

L'EFFET BARRAGE : MYTHE OU REALITE ?

DAM EFFECT : MYTH OR REALITY ?

Lionel DEMONGODIN¹, Sébastien FLORIAT¹

¹ Egis Géotechnique – Le Carat, Lyon, France

RÉSUMÉ – Tout projet comportant une composante souterraine est susceptible de générer un effet barrage sur les écoulements de la nappe. Mais qu'est-ce que l'effet barrage ? Quelles sont ses conséquences ? Et comment évaluer le risque pour un projet ? Présentation de cette interaction nappe-structure et de quelques réflexes à mettre en œuvre dès le lancement d'un projet pour mieux cerner les risques et les enjeux.

ABSTRACT – Each project with an underground component is likely to generate a dam effect on the flows of the aquifer. But what is the dam effect ? What are its consequences ? And how to evaluate the risk for a project ? Presentation of this aquifer-structure interaction and some reflexes to implement from the start of a project to better identify risks and issues.

1. Introduction

Auparavant plutôt considérée comme un facteur de risque et pris en compte à l'aide de coefficients de sécurité, la présence d'une nappe fait l'objet depuis une vingtaine d'années d'études techniques spécifiques.

Dès lors qu'un projet contient une composante souterraine (tunnel, parking souterrain, trémie...), les maîtres d'ouvrage ou les maîtres d'œuvre s'interrogent sur un éventuel effet barrage de leur projet sur la nappe. Cette inquiétude est liée en premier lieu à la sensibilité de l'Administration sur un sujet, l'hydrogéologie, mieux connu et mieux quantifié depuis quelques décennies par les bureaux d'études, à travers les études d'impact. Mais aussi et surtout aux enjeux qui peuvent être importants ; si un effet barrage est généré, les coûts occasionnés peuvent être significatifs, voire rédhibitoires pour le projet.

Il est donc important de disposer d'une estimation fiable de cet effet pour connaître et maîtriser ce risque. Tous les projets ne sont pas de nature à générer un effet barrage significatif. Mais alors, l'effet barrage est-il un mythe ou une réalité ?

2. Qu'est-ce que l'effet barrage ?

2.1. Principe de l'effet barrage

Le phénomène d'effet barrage est généré par un obstacle aux écoulements souterrains. Il se traduit par une remontée de la nappe à l'amont de cet obstacle et par une baisse de niveau à l'aval.

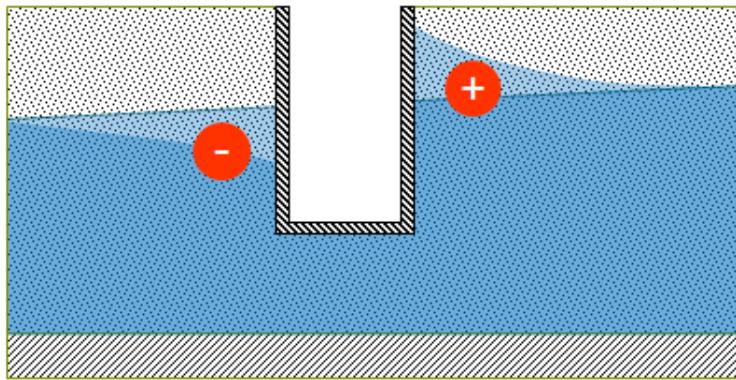


Figure 1. Conséquences de l'effet barrage généré par un obstacle souterrain

Deux grandeurs sont caractéristiques de l'effet barrage :

- d'une part, l'amplitude : elle correspond à l'écart à la piézométrie initiale ;
- d'autre part, la portée : elle correspond à la distance de l'isovaleur (par exemple $\pm 0,1$ m) ou iso-impact par rapport à l'obstacle, dans un plan horizontal. Elle permet donc de définir la zone d'influence hydrogéologique (ZIH) par analogie avec la zone d'influence géotechnique (ZIG).

Les risques liés à cet effet sont différents selon la position par rapport à l'obstacle. A l'amont, les risques concernent un débordement de nappe, des inondations de caves, parkings, réseaux enterrés. A l'aval, la baisse du niveau de la nappe peut conduire à des tassements (selon la compressibilité des matériaux), qui peuvent eux-mêmes générer des désordres aux avoisinants.

