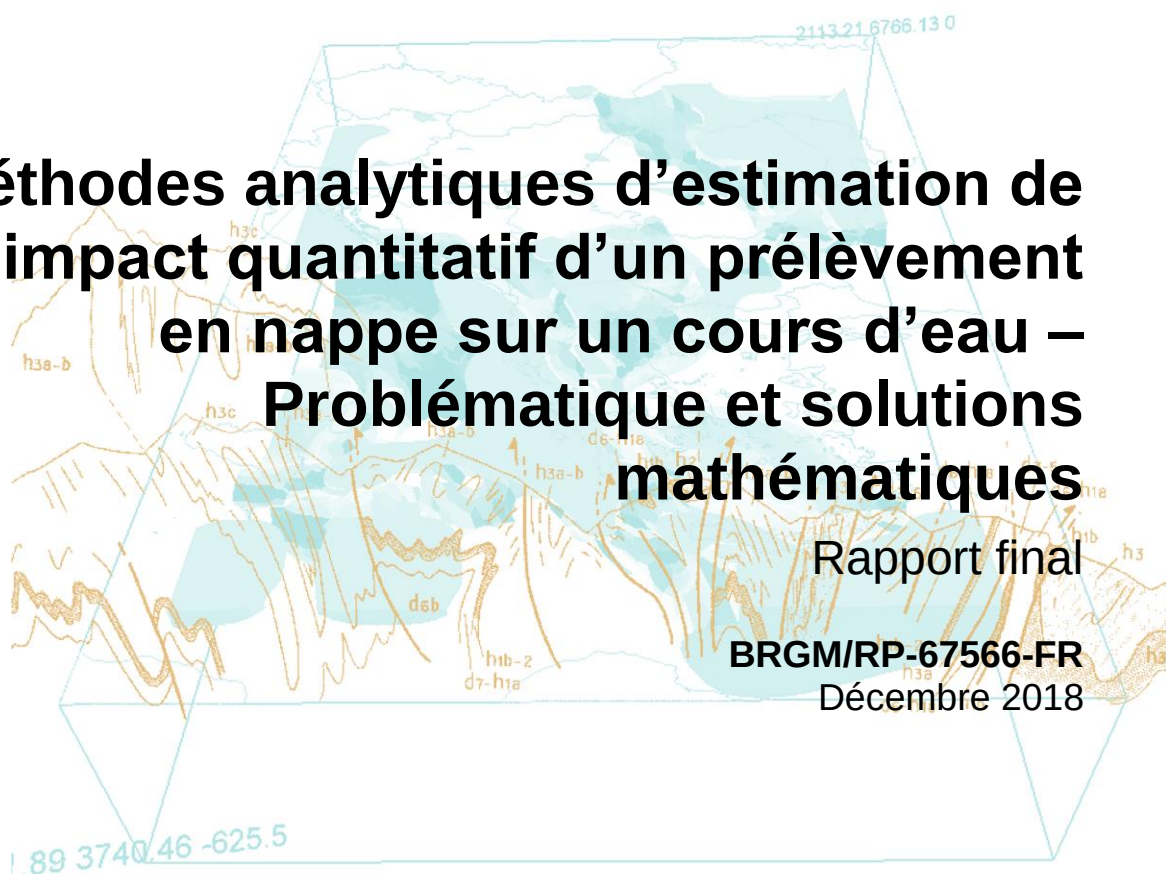




Méthodes analytiques d'estimation de l'impact quantitatif d'un prélèvement en nappe sur un cours d'eau – Problématique et solutions mathématiques

Rapport final

BRGM/RP-67566-FR
Décembre 2018



Méthodes analytiques d'estimation de l'impact quantitatif d'un prélèvement en nappe sur un cours d'eau – Problématique et solutions mathématiques

Rapport final

BRGM/RP-67566-FR

Décembre 2018

Étude réalisée dans le cadre de la convention AFB-BRGM 2016-2018

Benoît Dewandel

Vérificateur :

Nom : D. Thiéry

Fonction : Hydrogéologue -
Modélisateur

Date : 23/10/2017

Signature :



Approbateur :

Nom : JC Maréchal

Fonction : Resp. Unité D3E/NRE

Date : 26/01/2018

Signature :



Le système de management de la qualité et de l'environnement
est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

RESUME

La compréhension et la gestion de l'impact de pompages dans les eaux souterraines sur un cours d'eau (ou un système d'eaux de surface) est un défi majeur pour la réglementation et pour la gestion de la ressource en eaux. Dans cette optique, le BRGM s'est proposé, dans le cadre de sa convention avec l'AFB, de faire un état de l'art des solutions mathématiques disponibles pouvant être utilisées afin d'évaluer l'impact en terme de débit sur un cours d'eau d'un pompage dans un aquifère voisin.

