



1
© SUEZ

BARKA - USINE DE DESSALEMENT D'EAU DE MER AU SULTANAT D'OMAN

AUTEURS : PIERRE GUERIN, INGÉNIEUR, GEOS INGÉNIEURS CONSEILS - GEOFFREY GOSSE, CHEF DE SERVICE GÉNIE CIVIL, INGEROP - PASCAL TROLES, CHEF DE SERVICE GÉNIE CIVIL, SUEZ

LA PHASE 4 DE L'EXTENSION DE L'USINE DE DESSALEMENT D'EAU DE MER DE BARKA, SUR LA CÔTE DE LA BATINAH AU NORD D'OMAN, AVEC UNE CAPACITÉ DE 281 000 m³ PAR JOUR, EST LA PLUS GRANDE USINE DE DESSALEMENT PAR OSMOSE INVERSÉ DU SULTANAT D'OMAN. SA MISE EN SERVICE EST PRÉVUE EN AVRIL 2018 APRÈS DEUX ANS D'ÉTUDES ET DE TRAVAUX. SITUÉE EN BORDURE DE MER, UNE DES PRINCIPALES DIFFICULTÉS TECHNIQUES RÉSIDE DANS LA RÉALISATION DES NOMBREUX OUVRAGES ENTERRÉS EN RAISON DE LA PRÉSENCE DE LA NAPPE À TRÈS FAIBLE PROFONDEUR DANS DES TERRAINS À DOMINANTE SABLEUSE.

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Au cours des 20 dernières années, le gouvernement du sultanat d'Oman s'est engagé dans un programme réussi pour la restructuration et le développement de la participation du secteur privé dans le secteur de l'électricité et des eaux.

OPWP (Oman Power and Water Procurement) a choisi le consortium Barka Desalination Company formé par Suez et ses partenaires pour le financement, la construction et l'exploitation d'une nouvelle usine de dessalement d'eau de mer à Barka (figure 1). Ce partenariat public-privé BOO (Build

1- Vue aérienne du chantier.

1- Global view of the site.

Own Operate) prévoit la construction et l'exploitation de cette installation d'une capacité de 281 000 m³ par jour, la plus grande usine de dessalement par osmose inverse du sultanat d'Oman. Suez est chargé de la construction de l'usine (figure 2) et de son exploitation pour une durée de 20 ans.

CONTEXTE GÉOTECHNIQUE

Le site de Barka est situé à quelques dizaines de mètres de la mer, à l'est de la péninsule arabique sur la côte où les formations rencontrées peuvent être classées en cinq unités géologiques constituées de matériaux alluvionnaires plus ou moins cimentés (figures 3 et 4) :

- Des sables (sables de plage) : il s'agit d'un horizon de sables fins légèrement limoneux avec de nombreux débris de coquillages ;
- Des dépôts éoliens : il s'agit de matériaux sableux fins à très fins recouvrant les dépôts alluvionnaires récents ;
- Des dépôts alluvionnaires récents : il s'agit de matériaux alluvionnaires marins, principalement des sables et des limons ;
- Des dépôts alluvionnaires : il s'agit de limons sableux et de gravas localement cimentés ;
- Des dépôts alluvionnaires anciens : il s'agit de limons sablo-graveleux bien cimentés ou de roches sédimentaires altérées.

Le site est proche des monts Hajar qui se sont formés par obduction lors de la



2
© SUEZ

collision entre la plaque Européenne et la plaque Arabique. Ces phases tectoniques sont à l'origine de l'apparition de plusieurs zones de failles associées à une activité sismique du secteur qui est ainsi classé en zone A2 selon l'International Building Code, avec une accélération de référence de 0,15 g et un séisme de référence de magnitude 6,1.