2.2. Facteurs dimensionnans

Il faut introduire ici la notion de débit « gêné » qui correspond aux lignes de courant de la nappe qui rencontreront l'obstacle (le projet).

Ce débit « gêné » est fonction :

- de la géologie : la perméabilité et l'épaisseur des couches (différents matériaux) ;
- de la longueur de coupure (L_c) qui est fonction de la géométrie de l'ouvrage (longueur, largeur) et de l'angle d'incidence (α), définis sur la Figure 2 ;

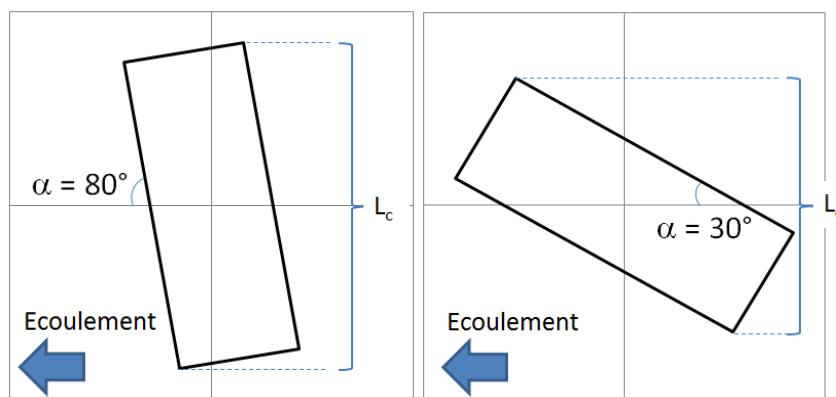


Figure 2. Définition de la longueur de coupure

- de la hauteur de coupure h_c :

$$h_c = \frac{\text{hauteur de nappe interceptée}}{\text{épaisseur totale de la nappe}} \quad (1)$$

- du gradient hydraulique, généralement de l'ordre de quelques % à quelques % au maximum.

2.3. Typologie des ouvrages souterrains

Il existe plusieurs types d'ouvrages souterrains, selon leur forme. On peut ainsi distinguer 3 grandes familles d'ouvrages :

- les enceintes étanches, telles que les parkings souterrains, les gares de métro, etc. : leur rapport de forme (longueur / largeur) est généralement faible ($L/I < 5$) ;
- les tranchées et trémies : leur rapport de forme est élevé ($L/I > 10$) ; ce sont potentiellement les plus impactants en terme d'effet barrage ;
- les tunnels : leur rapport de forme est très élevé ($L/I \gg 10$) mais leur hauteur de coupure est limitée avec un diamètre d'ouvrage généralement compris entre 8 et 12 m.

La forme de l'ouvrage n'est pas le seul paramètre dimensionnant, comme indiqué précédemment. Mais elle permet en première approche une première caractérisation du risque.

2.4. Méthodes et moyens de calculs

Il n'existe pas de solution analytique pour quantifier l'effet barrage d'un ouvrage souterrain. Il est donc nécessaire de recourir à une modélisation numérique 3D, seule méthode permettant :

- une représentation précise et fidèle de la géométrie de l'ouvrage ;
- une analyse de la sensibilité aux conditions aux limites ;
- la fourniture de sortants tels que la charge et le champ de vitesse, principalement.

Les évolutions technologiques réalisées depuis 20 à 25 ans sur les différents outils de modélisation disponibles permettent aux hydrogéologues de disposer aujourd'hui d'outils aptes à répondre de manière fiable aux interrogations liées à cette thématique.

3. Quelques cas types

3.1. Cas d'un modèle stratiforme

Ce premier cas concerne un modèle stratiforme, c'est-à-dire avec des couches horizontales d'épaisseur constante. Ce cas se rencontre notamment en région parisienne.

L'exemple considère les hypothèses suivantes :

- un gradient hydraulique de 3‰ ;
- un ouvrage de 60 m de longueur, 40 m de largeur et 50 m de hauteur ;
- un angle d'incidence α de 70° (écoulement oblique) ;
- un contexte géologique de type multicouche avec les épaisseurs et les perméabilités définies sur la Figure 3 ;
- un niveau de nappe défini sur la Figure 3.

