

# DEBITS D'EXHAURE ISSUS D'UN RABATTEMENT DE NAPPE – CAS D'UNE FOUILLE CIRCULAIRE

## DEWATERING OUTFLOWS – CASE OF A CIRCULAR EXCAVATION

Joan GUIOL<sup>1</sup>, Mathilde TERNISIEN<sup>1</sup>, Daniel DIAS<sup>1</sup>, Eric ANTOINET<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Antea Group, Antony, France

**RÉSUMÉ** – Dans le cadre de projets qui impliquent une action anthropique sur le système hydrogéologique, tel qu'un rabattement du niveau de la nappe, il est nécessaire de pouvoir estimer les débits d'exhaure. En confrontant les modèles analytiques, issus des formules de Dupuit et de Schneebeli, à des modèles numériques aux éléments finis, des recommandations sur l'usage de ces méthodes d'estimation des débits d'exhaure ont été établies.

**ABSTRACT** – When human activities impact the hydrogeological system, like during dewatering, it is necessary to estimate the outflows. By comparing the analytical models, obtained by Dupuit and Schneebeli formulae, to finite elements models, recommendations on the use of these outflows' estimation methods were established.

### 1. Introduction

La réalisation d'ouvrages enterrés sous le niveau de la nappe, au sein d'horizons faiblement à moyennement perméables requiert une évaluation précise des conditions d'écoulement autour de l'ouvrage afin d'optimiser leur conception, en particulier en ce qui concerne la nécessité ou non d'un écran d'étanchéité périphérique. L'estimation des débits d'exhaure doit donc être suffisamment précise pour choisir les bonnes solutions techniques et optimiser les dispositifs d'exhaure à mettre en place pour le rabattement de la nappe. Néanmoins, la modélisation de ce phénomène de rabattement de la nappe n'est pas toujours aisée et le présent article a pour objet de fournir des approches techniques opérationnelles.

Pour répondre à ces problématiques, les outils usuels à disposition des géotechniciens sont les formules analytiques ou empiriques et la modélisation numérique.

Les formules analytiques permettent d'obtenir des ordres de grandeur des débits. Plusieurs formulations sont disponibles et il convient de choisir celle qui est la mieux adaptée au cas d'étude. Ces outils sont dépendants de la complexité de la situation étudiée et sont également limités par les hypothèses de calcul concernant les couches géologiques (homogénéité, isotropie, ...) et la géométrie de l'excavation. Dans le cas du rabattement d'une nappe libre, en régime d'écoulement permanent, au sein d'une fouille circulaire, deux formules sont applicables :

- La formule de Dupuit (adaptée à une nappe libre). Cette formule permet d'exprimer le débit d'exhaure au sein d'une fouille circulaire de rayon  $r$ , en fonction du rabattement de la nappe, de la perméabilité des matériaux et du rayon d'action de la fouille (Bourrier, 2018).
- La formule de Schneebeli. Cette formule donne le débit d'exhaure en considérant des paramètres similaires à celle de Dupuit. La différence entre les deux réside dans le fait que la formule de Schneebeli omet la notion de rayon d'action et considère la surface dite mouillée de la fouille et un coefficient empirique de 2,5 (Philipponnat et Hubert, 2008).

La difficulté réside dans le fait que ces formules, tout en s'appuyant une équation similaire pour l'évaluation des écoulements, donnent des résultats différents pour une même configuration.

Les modèles numériques par éléments finis, différences finies ou éléments frontières peuvent également être utilisés pour obtenir le débit d'exhaure. Ces modèles numériques permettent d'obtenir des résultats plus proches de la réalité car les hypothèses de calcul sont moins limitées. En effet, ils permettent de modéliser un milieu multicouche, à géométrie complexe, et de prendre en compte les hétérogénéités du milieu naturel.

Dans cet article, des études paramétriques mettant en œuvre des modélisations analytiques et numériques sont proposées afin de déterminer les paramètres qui influencent fortement les valeurs de débits d'exhaure et la forme de la nappe. Le cas d'étude est celui d'une fouille circulaire au sein de laquelle une nappe libre en régime d'écoulement permanent doit être rabattue. Trois paramètres ont été particulièrement étudiés : la perméabilité du massif de terrain, l'influence de l'anisotropie de perméabilité et la hauteur de rabattement de la nappe afin de proposer des recommandations sur l'emploi de ces outils de modélisation dans le cadre d'un rabattement de nappe.

