

CONSTRUCTION DE LA NOUVELLE STATION D'ÉPURATION DE CAGNES-SUR-MER

-

EFFETS D'UN POMPAGE EN PHASE TRAVAUX SUR LA NAPPE AU DROIT DE LA STATION EXISTANTE ET PRECONISATIONS

SOMMAIRE

1. OBJET DE LA NOTE	2
2. DONNEES UTILISEES	2
2.1 Données géométriques	2
2.2 Données géotechniques	3
3. ESTIMATION DU DEBIT D'EXHAURE (CAS DE TRAVAUX AVEC POMPAGE)	5
4. EFFET DU POMPAGE SUR LA NAPPE ET LES AVOISINANTS	7
5. PRECONISATIONS POSSIBLES DANS LE CAS DE TRAVAUX DE POMPAGE LORS DES TRAVAUX.....	8
5.1 Introduction	8
5.2 Limitation du débit de pompage	9
5.2.1 Injection de sol	9
5.2.2 Approfondissement des parois (jupe injectée)	9
5.3 Réalimentation de la nappe	10
5.4 Travaux en eau	10
6. CONCLUSION	11

1. OBJET DE LA NOTE

Dans le cadre de la création de la nouvelle station d'épuration de Cagnes en conception-réalisation, la conception des ouvrages à réaliser sur la station existante (station de pompage et bassin d'orage enterré) dépendra des modes de construction privilégiés par telle ou telle entreprise.

Parmi les choix techniques du futur attributaire des études et travaux, la mise en place d'un pompage provisoire est possible.

Aussi, la présente note a pour objet :

- d'étudier les effets du pompage à travers une approche sur les débits de pompage attendus ;
- de proposer un panel de préconisations permettant de limiter l'effet du pompage sur la nappe et de s'affranchir de désordre sur les avoisinants.

