

IMPORTANCE DES PHENOMENES HYDRAULIQUES DANS LA CONCEPTION ET LA REALISATION DES FOUILLES PROFONDES

IMPORTANCE OF HYDRAULIC PHENOMENA IN THE DESIGN AND COMPLETION OF DEEP EXCAVATIONS

Roxanne HAMBLIN ¹, Bruno DEMAY²

¹ Antea Group, Antony, France

² Antea Group, Antony, France

RÉSUMÉ – La réalisation d'excavations profondes sous nappe est soumise à des phénomènes hydrauliques susceptibles de générer une instabilité de l'ouvrage. Ce risque peut être maîtrisé au moyen de solutions incluant des traitements de terrain pour étancher les terrains et / ou le pompage. Celles-ci doivent cependant être bien analysées en phase de conception de l'ouvrage afin d'en assurer la pérennité. Cet article démontre notamment que certaines solutions couramment employées comme le bouchon injecté en pied de paroi peuvent se révéler non sécuritaires car rendant l'ouvrage très sensible à des défauts d'exécution des parois moulées.

ABSTRACT – The completion of deep excavations under water table is subject to hydraulic phenomena that may lead to the instability of the structure. This risk however can be controlled by means of ground treatment for water tightness and pumping solutions. These solutions however must be designed in a proper way. This paper demonstrates that some usual solutions such as grouting at the base of the diaphragm walls may prove unsafe because they make the supporting structure very sensitive to flaws occurring during the completion of the works.

1.Introduction

La réalisation d'un ouvrage enterré comme une station de métro, à partir d'une fouille profonde avec soutènements, implique de nombreuses contraintes qui doivent être maîtrisées dès la conception afin d'assurer la pérennité de l'ouvrage depuis la phase travaux jusqu'à sa mise en service. Parmi ces contraintes, la maîtrise des phénomènes hydrauliques est essentielle.

En phase travaux, des dispositifs d'évacuation des eaux en fond de fouille tels que des puisards, des puits de pompage, ou des drains sont utilisés couramment pour assurer le dénoyage des terrains. Mais une excavation profonde sous nappe peut modifier profondément la répartition du potentiel hydraulique autour de la fouille et générer de forts gradients hydrauliques entre l'intérieur et l'extérieur de la fouille, source de phénomènes d'instabilité du fond de fouille sous toutes ses formes. Ces phénomènes sont anticipés en phase de conception de l'ouvrage et des solutions telles que les fonds de fouille ou jupes injectées sont souvent proposées. Mais ces solutions, si elles sont mal étudiées, peuvent avoir un effet très défavorable et augmenter les gradients hydrauliques entre l'extérieur et l'intérieur de la fouille à des profondeurs importantes, où l'étanchéité parfaite du soutènement est souvent difficilement réalisable lors de l'exécution. De même, la combinaison de plusieurs mesures peut au final être contre-productive car non sécuritaire.

L'objectif de cette communication est d'illustrer ces concepts via une analyse globale par la méthode aux éléments finis en couplant les traditionnels calculs mécaniques

(déplacements, efforts dans la structure, coefficients de sécurité) avec des calculs hydrauliques basés sur la perméabilité des terrains et les caractéristiques des écoulements liés aux variations de potentiel hydraulique induits par l'excavation.

Ce type d'approche incluant des calculs couplés hydraulique / mécanique vise, par des analyses de sensibilité paramétrées, à aider dans les choix de conception et à orienter au mieux les reconnaissances géotechniques, afin d'anticiper et maîtriser les risques liés aux phénomènes hydrauliques en fouille profonde.

2. Contexte du projet d'étude

2.1. Géométrie et structure de l'ouvrage

L'étude porte sur un projet-type de gare souterraine en zone urbaine composée de 3 niveaux enterrés, séparés par des dalles et un radier en voûte inversée. Des butons intermédiaires provisoires sont prévus pour assurer la stabilité de l'ouvrage. L'excavation de la boîte, réalisée par la méthode dite "top-down", est répartie sur 25m de large et 60m de long.