## 2. Cas d'étude

### 2.1. Cadre de référence

Le cadre de référence de cette étude est celui d'une fouille circulaire, d'une profondeur de 10 mètres et d'un rayon de 2,5 mètres, excavée dans un milieu rocheux (Figure 1). Le choix du matériau rocheux permet de simplifier l'étude en ne considérant pas de soutènement des parois de la fouille.

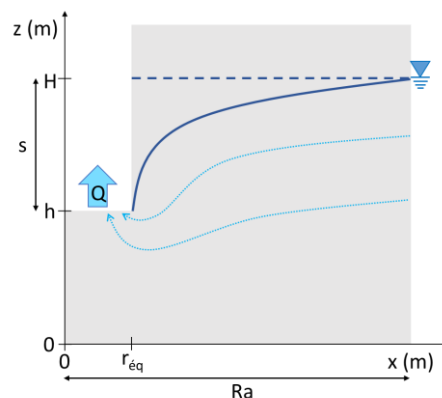


Figure 1. Schéma du cas d'étude.

### 2.2. Modèles analytiques

#### 2.2.1. Modèle de Dupuit

Le modèle analytique de Dupuit permet d'estimer le débit d'exhaure d'une fouille au contact d'une nappe libre. Elle s'applique à une nappe en régime permanent dont la surface piézométrique est horizontale. Ce modèle considère, selon le modèle du « puits parfait », une fouille d'épaisseur finie, au sein d'un milieu continu et isotrope semi-infini. En considérant la variation de hauteur d'eau entre le niveau initial de la nappe  $H$  et celle du niveau de la fouille  $h$ , la formule de Dupuit s'écrit :

$$Q_D = \frac{\pi K (H^2 - h^2)}{\ln R_a / r} = 2\pi K \cdot \frac{s}{\ln R_a / r} \cdot \frac{H+h}{2} \quad (1)$$

$Q_D$  est le débit d'exhaure de Dupuit,  $K$  est la perméabilité,  $H$  est le niveau initial de la fouille,  $h$  est le niveau de la fouille,  $R_a$  est le rayon d'action de la fouille et  $r_{eq}$  est le rayon équivalent de la fouille (Bourrier, 2018).

Le calcul du débit d'exhaure  $Q_D$  par de la formule de Dupuit nécessite de déterminer le rayon d'action  $R_a$  de la fouille. Le rayon d'action  $R_a$ , ou rayon d'influence, d'un puits ou d'une tranchée est défini comme étant la distance maximale jusqu'à laquelle l'ouvrage exerce une influence significative sur le niveau de la nappe (Bresciani et al., 2020). Cette notion de rayon d'action est, ordinairement, rattachée aux études en régime transitoire. Il peut être déterminé à partir de paramètres hydrodynamiques mesurés grâce à des essais de pompage sur le terrain mais, dans le cadre de cette étude, cette valeur a été estimée à partir de la formule empirique dite de Sichardt qui estime le rayon d'action de la fouille en fonction de la perméabilité du sol et du rabattement (Cashman et Preene, 2021) :

$$R_a = 3\,000 (H - h) \sqrt{K} = 3\,000 s \sqrt{K} \quad (2)$$

Une hypothèse de cette formule est l'existence d'une surface de suintement sur les abords de la fouille. La présence de cette surface de suintement participe à l'alimentation de la fouille. Cette formule repose sur l'hypothèse de Dupuit, qui considère que la composante verticale des vitesses de propagation de l'eau au sein d'un aquifère est négligée. Ainsi, les débits considérés dans cette formule sont seulement des débits horizontaux.

### 2.2.2. Modèle de Schneebeli

Le modèle analytique de Schneebeli permet d'estimer le débit d'exhaure au droit d'une fouille au contact d'une nappe libre, qui constituerait un aquifère homogène, isotrope dans un demi-espace infini. La fouille est assimilée à une demi-sphère. À partir de ces hypothèses, l'expression du débit d'exhaure est telle que :

$$Q_S = 2,5 K (H - h) \sqrt{S_f} = 2,5 K s \sqrt{S_f} \quad (3)$$

$Q_S$  est le débit d'exhaure de Schneebeli,  $K$  est la perméabilité,  $H$  est le niveau initial de la fouille,  $h$  est le niveau de la fouille et  $S_f$  est la surface mouillée de la fouille (Philipponnat et Hubert, 2008). Afin d'appliquer cette formule, il est nécessaire de déterminer la surface mouillée  $S_f$  de la fouille qui correspond à la surface de la fouille sous le niveau initial de la nappe. Soit, pour une fouille de rayon égal à 2,5 mètres, la surface mouillée considérée vaut, pour des rabattements respectifs de 2 m, 5 m et 10 m, 70,7 m<sup>2</sup>, 117,8 m<sup>2</sup> et 196,4 m<sup>2</sup>.