RECONNAISSANCES GÉOTECHNIQUES

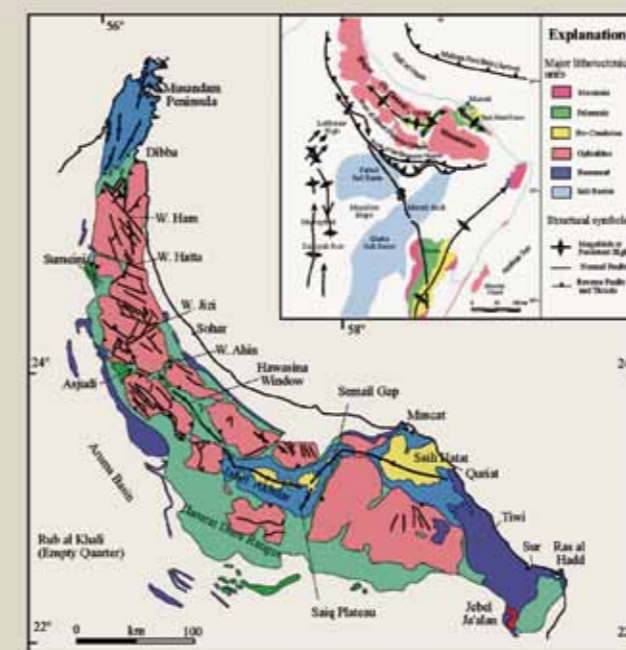
En phase d'offre, seules les reconnaissances géotechniques du site voisin où était déjà construite la phase 3 de l'usine de Barka, étaient disponibles pour permettre à Geos de réaliser les études de pré-dimensionnement géotechniques des ouvrages.

Ces données, si elles ont permis de fiabiliser les options de conception n'étaient pas suffisantes pour mener à bien dans de bonnes conditions d'optimisation les études d'exécution. Ainsi, un programme de reconnaissances géologiques et géotechniques complémentaires a été établi par Geos préalablement au démarrage des études d'exécution.

- En novembre et décembre 2015, dans un délai très court, les reconnaissances (figure 5) suivantes ont été réalisées :
- 18 sondages carottés à 20 ou 30 m de profondeur avec essais SPT tous les 2 m et prélèvements d'échantillons intacts ;
- 3 essais cross-hole pour déterminer la classe de sol sous séisme pour le site ;
- 78 sondages au pénétromètre statique ;
- 18 puits à la pelle mécanique ;
- Des essais d'identification et de mécanique des sols sur les matériaux prélevés.

Le programme a été établi pour permettre une optimisation des ouvrages géotechniques notamment par l'emploi d'un pénétromètre statique qui permet de réaliser un dimensionnement plus fiable que les essais SPT utilisés habituellement dans cette région. Des essais SPT (figure 6) ont tout de même été réalisés afin de confirmer les résultats des horizons superficiels et de qualifier les horizons profonds qui n'ont pas pu être atteints avec le pénétromètre statique. GEOS a exploité ces sondages pour établir les notes d'hypothèses géotechniques générales (pour l'ensemble du site), particulières (un modèle adapté à chaque ouvrage a été réalisé afin d'optimiser le dimensionnement) et les notes de calculs pour l'ensemble des ouvrages géotechniques du projet : ▷

CARTE GÉOLOGIQUE DU NORD D'OMAN

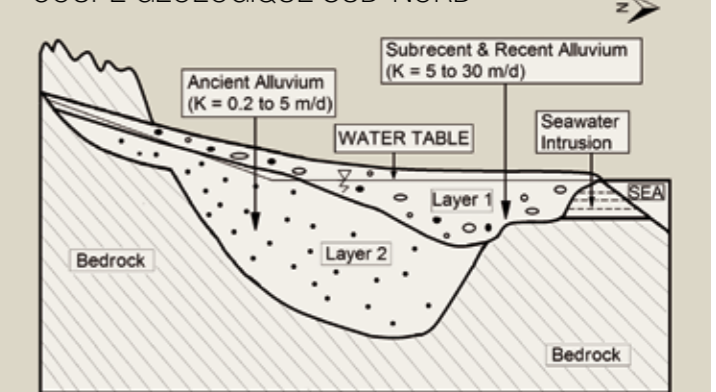


3
© THE GEOLOGICAL SOCIETY OF LONDON

- 2- Ferrailage d'un radier.
- 3- Carte géologique du Nord d'Oman.
- 4- Coupe géologique Sud-Nord.

- 2- Raft reinforcement.
- 3- Geological map of Oman North.
- 4- Geological cross section South-North.