Ce document rappelle les processus fondamentaux et les facteurs influant sur le temps, le taux et les lieux de l'impact d'un pompage dans un aquifère sur un cours d'eau voisin, ou au sens large sur n'importe quel système d'eaux de surface. Il regroupe et détaille les courbes types de rabattement et d'impacts en terme de débit de vingt solutions analytiques établies pour des configurations géologiques et de géométrie du cours d'eau différentes, dont quatre sont proposées par l'auteur de ce rapport. Elles vont du cas simple où le cours d'eau incise complètement l'aquifère, aux cas complexes où un cours d'eau, situé sur un aquitard de surface, passe au-dessus d'un aquifère rectangulaire pompé (aquifère fermé), ou au cas où le forage est incliné et passe sous le cours d'eau.

Les courbes types de ces modèles, et notamment celles des dérivées des rabattements, sont discutées afin d'identifier les principaux régimes d'écoulement pouvant renseigner sur la géométrie des aquifères et sur les relations nappe-cours d'eau. D'un modèle à l'autre, il est montré que les réponses en terme de débit soustrait sont très différentes, ce qui rend inévitable dans un souci de justesse de l'estimation des flux de bien cibler le type d'aquifère en présence et les modalités d'échanges nappe-rivière. Le diagnostic de l'essai, basé sur l'analyse de la dérivée des rabattements des données expérimentales, permet par comparaison aux courbes proposées d'identifier le modèle le plus approprié, et donc de faire les estimations de flux les plus précises possibles.

Ces solutions permettront à l'hydrogéologue praticien de se familiariser avec les problèmes d'échanges « rivière-nappe » au cours d'un pompage et de mettre à sa disposition une série de solutions adaptées permettant un calcul des débits soustraits à la rivière ou de façon plus générale aux eaux de surface. Ces solutions pourront être utilisées dans le cadre d'études d'incidence liées aux demandes de déclaration ou d'autorisation de prélèvements relatives aux rubriques 1.2.1.0. ou 1.3.1.0. de la nomenclature eau R214-1 du Code de l'Environnement.

Mots-clés : pompage, impact cours d'eau, solution analytique

Couverture géographique : aucune

Niveau de lecture : chercheur, ingénieur, étudiant.

CORRESPONDANT AFB : Benjamin LOPEZ

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Dewandel B. (2018) – Méthodes analytiques d'estimation de l'impact quantitatif d'un prélèvement en nappe sur un cours d'eau – Problématique et solutions mathématiques. Rapport final. BRGM/RP-67566-FR, 107 p., 45 fig., 2 tabl., 1 ann.

ABSTRACT

The understanding and managing the impact of groundwater pumping on a stream (or a surface water system) is a major challenge for regulating and managing water resources. With this objective, the BRGM proposed, within the framework of its agreement with AFB (French Agency for Biodiversity), to make a state of the art of the available mathematical solutions that can be used for evaluating the impact in terms of flow on a stream of a pumping in a nearby aquifer.

This document reminds the fundamental processes and the factors affecting the time, rate and locations of the impact of pumping into an aquifer on a nearby stream, or broadly speaking, on any surface waters system. It gathers and details the typical drawdown curves and impacts in terms of flow of twenty analytical solutions established for various geological configurations and stream geometries, from which four are new solutions proposed by the author of this report. They begin from the simple case where the stream completely incises the aquifer, to the complex cases where a stream, located in a surface aquitard, flow over a rectangular and pumped aquifer (closed aquifer), or where the pumping well is inclined and drilled under the stream bed.