2.2. Contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique

Les investigations réalisées au droit du site ont permis d'établir le modèle géologique et géotechnique au sein du Tableau 1 :

Tableau 1: Modèle géologique et géotechnique

Lithologie	Profondeur de la base (m/T.N.)	γ_d (kN/m ³)	E_M (MPa)	PI (MPa)	E' (MPa)	α	c' (kPa)	ϕ' (°)	K (m/s)
Marno-calcaire	5	17,5	38	3,3	57	0,66	15	37	5.10^{-6}
Sables	19	21	48	4,7	192	0,25	0	35	1.10^{-5}
Marnes	28	20	142	6,0	568	0,25	25	35	7.10^{-6}
Calcaires	48	20	235	6,8	940	0,25	200	35	5.10^{-5}
Sables	>60	20	45	3,0	90	0,5	0	35	1.10^{-5}

Un seul niveau de nappe a été identifié au droit du site à une profondeur de 6,50 m par rapport au terrain naturel ($h = -6.50$ m). Il caractérise une nappe libre.

3. Modélisation aux éléments finis

Le logiciel PLAXIS 2D qui permet cette étude par un calcul aux éléments finis, a été paramétré selon le phasage suivant :

1. Initialisation des contraintes ;
2. Réalisation des parois moulées ;
3. Excavation sous la dalle de couverture N0 et réalisation de la dalle N0 ;
4. Excavation et pose d'un premier lit de butons ;
5. Excavation sous la dalle N-1 et réalisation de la dalle N-1 ;
6. Excavation et pose d'un second lit de butons ;
7. Excavation sous la dalle N-2 et réalisation de la dalle N-2 ;
8. Excavation et pose d'un troisième lit de butons ;
9. Excavation et pose du dernier lit de butons ;
10. Excavation sous le radier voûte et réalisation du radier voûte ;
11. Enlèvement des butons

De la phase 1 (Réalisation des parois moulées) à la phase 10 (Excavation sous radier), le modèle comporte également un calcul d'écoulement afin d'établir les débits d'exhaure aux différentes phases d'excavation.

On considérera pour les terrains un comportement élasto-plastique avec critère de rupture de Mohr-Coulomb (EPMC). Les calculs permettront d'évaluer, en fonction de la conception de la fouille, trois paramètres essentiels : le débit en fond de fouille, le gradient hydraulique en un point défini et la charge hydraulique.

4. Différents cas d'étude

4.1. Excavation au niveau du radier sans bouchon injecté

Ce cas d'étude correspond à la situation de base du projet : une excavation profonde sans traitement des terrains encaissants mais équipée d'un dispositif d'évacuation des eaux en fond de fouille en phase d'exécution. Compte tenu de l'état de fracturation variable du massif rocheux dans lequel sont ancrées les parois moulées, nous avons procédé à une analyse de sensibilité en faisant varier la perméabilité entre deux valeurs extrêmes $K_{\text{calcaires}} = 5.10^{-4}$ m/s et $K_{\text{calcaires}} = 5.10^{-6}$ m/s. Ces différents paramètres de base permettront d'étudier l'écoulement hydraulique en charge. Le gradient hydraulique est mesuré entre deux points situés à 3 mètres sous le fond de fouille de part et d'autre de la paroi.

A l'issue des calculs, les résultats sont donnés dans le Tableau 2 ci-dessous :

Tableau 2 : Excavation au niveau du radier sans bouchon injecté

Perméabilité $K_{\text{calcaires}}$ (m/s)	Débit d'exhaure (m^3/h)	Gradient hydraulique à travers la paroi
5.10^{-4}	-	-
5.10^{-5}	120	9
5.10^{-6}	24	11

Pour une perméabilité $K_{\text{calcaires}} = 5.10^{-4}$ m/s la stabilité de l'ouvrage n'est pas assurée : la modélisation n'a pu aboutir et s'est arrêtée à la phase d'excavation du niveau N-2 suite à une rupture du sol entourant l'ouvrage. Pour les deux autres perméabilités testées, le débit d'exhaure est multiplié par 5 lorsque la perméabilité augmente d'un facteur 10. On observe également que le gradient hydraulique à travers la paroi moulée est élevé du fait du différentiel de charge hydraulique de part et d'autre de la paroi, comme illustré sur la Figure 1.