COUPE GÉOLOGIQUE SUD-NORD



4
© JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING



5 © SUEZ

fondations superficielles, fondations profondes et soutènements pour les fouilles et ouvrages enterrés.

Une optimisation des fondations a pu être réalisée grâce à ces éléments par rapport à la conception prévue au stade de l'appel d'offre avec notamment la suppression des renforcements de sols par inclusions rigides ou colonnes ballastées sur plusieurs ouvrages.

Les solutions d'amélioration des sols destinées à réduire les risques de tassement et de tassements différentiels se sont alors limitées à la réalisation d'une purge des matériaux les plus compressibles en surface et leur substitution sur 2 m d'épaisseur sous deux ouvrages.

Les reconnaissances géologiques et géotechniques ont ainsi permis de définir la stratigraphie du site : les premiers mètres sont constitués de dépôts sableux et à limono-sableux de compacité faible puis augmentant avec la profondeur sur 8 m d'épaisseur.

Un niveau très compact intermédiaire, lié à une phase de cimentation des matériaux, est présent sur la majorité des sondages vers 3 à 4 m de profondeur.

À la base des dépôts les plus récents, les terrains rencontrés sont sablo-graveleux puis sablo-limoneux avec des bancs indurés. Il s'agit donc de terrains dont la perméabilité peut être, selon leur granulométrie, de moyenne à élevée.

Le substratum rocheux est constitué de conglomérats et de grès à partir de 20 m de profondeur environ. Tous les essais réalisés dans le substratum ont été plafonnés à 50 coups au SPT.

Les formations recoupées par les travaux de terrassement ont fait l'objet d'essais d'identification afin d'optimiser le mouvement des terres sur le site en définissant dès les phases d'études géotechniques d'exécution les modalités de réemploi des matériaux du site. Tous les matériaux, à l'exception d'une couche superficielle de 20 cm d'épaisseur moyenne, ont pu être réemployés pour les travaux de terrassement, soit en remblai général, soit en couche de forme pour les matériaux bien gradués et très peu plastiques (indice de plasticité inférieur à 10).

La zone du projet, située à proximité immédiate de la mer est caractérisée par la présence d'eau à faible profondeur, de 2 à 3 m sous le niveau de la plateforme du site et par une perméabi-

5- Forage en cours.
6- Sondage carotté BH17.

5- Ongino drilling
6- Corehole BH17.

lité relativement forte sur les 7 à 8 premiers mètres (de l'ordre de $5 \cdot 10^{-4}$ m/s). La perméabilité diminue avec la profondeur et la présence de couches contenant une matrice fine et un niveau de cimentation important.

Les essais cross-hole réalisés entre forages voisins sur une profondeur de 30 m ont permis de caracté-

ser la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur les 30 premiers mètres.

Une valeur de 500 m/s environ a été mesurée pour les trois zones testées. La classe de sol de type C a ainsi été intégrée dans l'ensemble des calculs sismiques.

OUVRAGES RÉALISÉS TERRASSEMENTS

Au démarrage des travaux, des remblais ont été mis en œuvre sur 75% de la surface du site afin d'atteindre le niveau de plateforme du projet.

Ces remblais ont atteint une hauteur maximale de 1,5 m.

Des terrassements en déblai ont été nécessaires sur plusieurs ouvrages avec la méthodologie suivante :



6 © GEOSOL

→ En l'absence d'ouvrage à proximité, un talutage a été privilégié ;

→ Dans les autres configurations, les terrassements ont été réalisés à l'abri d'écran de soutènement en palplanches ou pieux sécants selon les ouvrages avec des dispositifs de pompage pour le rabattement de la nappe.

Les terrassements en déblai ont représenté des volumes conséquents de matériaux qui ont pu être en partie réutilisés sur site conformément aux résultats des études sur le réemploi des matériaux.

BÂTIMENTS

Trois principaux types d'ouvrages composent le projet :

- 1- Ouvrages enterrés : il s'agit d'ouvrage sur radier de grandes dimensions enterrés à une profondeur variant de 2 à 12 m sous le niveau plateforme projet, soit jusqu'à 8 m sous le niveau de la mer (figure 7) ;
- 2- Ouvrages superficiels fondés sur un radier de grandes dimensions ;
- 3- Ouvrages superficiels fondés sur semelles filantes ou isolées.