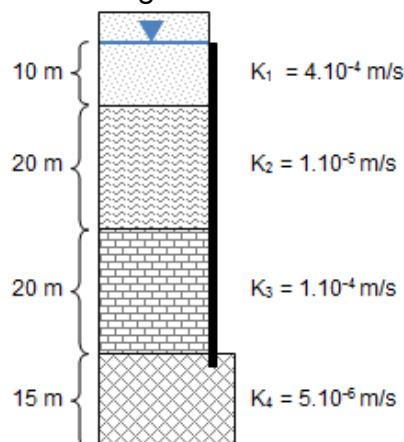


Figure 3. Contexte géologique du cas-type 1

L'effet barrage de cet ouvrage sur la nappe est quasi nul. L'isovaleur $\pm 0,05$ m est située à 30 m de l'ouvrage et l'impact maximal de $\pm 0,1$ m est localisé au contact des murs d'enceinte, comme indiqué sur la Figure 4.

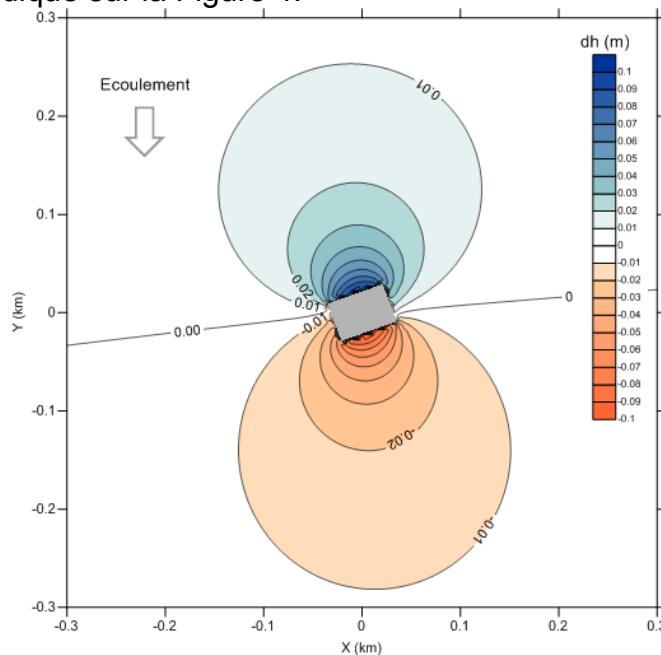


Figure 4. Effet barrage du cas-type 1

Ce premier exemple permet de visualiser la remontée du niveau de la nappe à l'amont (ici au Nord de l'ouvrage) et la baisse à l'aval (au Sud).

Ce résultat est peu sensible aux valeurs de perméabilité puisque les résultats sont proches pour des perméabilités multipliées ou divisées par 10.

Malgré un angle d'incidence proche de 90° (cas le plus défavorable), une hauteur de coupure de 50 m et une longueur de coupure de plus de 60 m, l'effet barrage est quasiment nul. Ce résultat repose en grande partie sur l'absence de contraste de perméabilités marqué entre les différents horizons traversés par le projet.

3.2. Cas d'un contexte alluvionnaire

Ce deuxième cas concerne un contexte alluvionnaire, c'est-à-dire un horizon très perméable (alluvions) sur un substratum beaucoup moins perméable. Ce contexte est rencontré à Lyon, dans la nappe alluviale du Rhône, mais aussi de manière similaire à Bordeaux ou Toulouse notamment.

L'exemple considère les hypothèses suivantes :

- un gradient hydraulique de 2,5% ;
- un ouvrage de 800 m de longueur, 40 m de largeur et 22 m de hauteur ;
- un angle d'incidence α de 90° (écoulement perpendiculaire à l'ouvrage) ;
- un contexte géologique de type bi-couches avec les épaisseurs et les perméabilités définies sur la Figure 5 ;
- un niveau de nappe défini sur la Figure 5.