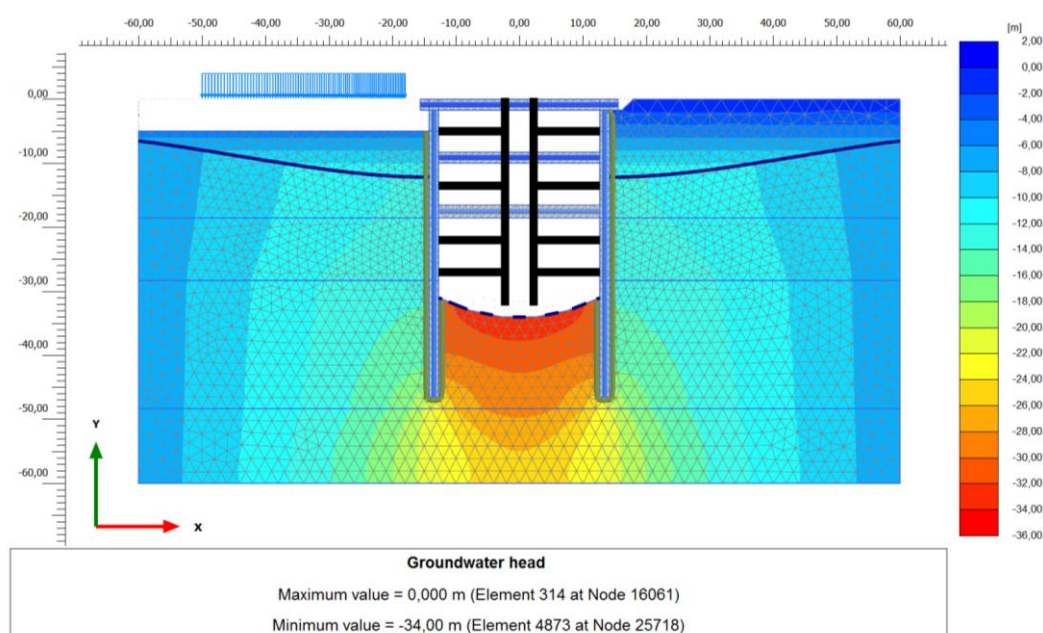


Figure 1 : Evolution de la charge hydraulique lors de l'excavation du radier sans bouchon injecté - $K_{\text{calcaires}} = 5.10^{-5}$ m/s

Par conséquent, l'excavation profonde sous nappe modifie la répartition du potentiel hydraulique autour de la fouille et génère d'importants gradients hydrauliques à travers la paroi. Cette excavation nécessite alors une conception spécifique pour assurer la stabilité du fond de fouille. Une solution de traitement des terrains en fond de fouille doit être étudiée en vue de réduire les sous-pressions hydrauliques.

4.2. Mise en œuvre d'un bouchon injecté en pied de paroi

Une première solution est classiquement la mise en œuvre d'un bouchon injecté, sur une épaisseur de 3m avec une perméabilité de $K_{BI}=1.10^{-7}$ m/s, en pied des parois moulées afin de réduire les débits d'exhaure. Cette étape d'injection est réalisée à la suite des parois moulées et préalablement à toute phase d'excavation de la boîte.

Une fois la modélisation de cette solution terminée, les résultats obtenus soulignent l'intérêt d'une injection préalable des terrains en termes de réduction du débit d'exhaure, mais au prix d'une augmentation significative des gradients hydrauliques à travers la paroi. Le Tableau 3 présente les valeurs calculées pour chaque perméabilité de calcaires :

Tableau 3 : Excavation au niveau du radier avec bouchon injecté en pied de paroi

Perméabilité $K_{\text{calcaires}}$ (m/s)	Débit d'exhaure (m^3/h)	Gradient hydraulique à travers la paroi
5.10^{-4}	442	18
5.10^{-5}	47	17
5.10^{-6}	7	16

D'après les résultats, les valeurs calculées du débit d'exhaure et du gradient hydraulique restent proportionnelles aux perméabilités des calcaires. Cependant, par comparaison avec la précédente situation, les débits d'exhaure sont réduits tandis que les gradients hydrauliques à travers la paroi sont amplifiés.