À la différence de la formule de Dupuit, Schneebeli considère que l'alimentation de la fouille se fait par le fond, par la surface mouillée  $S_f$ .

## 2.3. Modèle numérique

Une autre approche permettant d'obtenir les débits d'exhaure est la modélisation numérique aux éléments finis. Cette approche permet une estimation fine des débits mais nécessite une bonne maîtrise des données d'entrée. Un outil à disposition pour la résolution de ces problématiques est le logiciel SEEP/W de la suite Geostudio. Cet outil numérique permet d'analyser et de modéliser les écoulements souterrains à travers un milieu poreux. Les données d'entrée à définir dans ce logiciel sont reprises ci-après.

### 3. Paramètres à étudier / Méthodologie

L'analyse des données d'entrées à fournir pour l'utilisation des formules analytiques ou de la modélisation numérique met en évidence deux types de paramètres :

- Ceux liés à la géométrie du projet ( $r$ ,  $R_a$ ) ;
- Ceux liés à la nature des matériaux ( $K$ ) ou aux données de piézométries ( $s$  via  $H$ ).

Les paramètres liés à la perméabilité des matériaux sont susceptibles d'être moins bien connus que les premiers et il convient d'estimer le degré d'influence de ces paramètres sur le calcul de l'estimation des débits. Dans ce but, une étude paramétrique confrontant les formules analytiques de Dupuit et Schneebeli et un modèle numérique (SEEP/W) ont été menées sur les paramètres suivants : perméabilité et hauteur de rabattement. Pour rappel, la perméabilité  $K$  caractérise l'aptitude d'un sol à se laisser traverser par un fluide (ici l'eau) sous l'effet d'un gradient de pression ou de la gravité. Par souci de simplification, il est souvent considéré une valeur unique de perméabilité pour chaque horizon lithologique. Le cas d'étude a été basé sur des terrains présentant une plage de variation de la perméabilité comprise entre  $1.10^{-3}$  m/s et à  $1.10^{-7}$  m/s. Concernant l'influence de la valeur du rabattement sur les débits d'exhaure, 3 valeurs de rabattement ont été testées : 2 mètres, 5 mètres et 10 mètres.

Toutefois, afin d'étudier l'influence de ces paramètres, il était nécessaire de s'assurer, en amont, que les valeurs de débits d'exhaure ne sont pas fortement influencées par la géométrie du modèle numérique. Une étude paramétrique, réalisée exclusivement sur le modèle numérique, portant sur l'influence de la distance entre la fouille et le bord du modèle a donc été réalisée. Pour cette étude, quatre valeurs de distance entre la fouille et le bord du modèle ont été testées : une valeur issue du calcul du rayon d'action d'après la formule de Sichardt pour une perméabilité donnée, et les valeurs de 25 m, 250 m et 2 500 m. Ces trois valeurs ont été choisies à partir du rayon de la fouille.

Une dernière étude porte sur la notion d'anisotropie est présentée. Celle-ci ne porte également que sur les modèles numériques.

Concernant la modélisation numérique, afin d'obtenir des résultats comparables à ceux des calculs analytiques, les analyses sont conduites en configuration axisymétrique de manière à respecter les hypothèses d'application des formules de Dupuit et de Schneebeli : fouille circulaire au contact d'une nappe libre en régime permanent. Les contraintes sur la nappe (piézométrie connue et rabattement attendu) sont intégrées au modèle sous la forme de trois conditions aux limites :

- Une condition de drainage localisée sur le fond de la fouille ;
- Une condition de suintement, localisée sur les parois de la fouille. Cette condition a été ajoutée afin de pouvoir comparer plus facilement les données du modèle numérique aux modèles analytiques.
- Une condition de charge hydraulique imposée sur le bord du modèle. La charge hydraulique fixée varie en fonction de la valeur de rabattement étudiée.