7- Ferrailage de la station de pompage.
8- Soutènement et pompage.

7- Pumping station reinforcement.
8- Retaining wall and dewatering.



7 © SUEZ

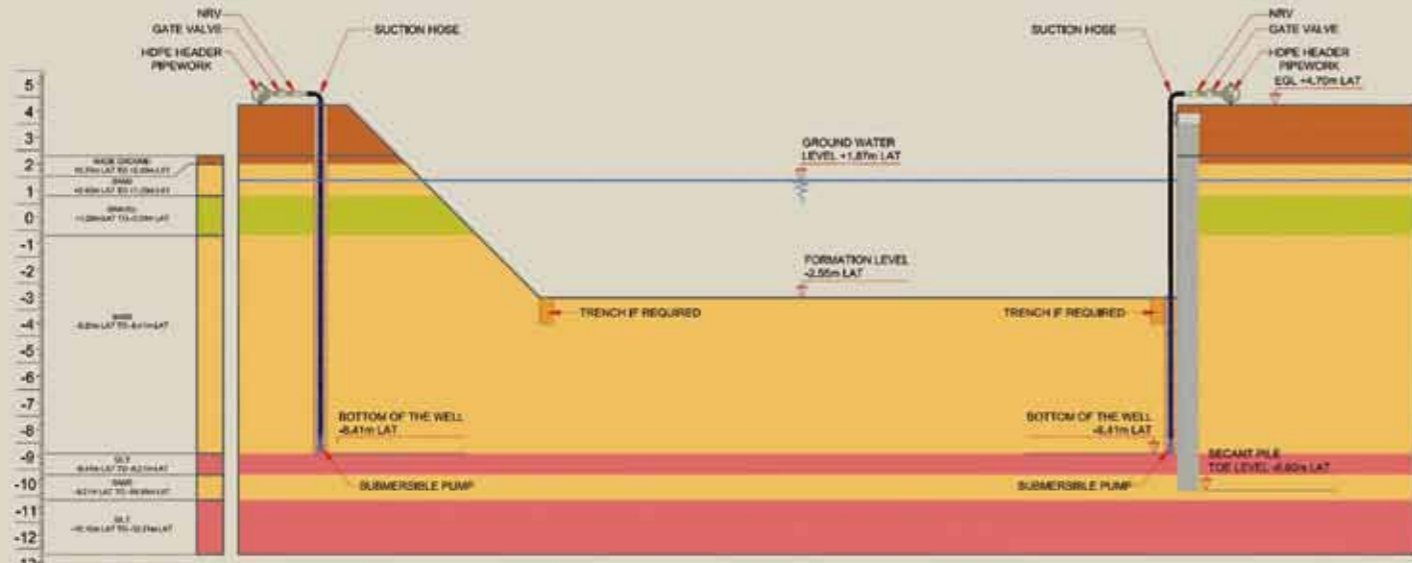


8 © SUEZ

Les études d'exécution géotechnique menées par Geos ont permis de limiter le recours aux fondations profondes pour un seul ouvrage très fortement chargé. Cet ouvrage (Limestone filter) est fondé sur un radier de 40 m par 20 m supportant une charge qui varie de 50 à 200 kPa. Les tassements attendus sous cet ouvrage étaient trop importants, ce qui a conduit à la mise en place de 34 pieux de diamètre 900 mm et de 16 m de longueur. Pour les autres ouvrages, soit les sols en place étaient suffisamment compacts pour limiter les tassements à des valeurs compatibles avec les structures des installations industrielles, soit il a été réalisé une substitution des deux premiers mètres pour s'affranchir de la couche d'alluvions récentes à dominantes argileuses rencontrée localement. Ces substitutions ont permis de limiter les tassements sous les ouvrages à 20 mm. À titre d'exemple, le bâtiment « Reverse Osmosis » qui est constitué d'un radier très long de 30 m x 200 m, constitué de plusieurs modules séparés par des joints de dilatation, a nécessité la réalisation d'une substitution sur 2 m d'épaisseur sur la totalité de la surface soit un volume de terrassement conséquent de 12000 m³. Le remblai d'apport en matériaux sélectionnés a été mis en œuvre par couche de 25 cm d'épaisseur pour assurer un niveau de compactage compatible avec les exigences de compacité recherchées. Des murs de soutènement en pieux sécants ont été réalisés sur plusieurs ouvrages afin d'assurer la stabilité des fouilles des ouvrages enterrés en minimisant à la fois les volumes de terrassement et les impacts sur le planning.