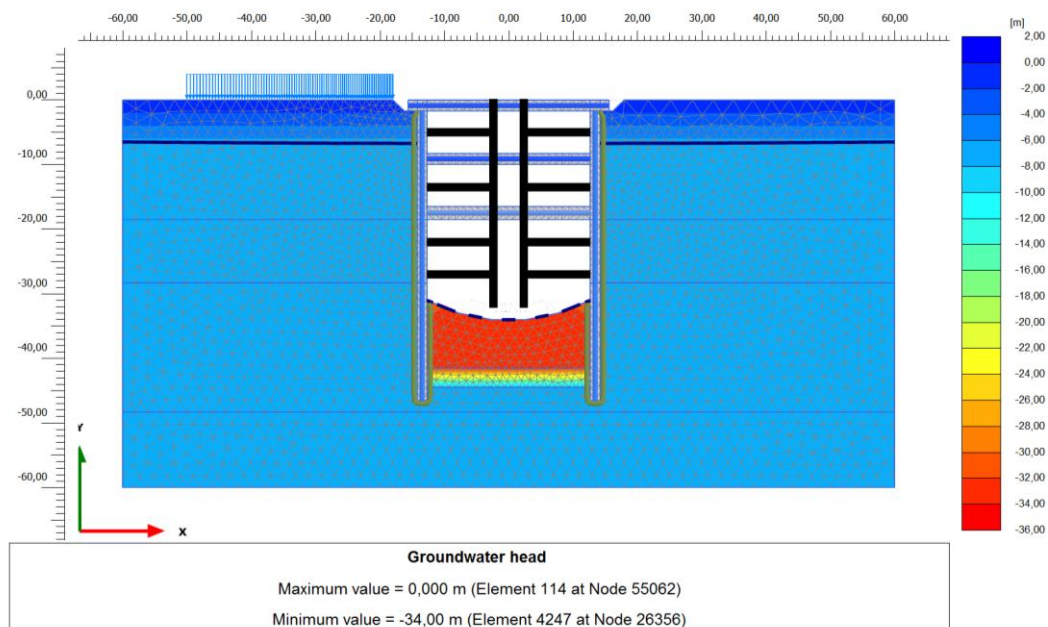


Figure 2 : Evolution de la charge hydraulique lors de l'excavation du radier avec bouchon injecté - $K_{\text{Calcaires}} = 5.10^{-5}$ m/s

Sur la **Figure 2**, la charge hydraulique la plus élevée au sein du modèle est celle qui se développe entre le radier et le bouchon injecté : c'est une zone de concentration des sous-pressions hydrostatiques.

La création du traditionnel bouchon injecté en pied de paroi revient donc à créer entre le bouchon injecté et le fond de fouille une zone de terrain où la différence de potentiel hydraulique avec l'extérieur de la paroi est très importante, amenant la création de forts gradients hydrauliques.

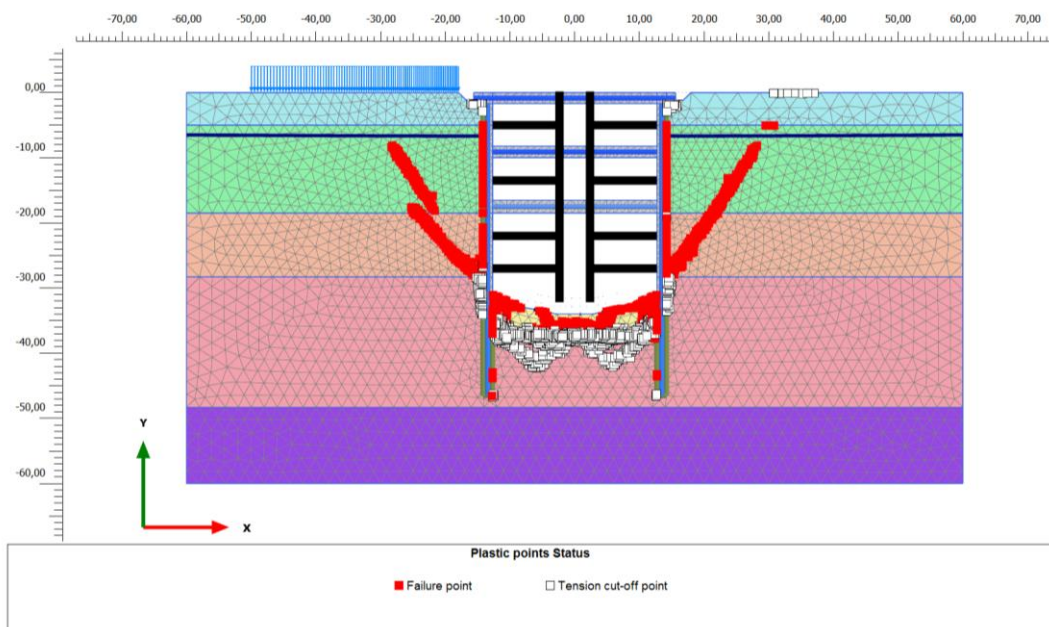
Ces forts gradients hydrauliques peuvent avoir des effets induits dévastateurs (phénomènes de boulangerie et de renard) dès lors qu'existe une zone de faiblesse dans la résistance et l'étanchéité du soutènement (défaut d'étanchéité, joint défectueux entre éléments de soutènement...).