La méthode des éléments finis possède une propriété essentielle qui est que, lorsque la taille des éléments tend vers zéro, le calcul donne, même s'il est plus coûteux en temps, un résultat qui converge vers la solution analytique (Champaney et Gendre, 2012). Une première partie du travail a donc consisté à réaliser une étude de sensibilité du maillage du modèle. Cette étude ne sera pas présentée dans cet article, mais elle a permis d'aboutir aux caractéristiques de modélisation suivantes :

- Maillage affiné avec des éléments de 0,025 m, au droit des zones où le gradient hydraulique est le plus fort, et de 2,5 m pour le reste du modèle.
- Maillage composé à la fois de quadrilatères et de triangles, à fonctions de forme linéaires.

## 4. Résultats de l'étude

### 4.1. Étude paramétrique – Influence de la distance au bord du modèle

Une première série de modélisations numériques a consisté à étudier l'influence de la distance entre la fouille et le bord du modèle sur les débits. Dans le cadre de cette étude, les débits sont calculés pour des modèles numériques d'extension horizontale équivalente aux valeurs suivantes : le rayon d'action calculé avec la formule de Sichardt (« modèle Ra »), 25 m, 250 m et 2 500 m. Ces débits sont calculés pour les trois valeurs de perméabilité étudiées.

Tableau 1 : Débits d'exhaure en fonction de la distance au bord du modèle numérique

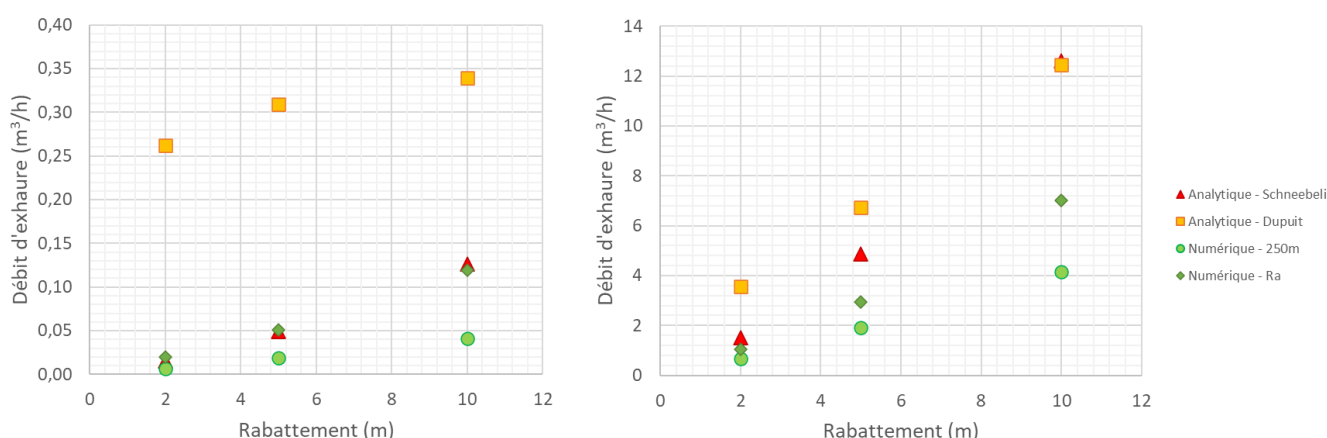
|                                       | K = $1.10^{-7}$ m/s |               |               |               | K = $1.10^{-5}$ m/s |     |     |      | K = $1.10^{-3}$ m/s |     |     |      |
|---------------------------------------|---------------------|---------------|---------------|---------------|---------------------|-----|-----|------|---------------------|-----|-----|------|
| Distance fouille - bord du modèle (m) | 4,7                 | 25            | 250           | 2500          | 47,4                | 25  | 250 | 2500 | 474                 | 25  | 250 | 2500 |
| Débits d'exhaure ( $m^3/h$ )          | $5,1.10^{-2}$       | $3,4.10^{-2}$ | $1,9.10^{-2}$ | $1,8.10^{-2}$ | 3,0                 | 3,4 | 1,9 | 1,8  | 213                 | 338 | 191 | 178  |
| Écart par rapport à la valeur Ra (%)  | -                   | 34            | 63            | 65            | -                   | 14  | 35  | 40   | -                   | 59  | 10  | 17   |

Ce tableau met en évidence que les valeurs de débits d'exhaure des modèles 25 m, 250 m et 2 500 m sont proportionnelles à la perméabilité et sont ainsi indépendantes des variations de ce paramètre. Cela n'est pas vérifié pour le modèle basé sur le rayon d'action, en raison sûrement de la formule empirique de Sichardt qui dépend de la perméabilité.