2. DONNEES UTILISEES

2.1 DONNEES GEOMETRIQUES

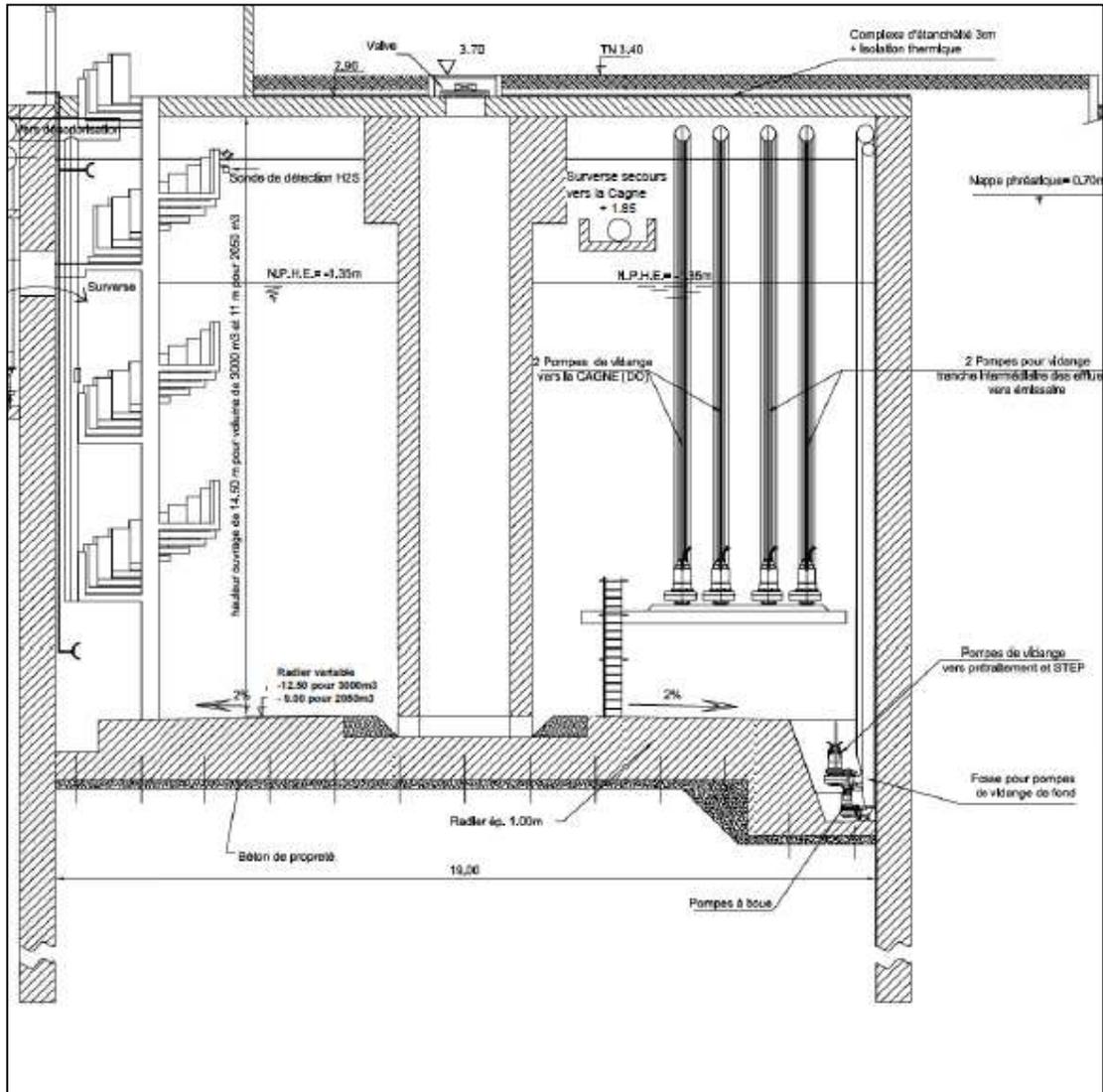
Les données géométriques du bassin d'orage utilisées sont issues de l'étude de faisabilité.

Il s'agit d'un ouvrage circulaire enterré, d'un diamètre de 19 mètres et dont la face inférieure du radier est à une profondeur de 17 mètres par rapport au terrain naturel.

Des parois moulées circulaires sont réalisées préalablement à l'excavation afin de soutenir les terres en phase provisoire et en phase définitive (fonction de soutènement), d'assurer la descente de charge des éléments de génie-civil (fonction de portance) et de protéger la fouille contre les venues d'eau latérales en phase de chantier et en phase de service (fonction de cuvelage).

Les dimensions principales sont les suivantes :

