence de drains verticaux sous le fond de fouille du puits, sur la hauteur de fiche de paroi moulée, au cas où le puits serait vidé pendant un long moment ; ce calcul, mené dans un premier temps selon la méthode de Cazenove (de Cazenove et Cardinal, 1971), a été confirmé dans un deuxième temps par un calcul PLAXIS 2D.

La présence de drains sous le radier peut certes favoriser le gonflement des argiles, mais les drains ne sont pas des points d'alimentation en eau, mais des exutoires.

#### 3.2. Ouvertures dans la paroi moulée

De larges ouvertures ont dû être faites dans la paroi circulaire du puits d'accès, pour le tunnel et la galerie de recul. Si de petites ouvertures sont parfois négligées dans le calcul des puits de grands diamètres, il en est tout autre dans le cas présent pour des ouvertures de près de 4 m dans un puits de 16 m de diamètre.

De telles ouvertures engendrent une augmentation de la contrainte de compression orthoradiale au-dessus et en dessous de l'ouverture, des contraintes de traction de part et d'autre de l'ouverture, et des moments verticaux liés à la perte de rigidité cylindrique au voisinage de l'ouverture, décroissants au fur et à mesure que l'on s'en éloigne (Figure 5).

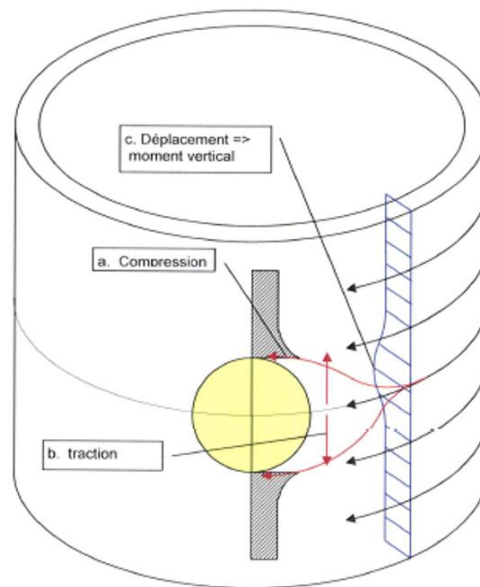


Figure 5. Conséquences d'une ouverture dans un puits circulaire

Le ferrailage des cages adjacentes aux ouvertures a ainsi été renforcé. De plus, les cages au droit de ces ouvertures sont équipées pour partie de barres en fibre de verre pour faciliter la découpe.

### 3.3. Gestion de la dissymétrie géométrique

En raison de la disposition du type anneau circulaire, les parois moulées du puits et de la station sont auto-stables en phase provisoire, et subissent essentiellement des efforts de compression. L'effet d'anneau dans la paroi circulaire, considérée comme un tube mince, est caractérisé par une raideur cylindrique, déterminée à partir du module d'élasticité du béton, de l'épaisseur théorique de la paroi, et du rayon moyen de l'anneau, par la formule de Timoshenko (Timoshenko, 1968).

Le calcul de stabilité horizontale des parois moulées a été mené avec le programme interne de SOLETANCHE BACHY aux coefficients de réaction, PARIS. Le terrassement à l'intérieur du puits d'accès a notamment été modélisé en plusieurs phases de calcul, afin de s'assurer qu'aucune sollicitation n'était omise par rapport à un calcul avec une seule phase pour le terrassement total. Nous avons également modélisé les efforts de poussée du tunnelier.

Cependant est apparue la nécessité de recourir à un modèle 3D aux Eléments Finis de type ROBOT en statique (Figure 6) pour apprécier les effets des coupures et des rencontres d'arcs en paroi moulée, afin d'apprécier les tendances et les ordres de grandeurs des déplacements et efforts. Cette modélisation spécifique a été en effet indispensable pour l'évaluation des efforts engendrés par l'ouverture entre le puits d'accès et la station de pompage (i.e. poutres en lieu et place d'un appui continu sur la hauteur de la station de pompage), et l'effort de compression appliqué par la fiche de la paroi moulée de la station de pompage sur le puits d'accès.

Dans cette modélisation ont été appliquées les poussées de compression annulaires provenant du calcul aux coefficients de réaction.

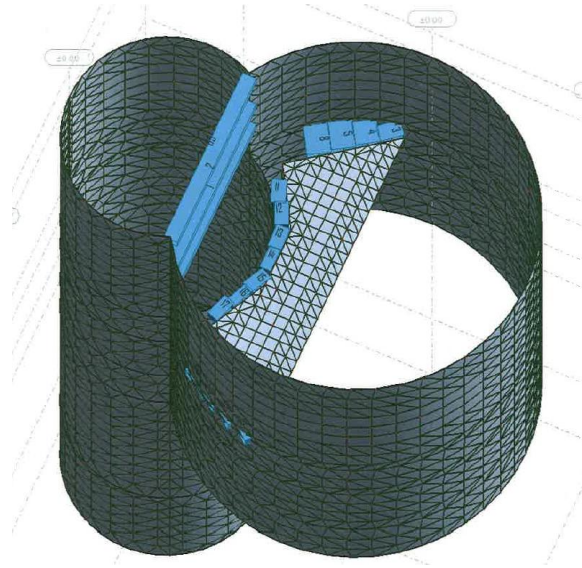


Figure 6. Vue en perspective de la modélisation ROBOT 3D

Il est à noter en figure 7 le pincement exercé par la paroi de la station de pompage sur la paroi du puits, et l'ovalisation induite du puits.