Deux géométries de modèle numérique seront conservées pour la seconde étude paramétrique ; la première dépend du rayon d'action de Sichardt et la seconde sera arbitrairement fixée à 250 m. Cela permettra de finaliser l'analyse de l'influence de ce paramètre sur le débit d'exhaure.

### 4.2. Étude paramétrique - Modèles à perméabilité isotrope

Il a été choisi de comparer les résultats des modèles analytiques (Dupuit et Schneebeli) au modèle numérique. Deux géométries ont été choisies pour le modèle numérique : une dont la distance au bord du modèle correspond au rayon d'action de la formule de Sichardt ; la seconde a été fixée arbitrairement à 250 m. La comparaison de ces deux modèles numériques avec les modèles analytiques permettra ainsi d'étudier l'influence du rayon d'action sur la modélisation numérique.



Figures 2 et 3 (de gauche à droite) : Débits d'exhaure en fonction du rabattement pour une perméabilité isotrope de  $1.10^{-7}$  m/s (à gauche) et  $1.10^{-5}$  m/s (à droite).

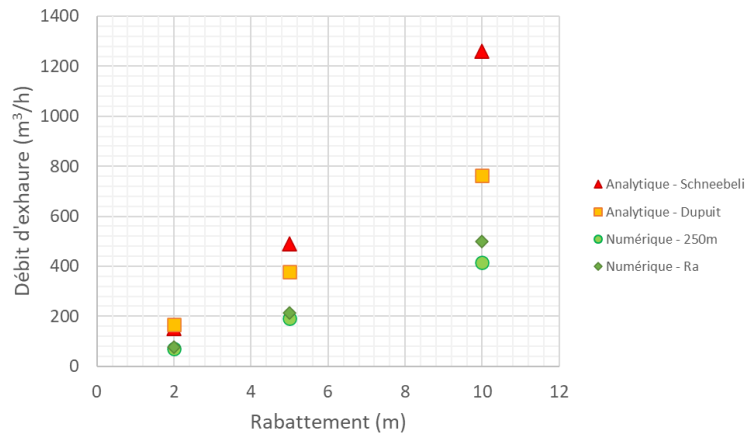


Figure 4 : Débits d'exhaure en fonction du rabattement pour une perméabilité isotrope de  $1.10^{-3}$  m/s.

Ces figures montrent que le débit d'exhaure déterminé à partir des modèles de Schneebeli et numériques augmente quasi-proportionnellement avec la perméabilité et le rabattement. Il est possible d'estimer rapidement, pour ces modèles, les variations de débits liées à ces paramètres. La relation de quasi-proportionnalité avec le rabattement n'est vérifiée, pour les valeurs de débits d'exhaure issues de la formule de Dupuit, que lorsque la perméabilité est élevée ( $1.10^{-3}$  m/s).

La comparaison des valeurs de débits d'exhaure entre les modèles analytiques de Dupuit et Schneebeli et les modèles numériques montre que :

- La formule de Dupuit aboutit globalement à des valeurs de débits plus élevées par rapport aux modèles numériques. Toutefois, les figures mettent en évidence que l'écart entre les valeurs de débits obtenues avec le modèle de Dupuit et celles des autres modèles se réduit quand la perméabilité augmente. En effet, pour une perméabilité élevée ( $1.10^{-3}$  m/s), c'est ce modèle qui fournit des valeurs de débits plus proches de celles des modèles numériques.
- Le modèle de Schneebeli donne des valeurs plus proches des modèles numériques lorsque la perméabilité est faible ( $1.10^{-7}$  m/s). Lorsqu'elle est égale à  $1.10^{-5}$  m/s, Schneebeli présente un écart avec les modèles numériques croissant avec le rabattement.

Cela impliquerait ainsi la recommandation suivante sur l'emploi des modèles analytiques dans l'estimation des débits d'exhaure : la formule de Schneebeli semble fournir des résultats cohérents pour les perméabilités faibles (inférieures à  $1.10^{-5}$  m/s) quand la formule de Dupuit serait appropriée pour le calcul de débit d'exhaure au sein de matériau perméables à très perméables (perméabilité supérieure à  $1.10^{-5}$  m/s).