La solution de bouchon injecté en pied de paroi peut donc avoir un effet très défavorable en augmentant les gradients hydrauliques entre l'extérieur et l'intérieur de la fouille à une profondeur importante, ce qui attire l'attention sur la difficulté de réaliser correctement l'étanchéité du soutènement lors de l'exécution, compte-tenu des techniques usuelles de réalisation des joints entre panneaux de parois moulées à grande profondeur.

Par la suite, il est intéressant d'étudier la position du bouchon injecté sous le futur radier afin de réduire cette zone de fortes sous-pressions.

4.3. Repositionnement du bouchon injecté en fond de fouille

Ce nouveau cas d'étude propose le repositionnement du bouchon injecté en fond de fouille, solution appelée plus communément « radier injecté ». Le bouchon injecté de 3m est réalisé en le positionnant en limite du fond de fouille. A l'issue de la modélisation, il est constaté une rupture des terrains (calcul non mené à terme) lors de l'excavation du radier dans les 3 cas de perméabilité $K_{\text{calcaires}}$ comme imagé sur la **Figure 3**.



Cette rupture est liée au soulèvement en fond de fouille. Il est donc intéressant de suivre le raisonnement inverse de vérification de non-soulèvement global du fond de fouille en redimensionnant l'épaisseur de la zone à injecter.

L'inéquation fondamentale pour assurer la stabilité du fond de fouille est :
Forces d'écoulement liées au gradient hydraulique ascendant < Poids des terrains + Résistance au cisaillement des terrains.

Les forces d'écoulement sont pour un volume élémentaire dV égales à $dF/dV = i\gamma_w$. A ces forces d'écoulement s'opposent le poids volumique total du terrain injecté γ et la résistance au cisaillement C .

Pour une largeur de fouille excavée L et une longueur élémentaire dx , le volume de sol vaut $dV = Ledx$.

La résistance au cisaillement C s'applique sur les 2 faces latérales du volume élémentaire dV , soit sur une hauteur e et une longueur dx .

On a l'inéquation fondamentale suivante pour assurer la stabilité :

$$i\gamma_w Ledx < \gamma Ledx + 2Cedx$$

En remplaçant le gradient par sa valeur en fonction de e , on a alors :

$$(h_A - h_B)\gamma_w L < e(\gamma L + 2C)$$

L'application des règles Eurocode 7 conduit à multiplier les actions force d'écoulement par 1,35 et les forces résistantes par 0,9 :

$$1.35(h_A - h_B)\gamma_w L < 0.9e(\gamma L + 2C) \quad (1)$$

Avec :

- $h_A - h_B$: perte de charge hydraulique en m à travers l'épaisseur de la zone injectée
- γ_w : poids volumique de l'eau
- γ : poids volumique des terrains injectés
- C : cohésion des terrains injectés
- L : largeur de la fouille excavée
- e : épaisseur des terrains injectés

La valeur de e est alors déterminée par la formule suivante :

$$e > \frac{1.5(h_A - h_B)\gamma_w L}{\gamma L + 2C} \quad (2)$$

Si la résistance au cisaillement est négligée, l'épaisseur minimale des terrains à injecter est alors égale à 11 m ($c = 0$ dans la formule ci-dessus).

En injectant les terrains sur 11 m d'épaisseur en fond de fouille, on obtient un débit d'exhaure de $1 \text{ m}^3/\text{h}$ et un gradient hydraulique à travers la paroi de 11, quelle que soit la perméabilité du calcaire.