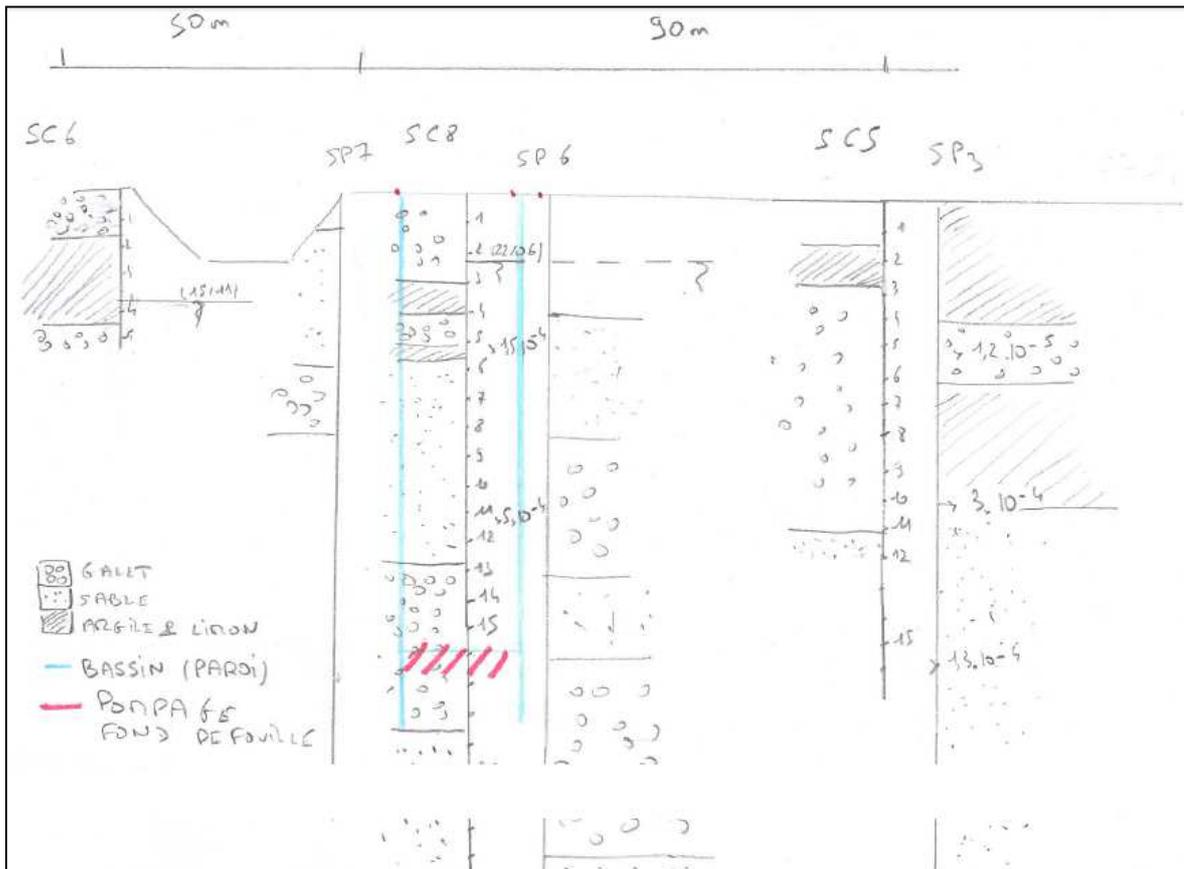
- Cote du TN avant excavation : +3.4 m NGF
- Diamètre d'excavation (circulaire) : 19 m
- Cote du fond de fouille : -13.7 m NGF
- Epaisseur de paroi moulée circulaire : 0.60 m
- Cote basse de la paroi moulée : -18.6 m



Extrait de la coupe de principe de l'ouvrage (cf. étude de faisabilité)

2.2 DONNEES GEOTECHNIQUES

Un croquis de la nature géologique autour du bassin est fourni ci-dessous :



Sondages tirés de la campagne géotechnique ERG pour l'étude de faisabilité

Les données géotechniques disponibles indiquent la présence autour de l'ouvrage de limon argilo-sableux à quelques galets d'épaisseur variable (1m à 5m), puis de sables limoneux à nombreux galets jusqu'à plus de 35 m de profondeur.

Les perméabilités relevés (essai Lefranc) des couches sont les suivantes :

- Perméabilité couche de limons argilo-sableux : $1,2 \cdot 10^{-5}$ m/s
- Perméabilité couche sables-limoneux à nombreux galets : $1,2 \cdot 10^{-4}$ m/s à $5,0 \cdot 10^{-4}$ m/s

Comme explicité auparavant, l'étude d'un rabattement de nappe est complexe et afin de faciliter les calculs il est supposé que le sol est homogène et isotrope et que les nappes sont limitées vers le bas par un mur horizontal.

Il sera donc pris pour hypothèse dans la présente note la présence d'un sol uniforme au niveau de l'ouvrage, de perméabilité $K = 1 \cdot 10^{-4}$ m/s.