En effet, les contraintes de planning ont rendu impérative la construction des deux ouvrages enterrés à 6 m sous le niveau du radier de l'ouvrage DMGF (Dual Media Gravity Filter) parallèlement à la construction de ce dernier. En effet, cet ouvrage, dont la superficie est de 5000 m² environ, se trouvait sur le chemin critique de la construction en termes de planning, il n'était donc pas possible de retarder sa construction. Un système de pompage en périphérie des fouilles a été mis en œuvre pour assurer la réalisation des travaux hors d'eau (figure 8). Un système de 8 pompes immergées a été mis en place dans des forages à 3 m sous le niveau du fond de fouille pour rabattre la nappe. Le débit total pour cette fouille était de 50 à 100 m³/h ce qui a été suffisant pour maintenir la fouille au sec pendant la durée des travaux.

PRINCIPE DE RABATTEMENT DE LA NAPPE



9

© SUEZ

La coupe en figure 9 montre plus précisément le système installé pour cet ouvrage. L'expérience des entreprises locales sur ce type d'opération a permis de mettre en place un système relativement simple. Aucun bouchon injecté n'a été nécessaire alors que les premières reconnaissances géologiques et géotechniques pouvaient laisser penser que ces matériaux à dominante sableuse avaient des perméabilités non compatibles avec ces techniques de contrôle du niveau phréatique. L'efficacité de ce système a bénéficié de la présence d'un certain niveau de cimentation des couches et/ou d'horizons plus argileux, qui ont limité vraisemblablement la perméabilité verticale et donc l'apport d'eau dans les fouilles. Les ouvrages profonds tels que la station de pompage ou le puits de décharge ont nécessité également la réalisation d'un système de soutènement étanche car ces ouvrages ont un niveau bas au-delà de 10 m de profondeur. Il a été retenu la réalisation d'ouvrage de soutènement circulaire en pieux sécants afin de limiter le recours à des systèmes de butonnage qui auraient fortement ralenti et rendu complexe la réalisation des travaux de génie civil. Ces soutènements autostables se sont révélés plus économiques grâce à l'amélioration des rendements pour les travaux de génie civil mais également rapport à une enceinte rectangulaire

strictement circonscrite à l'ouvrage. À titre d'exemple pour la station de pompage, une enceinte rectangulaire aurait nécessité la mise en œuvre d'un écran de 95 m de longueur totale avec au minimum deux niveaux de butons et l'impossibilité de considérer l'écran en pieux sécants comme un élément définitif de l'ouvrage compte tenu des contraintes d'étanchéité fortes. Le soutènement mis en place était circulaire avec un diamètre de 39 m soit un linéaire 122 m mais sans aucun niveau de butons. Les ouvrages, de type industriel, comportent les éléments suivants :
→ Génie civil (figure 10) ;

9- Principe de rabattement de la nappe.
10- Réalisation de planchers.

9- Dewatering principle
10- Scaffolding works.

→ Charpente métallique et serrurerie : EXE avec production des plans de fabrication issus de maquettes 3D sous Tekla ;

→ VRD : études d'exécution avec coordination des réseaux utilisés avec les réseaux process ;
→ HVAC et électricité et second-œuvre.

Les ouvrages de génie civil du projet sont en majorité des ouvrages étanches qui ont donc été systématiquement testés en eau avant réception (figure 11). Cette phase de test a également permis d'acquiescer les tassements sous les ouvrages et de vérifier que les prévisions de tassement faites en phase d'études d'exécution ont été respectées : le suivi sur site a montré l'absence de tassement au-delà des valeurs calculées.