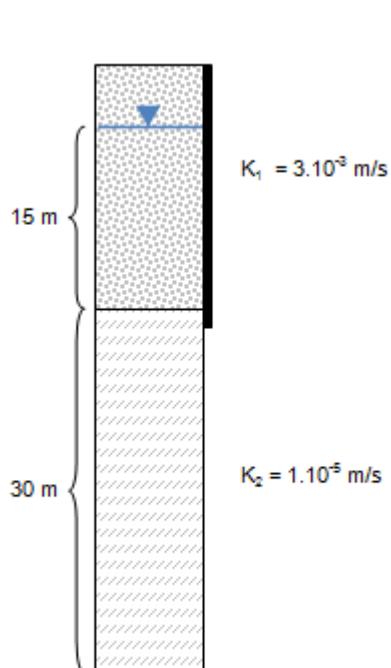


Figure 5. Contexte géologique du cas-type 2

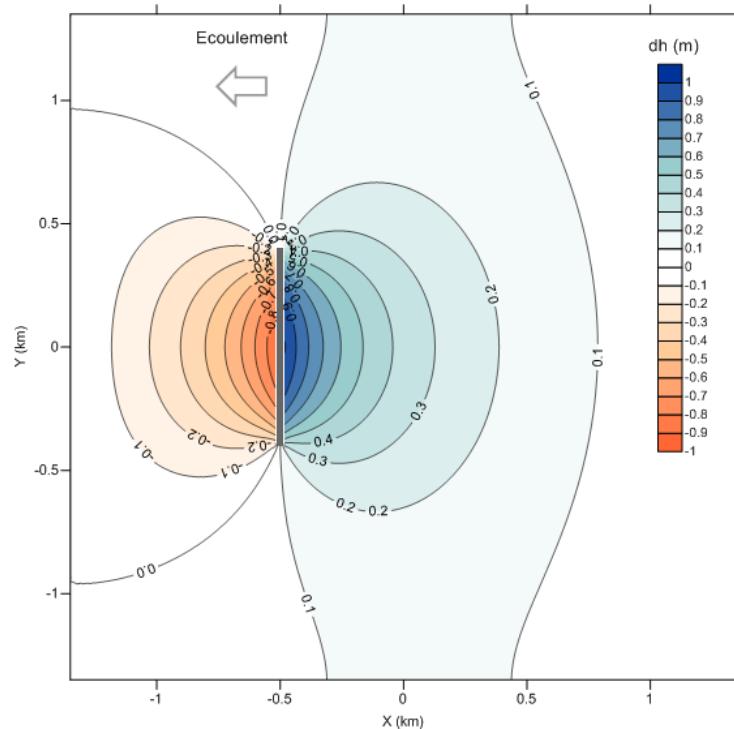


Figure 6. Effet barrage du cas-type 2

L'effet barrage de cet ouvrage sur la nappe est modéré. L'isovaleur $\pm 0,10$ m est située à 1270 m à l'amont de l'ouvrage et l'isovaleur $\pm 0,50$ m à 320 m à l'amont. L'impact maximal est de ± 1.0 m au contact des murs d'enceinte, comme indiqué sur la Figure 6.

L'effet peut être qualifié de modéré au regard de la longueur de coupure (800 m) et de l'angle d'incidence (90°) qui sont deux facteurs très défavorables. L'impact est bien présent puisque les écoulements dans les alluvions ne peuvent pas passer sous l'ouvrage du fait de la perméabilité beaucoup plus faible du substratum. Mais la forte perméabilité des alluvions permet une réorganisation latérale des écoulements qui limite l'effet barrage.

Ce résultat est sensible à la perméabilité des alluvions mais aussi à celle du substratum qui, si elle augmente, va faire diminuer l'effet barrage. C'est donc le contraste de perméabilités marqué entre les deux horizons traversés par le projet qui est la source de cet effet barrage.

3.3. Cas d'un complexe alluvionnaire avec paléochenaux

Ce troisième cas concerne un complexe alluvionnaire présentant des paléochenaux, c'est-à-dire des veines très perméables. Ce cas est notamment rencontré dans la vallée du Paillon, à Nice.