Le niveau de la nappe au droit de l'ouvrage est considéré égal à celui du terrain naturel, soit +3.4 m NGF (hypothèse conservatrice).

On considérera pour le modèle la limite du substratum étanche à 35 mètres de profondeur, soit une limite à la cote -31.6 m NGF.

3. ESTIMATION DU DEBIT D'EXHAURE (CAS DE TRAVAUX AVEC POMPAGE)

Le débit de pompage à mettre en place en phase travaux doit permettre le maintien à sec du fond de fouille. Avec ce débit on a donc en fond de fouille un niveau piézométrique égal à celui du niveau du fond de fouille (-13.7 m NGF).

Le niveau piézométrique dans une zone éloignée de l'ouvrage est comme explicité auparavant pris comme égal à celui du terrain naturel (+3.4 m NGF).

L'influence des parois moulées sur le débit de pompage peut être approchée à travers la méthode de Davidenkoff (méthode empirique de détermination des débits d'exhaure en fond de fouille).

Cette méthode suppose que le niveau de la nappe n'est pas modifié à l'extérieur de l'enceinte délimitée par les parois moulées. Il est à noter toutefois que la présence des parois moulées entrainera, si aucune précaution n'est mise en œuvre pour y remédier (voir à ce sujet le chapitre 5), un rabattement de la nappe aux alentours de l'enceinte de la zone de travaux. Des tests de pompage et une étude hydrogéologique, associés à une étude aux éléments finis, permettent d'étudier de manière fine ce rabattement à attendre du fait du pompage des débits d'exhaure. Cette étude n'est pas prévue à ce stade et est laissée à la charge de l'Entreprise, selon son mode de réalisation, dans le cadre de son étude de conception des ouvrages.

Davidenkoff définit deux fonctions de charge ϕ_1 et ϕ_2 dont les valeurs sont données, en fonction de la géométrie du problème, par les courbes de l'abaque ci-dessous :

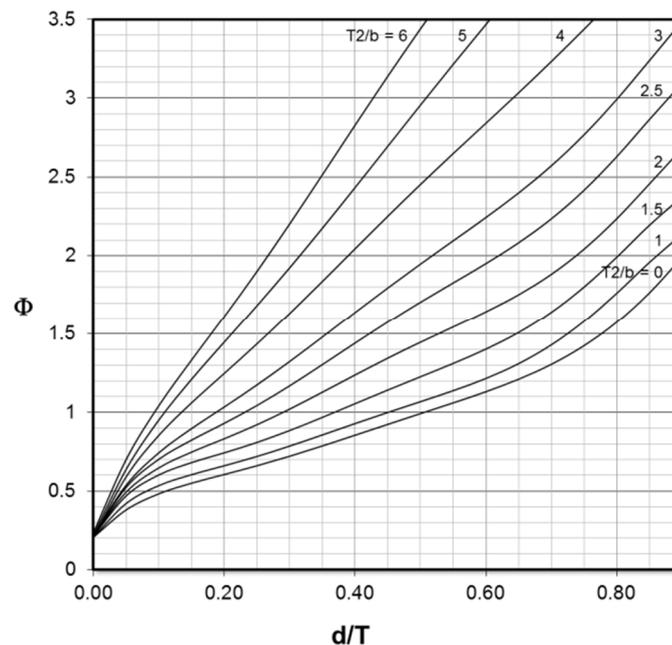


Figure 1 – Abaque de Davidenkoff

Les valeurs géométriques du projet utilisées pour déterminer les deux fonctions de charge de Davidenkoff sont illustrées à travers la figure suivante :