10

© SUEZ

VOIRIES

Pour circuler sur le site, des voiries ont été réalisées. Elles ont été dimensionnées pour un trafic de poids lourds avec une fréquence de 10 véhicules par jour et par sens de circulation. Les conditions météorologiques particulières du site (température moyenne de plus de 30°C) ont été prises en compte dans les calculs. Ces conditions sont pénalisantes en termes de module de déformation des couches bitumineuses par rapport aux conditions habituellement rencontrées en France ce qui conduit à des surépaisseurs de couche pour respecter les critères de réception. Toutes les eaux sont collectées au niveau des voiries pour être ensuite acheminées vers des bassins d'infiltration.

RÉSEAUX

La prise d'eau en mer se fait à environ 2 km de la côte à une profondeur minimale de 10 m par rapport au niveau de la mer par un système de deux tuyaux lestés de 2 m de diamètre (figure 12). Leur mise en place a nécessité la réalisation d'écrans en palplanches en mer pour assurer la stabilité des terrains sur la partie enterrée du linéaire. D'importants travaux de dragage ont été réalisés pour la mise en place de la conduite.

Un vaste réseau de conduites a été mis en œuvre sur le site pour la circulation de l'eau entre les différents ouvrages du process. Les conduites mises en œuvre sur l'ensemble du site sont en GRP (Glass Reinforced Plastic). Elles ont été réalisées spécifiquement pour le site. Leur mise en œuvre a nécessité le respect de dispositions constructives particulières afin de garantir leur pérennité (largeur minimale de tranchée, compactage adapté...). □



11



12

© SUEZ

11- Test d'étanchéité.
12- Tuyau Ø 2 m pour la prise d'eau en mer.

11- Leak test
12- Ø 2m intake pipeline.

PRINCIPALES QUANTITÉS

SUPERFICIE DU SITE :
90 000 m²
VOLUME DE REMBLAIS :
20 000 m³
VOLUME DE BÉTON :
30 000 m³
DURÉE DES TRAVAUX :
2 ans

PRINCIPAUX INTERVENANTS

MAÎTRE D'OUVRAGE : OPWP (Oman Power and Water Procurement)
TITULAIRE DU MARCHÉ : Consortium Barka Desalination Company (Suez, Engie, Itochu Corporation et Towel & Co LLC)
ÉTUDES D'EXÉCUTION GÉNIE CIVIL : Ingerop
ÉTUDES D'EXÉCUTION GÉOTECHNIQUES : Geos Ingénieurs Conseils

ABSTRACT

BARKA - DESALINATION PLANT IN THE SULTANATE OF OMAN

P.GUERIN, GEOS INGENIEURS CONSEILS - G.GOSSE, INGEROP - PASCAL TROLES, SUEZ

The new BARKA desalination plant is located on the Batinah coast, North of Oman. With a capacity of 281,000 m³ per day, this is the largest desalination plant by reverse osmosis of the Sultanate of Oman. It is planned to open in April 2018 after two years of works.

The main constraints of the site were:

- A poor knowledge of the geotechnical context during the tender phase.
- The construction of the buried structures considering a low-depth water level and sandy material.
- A very short work schedule.

The design of each items has been made to respect these constraints. □

BARKA - USINE DE DESALEMENT D'EAU DE MER AU SULTANAT D'OMAN

P.GUERIN, GEOS INGENIEURS CONSEILS - G.GOSSE, INGEROP - PASCAL TROLES, SUEZ

L'approvisionnement en eau potable est un enjeu sociétal fort pour le Sultanat d'Oman. Ainsi la société OPWP (Oman Power and Water Procurement) a décidé d'augmenter les capacités de production de l'usine de Barka de 280 000 m³ par jour. Suez, attributaire du marché de conception, construction et exploitation a confié à Ingerop et Geos les études de projet et d'exécution. Le projet, implanté sur un site en bordure de mer, avec des excavations importantes sous nappe et des ouvrages de génie civil d'ampleur, a été étudié en un temps record en synergie étroite avec la conception du procédé de traitement. Des optimisations poussées sur les aspects géotechniques et génie civil ont permis de réduire le nombre de pieux ou supprimer des fondations profondes. □