De plus, ces figures mettent en évidence que la prise en compte d'un rayon d'action lors de la modélisation numérique impacte la valeur des débits d'exhaure pour perméabilités plus élevées. L'écart entre les deux modèles numériques est d'autant plus important quand la valeur de rabattement est élevée.

#### 4.3. Étude paramétrique – Anisotropie de perméabilité

Une étude paramétrique a été réalisée afin d'étudier plus particulièrement l'influence de l'anisotropie de perméabilité sur les valeurs des débits d'exhaure déterminées à l'aide de modèles numériques.

La perméabilité est une propriété intrinsèque du sol qui dépend des caractéristiques du milieu poreux (granulométrie, forme des grains, ...). C'est donc une propriété variable selon les directions, généralement horizontales et verticales. Le rapport de la perméabilité

horizontale  $K_h$  sur la perméabilité verticale  $K_v$  correspond au coefficient d'anisotropie de perméabilité. Les sols sédimentaires se présentent généralement sous la forme d'horizons stratifiés qui favorisent les écoulements horizontaux vis-à-vis des écoulements verticaux (Freeland, 2013, et Todd et Mays, 2005). Dans le cas de massif rocheux, le paramètre déterminant les directions de circulation préférentielles de l'eau est la fracturation du matériau. Ces paramètres influencent la circulation de l'eau dans les sols et les roches et donc les débits d'exhaure. Les modèles analytiques ne prennent pas en compte cette anisotropie : cela constitue leur limite majeure. L'effet de l'anisotropie est étudié à l'aide des modélisations par éléments finis. Dans le cadre de cette étude, différentes valeurs du coefficient d'anisotropie du massif de terrain ont été considérées dans une gamme comprise entre 1 et 10.

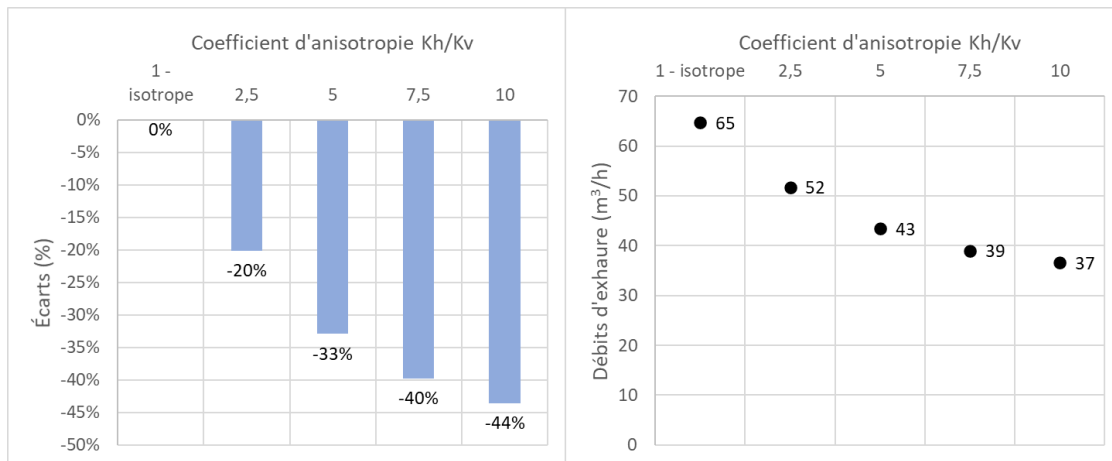


Figure 5. Débits d'exhaure et écarts relatifs de modèles à perméabilité anisotrope -  $K_h = 1.10^{-3} m/s$ .

Les résultats des modélisations mettent en évidence que le coefficient d'anisotropie de perméabilité est un paramètre qui exerce une influence majeure sur les valeurs de débits d'exhaure. Les écarts entre les modèles étudiés et le cas isotrope sont, en effet, compris de -20% à -44% pour la gamme de coefficient d'anisotropie étudiée, et pour une perméabilité horizontale fixée à  $1.10^{-3} m/s$ . Toutefois, la différence entre les écarts des modèles de coefficient  $K_h/K_v$  égaux à 7,5 et 10 est seulement de 4%. Cela met en évidence que plus le coefficient d'anisotropie de perméabilité augmente plus les valeurs de débit d'exhaure convergent vers une valeur unique de débit. Par ailleurs, il est possible de constater que la prise en compte d'un coefficient d'anisotropie de perméabilité erroné ou trop éloigné du cas étudié pourrait conduire à une surestimation des débits d'exhaure. Considérer un modèle isotrope en perméabilité est donc un choix sécuritaire en termes de valeurs de débits mais qui est de nature à impliquer des surcoûts du fait de choix des solutions techniques surdimensionnées pour les dispositifs d'exhaure à mettre en place pour le rabattement de la nappe.