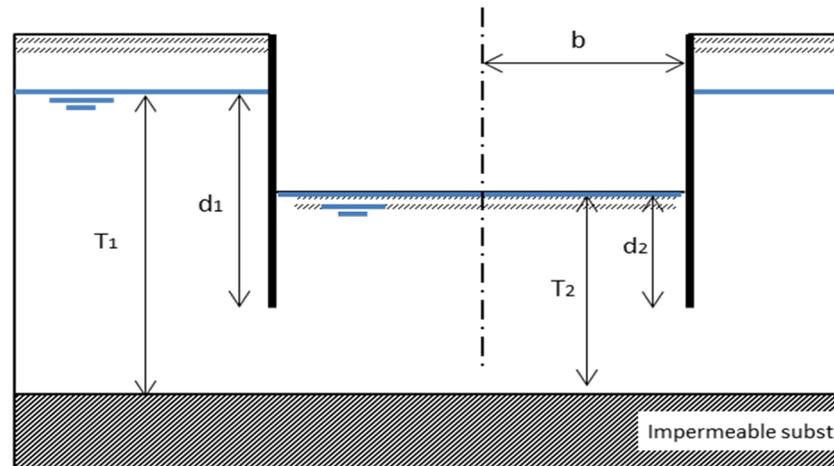


Figure 2 – Données géométriques utilisées dans la méthode de Davidenkoff

Pour le calcul de ϕ_1 on se place sur la courbe $\frac{T_2}{b} = 0$ et on considère $\frac{d}{T} = \frac{d_1}{T_1}$.

Pour le calcul de ϕ_2 on se place sur la courbe correspondant à la valeur de $\frac{T_2}{b}$ et on considère $\frac{d}{T} = \frac{d_2}{T_2}$.

Dans le cas du projet de station d'épuration de Cagnes-sur-Mer, on a ainsi :

- $T_1 = 3.4 - (-31.6) = 35 \text{ m}$
- $d_1 = 3.4 - (-18.6) = 22 \text{ m}$
- $T_2 = -13.7 - (-31.6) = 17.9 \text{ m}$
- $d_2 = -13.7 - (-18.6) = 4.9 \text{ m}$
- $b = 19/2 = 9.5 \text{ m}$

On obtient ainsi :

- $\frac{d_1}{T_1} = \frac{22}{35} = 0.63 \Rightarrow \phi_1 = 1.18$
- $\frac{d_2}{T_2} = \frac{4.9}{17.9} = 0.28$ et $\frac{T_2}{b} = \frac{17.9}{9.5} = 1.9 \Rightarrow \phi_2 = 0.93$

Le débit d'exhaure en fond de fouille est alors donné par la formule suivante pour une enceinte circulaire :

$$Q = 0,8 \cdot \frac{k \cdot H}{\phi_1 + \phi_2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot b$$

Où :

- k est la perméabilité du sol (en m/s)
- H est la différence de charge entre l'extérieur de l'enceinte et le fond de fouille (en m)

- b est le rayon de l'enceinte.

Dans le cas du projet de station d'épuration de Cagnes-sur-Mer, on obtient ainsi un débit d'exhaure de :

$$Q = 0,8 \cdot \frac{10^{-4} * (3,4 - (-13,7))}{1,18 + 0,93} \cdot 2 \cdot \pi * 9,5 = 0,0387 \text{ m}^3/\text{s} = 140 \text{ m}^3/\text{h}$$

4. EFFET DU POMPAGE SUR LA NAPPE ET LES AVOISINANTS

Le fond de fouille de l'ouvrage est situé 16m sous le terrain naturel (dans le cas d'un réservoir de 3000m³ et selon la conception d'étude de faisabilité). Aussi l'effet du pompage, selon la configuration géologique du site, peut avoir des effets variés :

- La couche de limons argilo-sableuse est continue : l'écoulement des eaux lors du drainage de la nappe se fera plutôt horizontalement ;