Ces calculs complémentaires nous ont permis d'adapter le ferrailage des parois moulées en ajoutant des aciers horizontaux et verticaux dans les zones les plus sollicitées en flexion. Dans les zones non ferrillées (entre les cages d'armatures), nous avons vérifié que les contraintes de traction dans le béton restaient inférieures à la résistance de calcul du béton en traction (de l'ordre de 1.6 MPa).

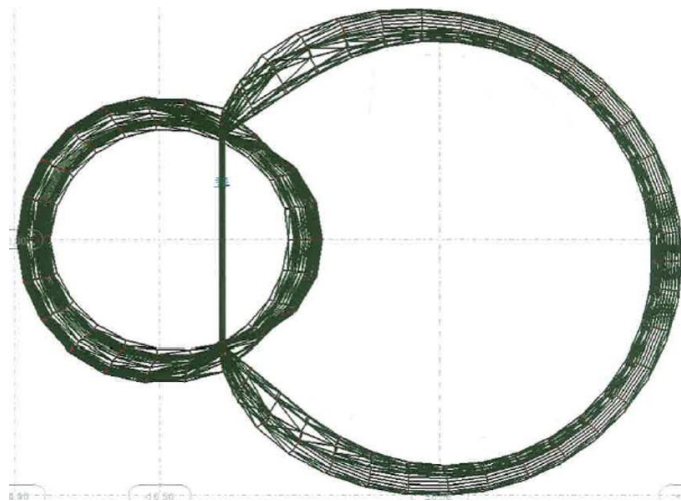


Figure 7. Vue en plan des déformées amplifiées des parois

Nous avons profité de cette modélisation pour estimer l'impact des sollicitations sismiques, qui sont également dissymétriques, en ajoutant un incrément dynamique au modèle statique précédent. Dunkerque est certes classé comme une zone de sismicité faible, mais dans le cadre de cette installation à risque spécial, le risque a été rehaussé par Dunkerque LNG : le puits et la station de pompage ont donc été dimensionnés au séisme, avec prise en compte du risque de liquéfaction. Dans le cadre de l'EC8 et des risques spéciaux des terminaux méthaniers, deux types de séisme ont ainsi été étudiés :

- Operating Basis Earthquake (OBE),
- Séisme Majoré de Sécurité (SMS ou SSE) avec une accélération égale à 0.3 g.

Les zones potentiellement liquéfiables ont été jugées peu nombreuses et de faibles hauteurs (décimétriques) ; nous n'en n'avons finalement pas tenu compte dans les calculs de sollicitations.

### **3.4. Chiffres clés**

La poussée radiale sur la paroi moulée du puits est de l'ordre de 1 MPa au niveau du fond de fouille, entraînant une contrainte horizontale de compression dans l'anneau à l'ELS de 9.6 MPa (sans déviation), et 16.7 MPa (avec déviation). L'outillage utilisé de benne hydraulique KS (brevet SOLETANCHE BACHY) de paroi moulée et ses contrôles permettent de limiter la déviation possible de l'outil de forage à 0.4 % ; ce contrôle de la verticalité, associé à l'utilisation d'un béton C40/50 et à l'application de l'Eurocode 2 avec des mesures de contrôle renforcé de continuité et de qualité des parois moulées, permettent de justifier l'épaisseur de la paroi du puits à 1.20 m, en partant de la notion conservatrice d'anneau inscrit.

Le suivi des déviations a été mené lors de la réalisation de la paroi moulée et a conduit à des déviations de l'ordre de  $0.3\% < 0.4\%$  théorique. Un suivi des inclinomètres et des cibles topographiques a été mené jusqu'à la phase en terrassement au fond de fouille du puits ; des déformées maximales de 5 mm environ ont été mesurées, en cohérence avec les déformées estimées par le calcul.

La base de la fiche de paroi moulée du puits d'accès a été justifiée en béton non armé, conformément à l'Eurocode 2 : les 10 derniers mètres de la fiche sont donc sans armatures, tout en reprenant de faibles efforts de flexion et des efforts tranchants.

Les poutres/butons de jonction reprennent au maximum 14 MN de compression à l'ELS pour le buton inférieur.

Les barrettes sous le radier de la station de pompage subissent des efforts de compression et surtout de traction, jusqu'à 9 MN à l'ELS.

Le cas d'un puits rempli et d'une nappe basse a enfin été étudié. La poutre de couronnement est alors sollicitée en traction : la réaction annulaire dans la paroi moulée devient nulle de +8.85 à environ -12 CMG. La paroi moulée entre +8.85 et -12 CMG se déplace côté terre au maximum de 2 mm ; cela correspond, au niveau des 8 joints waterstop de paroi moulée, à un allongement de  $2.1 / 8 = 0.3$  mm environ. Cela demeure admissible pour ces joints qui peuvent accepter des élongations à la rupture jusqu'à 300%.

## **4. Conclusion sur les originalités méthodologiques**

La réalisation du puits d'accès du terminal méthanier de Dunkerque a notamment permis de mettre en œuvre des innovations technologiques, comme des joints waterstop entre panneaux descendus à 55 m de profondeur ou un radier souple définitif en gabionnade.

## **5. Références bibliographiques**

- Huder J., Amberg G. (1970). Quellung in mergel, opalinuston und anhydrite, *Schweizerische Bauzeitung*, 43, pp. 975-980.
- De Cazenove E., Cardinal J. (1971). Ouvrages profonds à radiers perméables - stations de pompes automatiques – écrans d'étanchéité – reconnaissances et calculs de débits, *Travaux*, 439, pp. 28-37.
- Timoshenko S.P. (1968). *Résistance des matériaux*, Dunod, Paris.