## 5. Conclusions

Dans le cadre de cet article, le cas simple d'une fouille circulaire réalisée dans un massif rocheux a été utilisé afin d'estimer les débits d'exhaure, issus du rabattement d'une nappe libre en régime permanent, suivant des méthodes analytiques et numériques.

L'utilisation des méthodes analytique ou empirique a consisté à concentrer l'étude autour de deux formules : la formule de Dupuit et celle de Schneebeli. La méthode numérique aux éléments finis a ainsi permis de vérifier le domaine de validité de ces formules en étudiant les valeurs de débits d'exhaure. Des études paramétriques ont été

réalisées afin d'appréhender l'influence des paramètres de distance entre la fouille et le bord du modèle, de hauteur initiale de la nappe, et donc de la valeur du rabattement, de la perméabilité des roches et du coefficient d'anisotropie de perméabilité.

La comparaison des méthodes numériques et analytiques a ainsi pu permettre de mettre en évidence que, pour le cas étudié et prenant le modèle numérique isotrope comme référence, l'utilisation du modèle de Dupuit induit une surestimation des débits d'exhaure. Le modèle de Schneebeli donne des valeurs de débits d'exhaure plus proche des modèles numériques dont la distance fouille – bord du modèle est fixée à 250 m et ceux pour lesquels cette distance correspond au rayon d'action calculé à l'aide de la formule de Sichardt. Toutefois, l'écart entre le modèle de Dupuit et les autres modèles se réduit pour les perméabilités élevées permettant de formuler des recommandations sur le choix du modèle analytique de calcul des débits. Ainsi, pour les matériaux peu à très peu perméables (perméabilités inférieures à  $1.10^{-5}$  m/s), Schneebeli donnera une meilleure estimation des débits quand Dupuit sera plus approprié pour les matériaux perméables à très perméables (perméabilités supérieures à  $1.10^{-5}$  m/s).

Les études paramétriques ont permis de conclure sur l'influence des différents paramètres testés. Concernant la distance entre la fouille et le bord du modèle, la configuration axisymétrique n'est pas dépendante de ce paramètre. Par ailleurs, l'évolution des débits à différentes perméabilités devient prévisible étant donné que les débits augmentent de manière quasiment proportionnelle avec ce paramètre de nature du matériau. De plus, la hauteur de la nappe est un élément qui conditionne le débit d'exhaure du fait de leur relation quasiment proportionnelle et qu'il est nécessaire, en phase chantier de déterminer avec précision. Enfin, le paramètre d'anisotropie de perméabilité du massif rocheux n'est pas pris en compte dans les modèles analytiques. Ces modèles fournissent alors des valeurs de débits d'exhaure surestimées. Ainsi, dans une optique d'optimisation des ouvrages hydrauliques à mettre en place pour la réalisation d'un rabattement de nappe, il serait nécessaire de tenir compte de ce paramètre.

## 6. Références bibliographiques

- Bourrier R. (2018). Débitance d'un puit captant. Hydraulique appliquée – Milieux, écoulements, aménagements. Groupe Moniteur. pp. 1093.
- Bresciani E., Shandilya R. N., Kang P. K., Lee S. (2020). Well radius of influence and radius of investigation : What exactly are they and how to estimate them ?, Journal of Hydrology, vol. 583, pp. 17.
- Cashman P.M., Preene M. (2021). Groundwater Lowering in Construction – A practical guide to dewatering. CRC Press. 3<sup>rd</sup> ed. pp. 47.
- Champaney L., Gendre L. (2012). Raffinement du maillage et convergence. E. N. Paris-Saclay. 7 pages.
- Freeland J. (2013). Soil anisotropy : Mechanisms and Hydrologic Consequences. AGU Advancing Earth and Space Science.
- Todd D., Mays L. (2005). Groundwater Hydrology. John Wiley and Sons, Inc. 3<sup>rd</sup> ed. pp. 92 – 103.
- Philipponnat G., Hubert B. (2008). Propriétés hydrauliques des sols. Fondations et ouvrages en terre. Éditions Eyrolles. pp. 37 – 71.