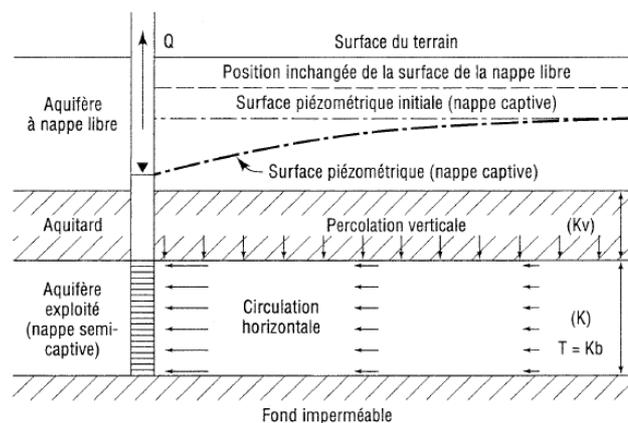


Figure 4.2 : Vue en coupe d'un aquifère à nappe semi-captive réalimenté par un aquifère supérieur à nappe libre.

- La couche de limons argilo-sableuse est discontinue : l'écoulement des eaux lors du drainage de la nappe se fera soit horizontalement, soit verticalement selon les configurations de discontinuités. Dans ce cadre, plusieurs configurations sont possibles selon les géométries des discontinuités et il est délicat de se positionner sur tel ou tel configuration d'écoulement.

L'effet du pompage sur la nappe peut être appréhendé par un essai de pompage in situ pour peu que celui-ci soit conforme au cadre de réalisation des futurs ouvrages (nappes impactées après création des parois moulées à prévoir si nécessaire donc dans le cadre des études de conception de l'Entreprise).

Les tassements qui se produisent dans la zone intéressée par un rabattement de nappe sont dus :

- A l'augmentation des contraintes effectives dans le sol ;

- A l'entraînement des fines du sol vers les puits de pompage –(érosion interne) : dans ce cadre une vérification des risques de Boulance et Renard et un système de pompage adapté (avec filtre) permet de prendre en compte le risque en limitant les venues de fines.

Le phénomène d'augmentation des contraintes effectives dans le sol est lié à l'impact de la présence ou non de l'eau dans le sol sur le poids propre du sol. La variation du niveau de nappe entraîne une variation du poids propre du sol sur la hauteur de sol comprise dans cette variation. Cela se traduit par un accroissement de la contrainte verticale appliquée sur le sol.

Dans le cas de sol compressible, lorsque l'amplitude du rabattement est faible par rapport à l'épaisseur des couches compressibles, le tassement est rapidement négligeable. Si cette amplitude augmente et que la couche compressible a une épaisseur suffisante, un tassement peut survenir.

Dans le cas de sol incompressible (sur consolidé), l'augmentation de la contrainte effective peut également entraîner des tassements. Dans ce cas, l'ouvrage tasse d'autant moins que ses fondations sont plus étendues et qu'il exerce une pression plus élevée sur le sol.

Dans le cas d'un abaissement non uniforme de la nappe, il existe un risque de créer des tassements différentiels sur les avoisinants. Le rabattement de nappe dans ce cas de figure risque d'endommager principalement les constructions légères de grande superficie, fondées sur semelles étroites et s'appuyant sur un sol normalement consolidé ou légèrement sur consolidé.

Aussi le chapitre qui suit est dédié aux sujétions permettant de remédier aux effets du pompage sur la nappe.

5. PRECONISATIONS POSSIBLES DANS LE CAS DE TRAVAUX DE POMPAGE LORS DES TRAVAUX

5.1 INTRODUCTION

Le bassin de stockage est une structure circulaire en béton armé. Il présente un diamètre extérieur d'environ 20 m et se compose d'un radier, d'une colonne centrale ainsi que d'une dalle supérieure permettant le recouvrement de l'édifice.

Au regard de la géotechnique et des contraintes de projet, la structure circulaire du bassin pourra être réalisée en paroi moulée (ou sa variante en pieux sécants). Compte tenu de la présence d'eau et du caractère graveleux des sols, des injections au coulis de ciment de part et d'autre de la paroi avant sa réalisation pourraient s'avérer nécessaire. Ces dernières permettront ainsi de limiter les fuites de boue de bentonite lors de l'excavation.