L'exemple considère les hypothèses suivantes :

- un paléochenal de largeur A, de hauteur B et de perméabilité K_1 ;
- un gradient hydraulique de 2% ;
- un ouvrage de longueur $L > A$ et de hauteur $h > B$;
- un contexte géologique et hydrogéologique défini sur la Figure 7, et marqué par une perméabilité de l'encaissant $K_2 \ll K_1$.

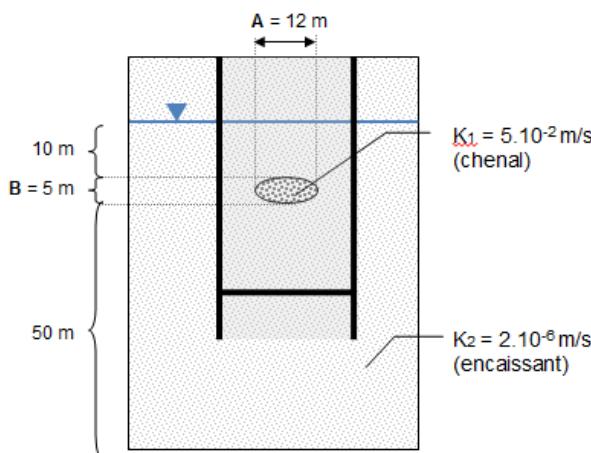


Figure 7. Contexte géologique du cas-type 3

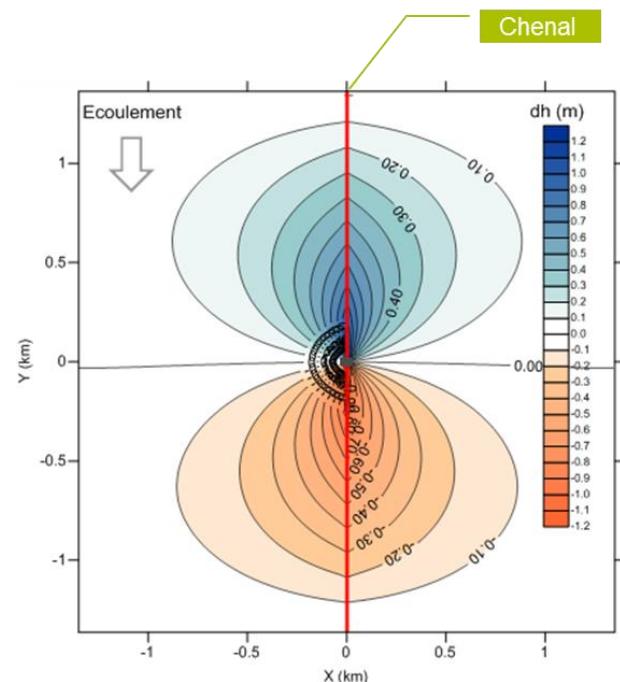


Figure 8. Effet barrage du cas-type 3

L'effet barrage est ici significatif. L'isovaleur $\pm 0,10$ m est située à 1200 m de l'ouvrage et l'isovaleur $\pm 0,50$ m à 680 m de l'ouvrage. L'impact maximal est de $\pm 1,2$ m au contact des murs d'enceinte, comme indiqué sur la Figure 8.

Comme pour le deuxième exemple, l'effet barrage de ce cas-type est essentiellement dû au contraste de perméabilité très marqué entre l'encaissant et le paléochenal. Malgré des dimensions réduites de l'ouvrage, l'obstruction d'un paléochenal est de nature à générer un impact significatif.

3.4. Cas d'un thalweg alluvionnaire dans un substratum peu perméable

Ce quatrième cas concerne un milieu caractérisé par un substratum peu perméable entaillé par un talweg alluvionnaire. Ce cas s'applique aussi à des talwegs non alluvionnaires, à condition que la perméabilité de ce talweg soit largement supérieure à celle de l'encaissant (substratum).

L'exemple considère les hypothèses suivantes :

- un talweg de largeur A, de hauteur B et de perméabilité K₁ ;
- un ouvrage de longueur L > A, de hauteur h > B ;
- un contexte géologique et hydrogéologique défini sur la Figure 9, mais marqué par une perméabilité de l'encaissant K₂ << K₁.