La **Figure 4** explicite le rôle d'une injection des terrains sur une hauteur importante : le gradient hydraulique à travers la paroi est atténué grâce à l'importante épaisseur des calcaires injectés peu perméables, cependant il reste toujours important à proximité du fond de fouille.

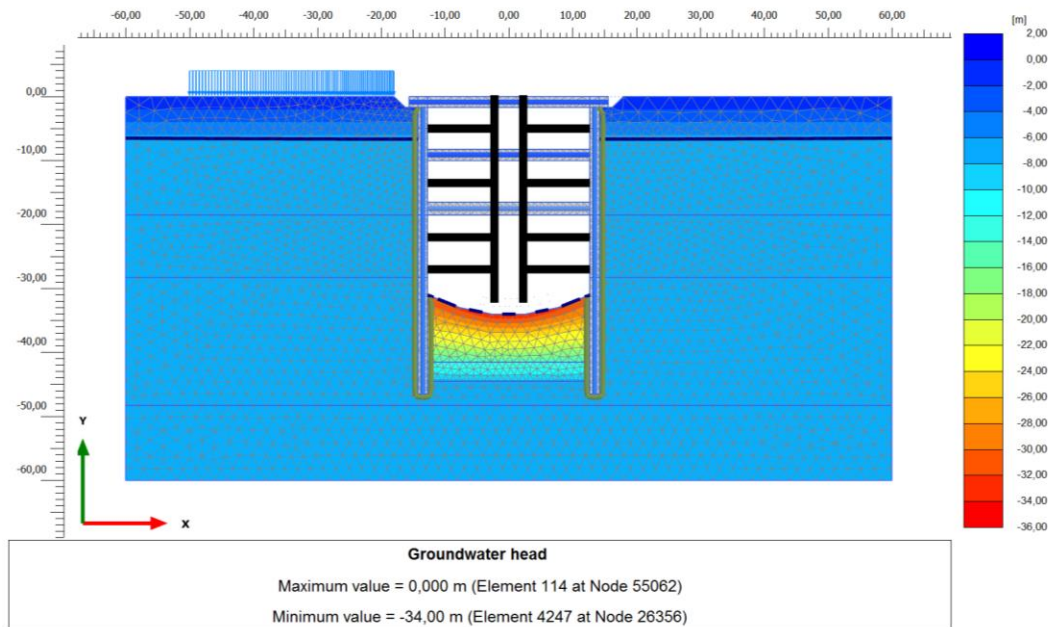


Figure 4 : Evolution de la charge hydraulique lors de l'excavation du radier avec bouchon injecté toute hauteur - $K_{\text{Calcaires}} = 5.10^{-6} \text{ m/s}$

La solution d'injection des terrains en fond de fouille sur une importante épaisseur est très efficace en termes de réduction des débits d'exhaure ; par contre, le fort gradient hydraulique en fond de fouille à travers la paroi constitue un risque quant aux aléas de réalisation des soutènements.

Une nouvelle solution peut être analysée : la réalisation d'un bouchon d'étanchéité par renforcement des terrains en jet grouting.

4.4. Traitement des terrains par jet grouting

Le traitement des terrains par jet grouting consiste à réaliser un bouchon d'étanchéité tout en améliorant la cohésion des terrains et donc à augmenter leur résistance au cisaillement, facteur de stabilité au non soulèvement global du fond de fouille. Nous faisons l'hypothèse qu'après réalisation du jet grouting, la cohésion des calcaire $C_{\text{calcaires}} = 200 \text{ kPa}$ est améliorée et que la nouvelle valeur cohésion $C_{\text{calcaires traités}}$ atteint 500 kPa . En vue d'une prévention du soulèvement en fond de fouille, cette valeur de cohésion $C_{\text{calcaires traités}}$ est prise en compte dans l'équation (2), ce qui donne une épaisseur des calcaires à traiter égale à 7 m en fond de fouille. Le bouchon traité est considéré étanche, soit un matériau non poreux dans la modélisation.

Les résultats issus de la modélisation sont illustrés à travers la **Figure 5** où l'on constate une absence de gradient hydraulique à travers la paroi sous la zone traitée.