Les phénomènes de Boulance et de Renard devront impérativement être pris en compte dans le dimensionnement des parois moulées, et pourraient conduire à des longueurs totales de paroi de l'ordre de 25m à 30 m.

Après réalisation de cette dernière, la nappe pourra être rabattue pour réaliser le radier. A cette étape, la mise en place d'un drain et d'un pompage sous le radier pourra être envisagé pour assurer sa stabilité (voir calcul du débit de pompage au paragraphe 3), soit un débit théorique de 140m³/h.

Aussi une série de mesure peuvent être prévue par anticipation pour limiter les effets du pompage sur la nappe. Certaines de ces mesures sont explicitées ci-après.

5.2 LIMITATION DU DEBIT DE POMPAGE

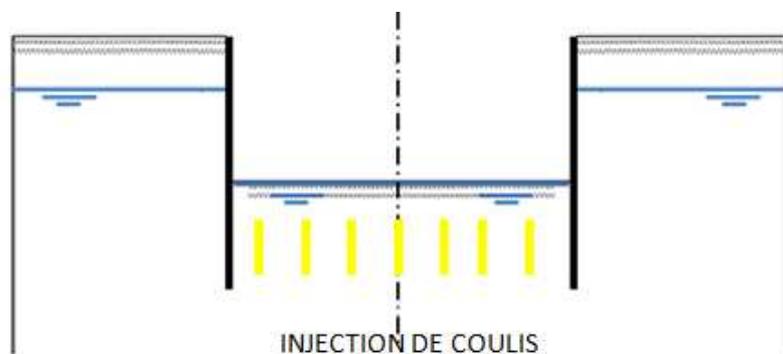
Le principe est simple : l'effet du pompage sur la nappe est directement lié au débit en jeu. Plus le débit est important, plus le rabattement de la nappe a un rayon d'influence important.

Aussi, deux principes permettant de minimiser le débit de pompage sont présentés ci-après.

5.2.1 Injection de sol

Cette technique consiste à venir injecter le sol par du coulis de ciment en fond de fouille pour améliorer son imperméabilité.

Ainsi la perméabilité du sol actuel tourne autour de $1 \times 10^{-4} \text{m/s}$. Après injection, cette perméabilité passerait à une valeur de $1 \times 10^{-5} \text{m/s}$.



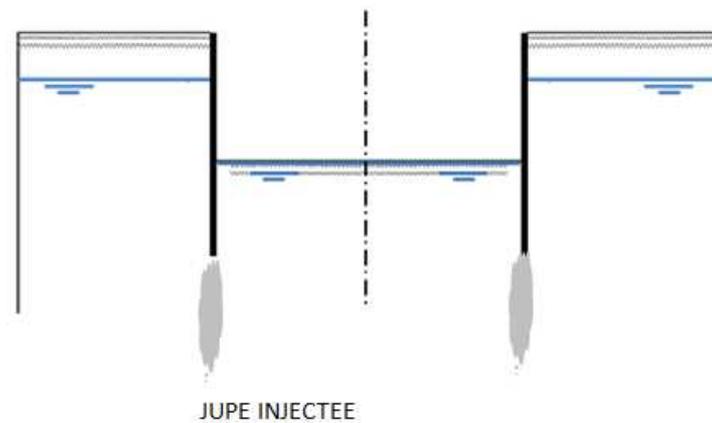
Amélioration de l'imperméabilité du sol avec injection de coulis

Cela permet de réduire par 10 le débit attendu, soit une valeur de débit de pompage de $14 \text{m}^3/\text{h}$ (soit moins de 4l/s) au lieu du débit de $140 \text{m}^3/\text{h}$ calculé ci-avant sans injection de sol.

L'effet du pompage sur la nappe serait de fait extrêmement faible en comparaison du débit sans injection au regard du débit pompé.