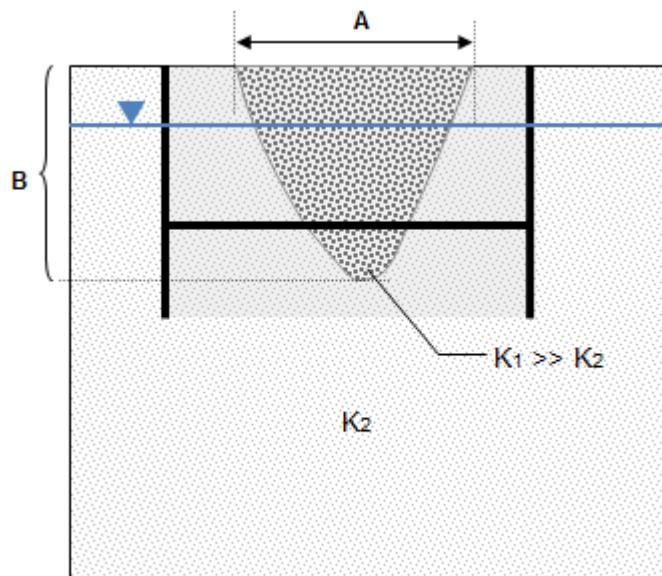


Figure 9. Contexte géologique du cas-type 4

L'effet barrage de ce cas-type conduit au débordement de la nappe à l'amont de l'ouvrage, quelle que soit la configuration. A partir du moment où l'ouvrage bloque les écoulements dans ce talweg perméable, et que l'encaissant est beaucoup moins perméable que le talweg, la nappe n'a pas d'autre issue que le débordement.

Comme pour le troisième cas-type, malgré des dimensions d'ouvrage (parfois) réduites, l'obstruction d'un talweg perméable est de nature à générer un impact significatif

4. Evaluation du risque

Avant même de réaliser l'étude et la modélisation permettant de calculer cet effet barrage, il est opportun de s'interroger, dès le lancement d'un projet ayant une composante souterraine, sur le risque d'effet barrage.

Ce risque doit être contextualisé en fonction :

- de la nature des terrains, notamment leur compressibilité ;
- de la sensibilité des avoisinants au tassement ;
- de la profondeur de la nappe : le risque d'inondation est potentiellement accru pour une nappe sub-affleurante ;
- de la proximité d'enjeux (zone humide, espaces souterrains...).

Lorsqu'un effet barrage est suspecté, il convient de mettre en place un suivi piézométrique précis et resserré dans la zone d'influence hydrogéologique (ZIH) présumée. Ce suivi doit être engagé avant le démarrage des travaux, afin de définir l'état de référence, et poursuivi en phase travaux et exploitation.

5. Conclusions

A la lumière des cas-types présentés précédemment, il apparaît que l'effet barrage dépend d'abord du contexte géologique et hydrogéologique, mais aussi des caractéristiques de l'ouvrage.

Les situations à risque sont rares et souvent liées à l'hétérogénéité de perméabilités des terrains, comme le montrent les cas types 3 (paléo-chenal) et 4 (talweg alluvionnaire), et, dans une moindre mesure, le cas-type 2 (contexte alluvionnaire).

Une attention particulière doit également être portée au cas des ouvrages de grande longueur, principalement les tranchées ou les trémies qui sont les ouvrages les plus impactants du fait de leur hauteur de coupure importante combinée à une longueur de coupure significative. Au contraire, les tunnels, malgré un rapport de forme très élevé,

présentent généralement un effet barrage limité, voire très limité, du fait de leur faible hauteur de coupure (diamètre des tunnels en général compris entre 8 et 12 m).

En conclusion, l'effet barrage est plus souvent un mythe qu'une réalité. Bien des cas pourraient faire l'économie d'études spécifiques. Une analyse rapide par un hydrogéologue expérimenté au lancement du projet peut suffire à évaluer le risque et décider des suites à donner : mise en place d'un suivi piézométrique, proposition de solutions de transparence hydraulique, etc.

L'approche numérique permet néanmoins d'apporter des informations utiles telles que les vitesses d'écoulement ou les niveaux d'eau, qui sont également à prendre en compte pour les calculs de stabilité pour la partie géotechnique du projet.