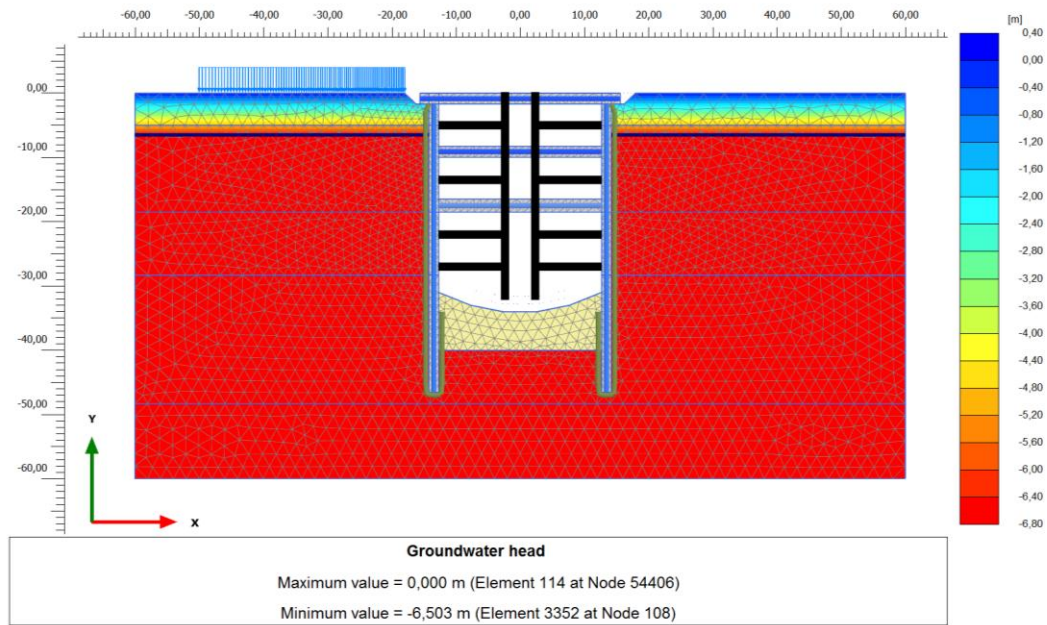


Figure 5 : Evolution de la charge hydraulique lors de l'excavation du radier suite au jet grouting-
 $K_{\text{Calcaires}} = 5.10^{-4} \text{m/s}$

5. Conclusion

Cette communication permet de montrer l'importance des phénomènes hydrauliques dans la conception et la réalisation des fouilles profondes. La maîtrise des risques induits par ces phénomènes est un enjeu primordial d'un point de vue technique, économique et planning.

Sans traitement spécifique des terrains, une longueur de fiche justifiée par les calculs de stabilité mécanique conduit à augmenter significativement la différence de charge hydraulique de part et d'autre de la paroi de soutènement, sous le fond de fouille, ce qui rend la stabilité du fond de fouille vulnérable aux phénomènes hydrauliques de renard et de boulangue en cas de défaut d'étanchéité consécutif à des difficultés de réalisation.

Pour pallier à ce risque, le procédé courant de réalisation d'un bouchon injecté au niveau du pied des parois réduit la perméabilité des terrains et de ce fait le débit d'exhaure, mais augmente encore le gradient hydraulique à travers la paroi ce qui rend l'ouvrage très sensible aux défauts d'exécution de la paroi, notamment en ce qui concerne les joints entre panneaux de paroi moulée.

De même, la mise en œuvre d'un simple radier injecté en fond de fouille n'est pas une solution suffisante pour assurer le non-soulèvement du fond de fouille. En effet, si l'injection des terrains permet une réduction des perméabilités et donc des débits, elle ne confère pas au terrain une cohésion suffisante pour résister à la sous-pression hydraulique exercée sous le fond de fouille, qui reste largement supérieure aux forces stabilisatrices (poids des terres) si l'épaisseur injectée demeure trop faible.

Une des solutions techniques envisageables pour répondre au problème est en fait le traitement des terrains sous le fond de fouille par jet grouting, qui, tout en réduisant la perméabilité des terrains et donc les débits d'exhaure, améliore la cohésion des terrains en assurant la stabilité du fond de fouille sur une épaisseur traitée moindre. La mise en œuvre du traitement est à la fois plus rapide et plus sûre que par le procédé d'injection.