5.2.2 Approfondissement des parois (jupe injectée)

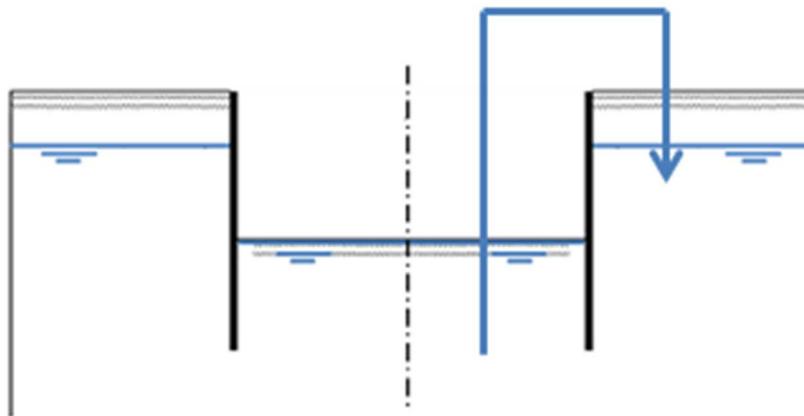
Cette technique consiste à rallonger la fiche des parois moulées pour augmenter le parcours de l'eau et ainsi minimiser les débits des pompes.



Réalisation de longueurs de parois supplémentaires par jupe injectée

5.3 REALIMENTATION DE LA NAPPE

Cette technique rustique permet une réalimentation instantanée de la nappe par le débit pompé. Elle permet ainsi de conserver des niveaux de nappe stable et d'éviter les problématiques de différentiel de niveau hydraulique sur les avoisinants proches.



Système de pompage avec réalimentation directe de la nappe

Le système de réalimentation de nappe peut se faire par la mise en place de puits d'alimentation ou de manière gravitaire.

5.4 TRAVAUX EN EAU

Des techniques de mise en œuvre peuvent permettre d'éviter les pompages en phase travaux.

Ainsi suivant la technique de construction retenue, la réalisation du radier du bassin pourrait se faire en eau : terrassement en eau, mise ne place d'un ferrailage par plongeur et coulage d'un béton immergé, etc. ...

Cette technique permet de limiter les effets du pompage et également les sollicitations sur la structure de l'ouvrage en phase travaux.

Il est à noter que ce type de travaux se pratique régulièrement pour des travaux de génie civil portuaire maritime ou fluvial. Il requière un savoir-faire spécifique du fait partie du panel possible des solutions de variantes d'Entreprise pour la construction du bassin (s'agissant de la construction de la nouvelle station d'épuration de Cagnes, cette technique ne peut être imposée, permettant ainsi à chaque entreprise de proposer leur propre précautions en lien avec la prise en compte par leurs soins des avoisinants).

6. CONCLUSION

Dans le cas du projet de la nouvelle station d'épuration de Cagnes-sur-Mer, il est possible d'estimer le débit d'exhaure à pomper pour maintenir à sec le fond de fouille de la zone de travaux à partir de la méthode de Davidenkoff qui intègre la présence des parois moulées et conduit à un débit théorique d'exhaure de 140 m³/s.

Compte-tenu des résultats de la présente note, l'entreprise en charge des travaux de la station aura à sa charge selon le mode de construction envisagé par ses soins :

- L'établissement d'une étude justifiant du non-impact des travaux sur les avoisinants et l'estimation des débits d'exhaure;
- Le cas échéant, la mise en œuvre de sujétions de travaux, à l'instar de celles décrites dans la présente note, pour garantir l'intégrité des avoisinants. Dans tous les cas, qu'ils s'agissent de travaux avec pompage ou sans, il sera prévu lors des travaux un suivi des bâtiments avoisinants.

Ainsi, le déroulé des études et travaux permettra de prendre en compte, à chaque étape du projet, les avoisinants, pour permettre de garantir leur intégrité.