The type curves of these models, and in particular those of the drawdown derivatives, are discussed in order to identify the main flow regimes, which can provide information on the geometry of the aquifers, and on the relationships between the aquifer and the stream. From one model to another, it is shown that the responses in terms of impact on the stream are very different, which makes it inevitable, in the interest of the accuracy of the estimated impact, to identify the type of aquifer and the relationship aquifer/stream. The diagnosis of the test, based on the analysis of the drawdown derivative of experimental data, makes possible, by comparison with the proposed curves, to identify the most appropriate model, and thus to compute the most accurate stream flow depletion estimates possible.

These solutions will enable the practicing hydrogeologists to become familiar with the "river-groundwater" exchange problems during a pumping. The series of adapted solutions allows a calculation of the flow withdrawn from the river or, more generally, to surface waters. These solutions can be used in the context of impact studies concerning the pumping of wells near surface water system.

Keywords : pumping tests, stream flow depletion by wells, analytical solutions.

Synthèse pour l'action opérationnelle

La compréhension et la gestion de l'impact de pompages dans les eaux souterraines sur un cours d'eau (ou un système d'eaux de surface) est un défi majeur pour la réglementation et pour la gestion de la ressource en eaux. Dans cette optique, le BRGM s'est proposé, dans le cadre de sa convention avec l'AFB, de faire un état de l'art des solutions mathématiques disponibles pouvant être utilisées afin d'évaluer l'impact en terme de débit sur un cours d'eau d'un pompage dans un aquifère voisin.

De façon générale, le pompage des eaux souterraines à proximité d'un cours d'eau constitue un manque à gagner pour le cours d'eau, soit en réduisant la quantité d'eau souterraine qui s'écoule vers celui-ci, soit directement en infiltrant l'eau du cours d'eau vers l'aquifère. Dans certains cas, il peut même entraîner un assèchement total du cours d'eau. Ainsi tout prélèvement dans un aquifère connecté à un système d'eaux de surface constitue, la plupart du temps, un préjudice pour ce dernier qu'il convient d'estimer le plus précisément possible.

Ce document rappelle les processus fondamentaux et les facteurs influant sur le temps, le taux et les lieux de l'impact d'un pompage dans un aquifère sur un cours d'eau voisin, ou au sens large sur n'importe quel système d'eaux de surface. Il regroupe et détaille les courbes types de rabattement et d'impacts en terme de débit de vingt solutions analytiques établies pour des configurations géologiques et de géométries du cours d'eau ou du forage différentes. Quatre sont de nouvelles solutions proposées par l'auteur de ce rapport. Elles vont du cas simple où le cours d'eau incise complètement l'aquifère, aux cas complexes où un cours d'eau, situé sur un aquitard de surface, passe au-dessus d'un aquifère rectangulaire pompé (aquifère fermé), ou au cas où le forage est incliné et passe sous le lit du cours d'eau.

Il est montré que la configuration géologique, les propriétés hydrodynamiques des aquifères, la position du forage, le degré d'incision du cours d'eau ou la présence de berges colmatées, jouent un rôle important sur la façon dont le cours d'eau est impacté par le pompage. Même dans le cas d'aquifères multicouches où des niveaux aquifères confinés sont pompés sous d'épaisses formations géologiques peu perméables sur lesquelles les cours d'eau serpentent, l'impact sur les cours d'eau existe bien, même s'il est fortement ralenti.

Les courbes types des modèles proposés, et notamment celles des dérivées des rabattements, sont discutées afin d'identifier les principaux régimes d'écoulement pouvant renseigner sur la géométrie des aquifères, et sur les relations nappe-cours d'eau. D'un modèle à l'autre, il est montré que les réponses en terme de débit soustrait sont très différentes, ce qui rend inévitable dans un souci de justesse de l'estimation des flux de bien cibler le type d'aquifère en présence et les modalités d'échanges nappe-rivière.

Les réponses en terme d'impact étant très différentes d'un modèle à l'autre, le choix du modèle est donc primordial afin d'évaluer correctement l'impact sur les systèmes de surface. Jusqu'à présent seules les solutions destinées à quantifier l'impact du pompage sur le système des eaux de surface étaient utilisées, sans qu'il n'y ait réellement d'analyse de comportement hydrodynamique et donc du type d'aquifère en présence. Or, les techniques modernes de diagnostic des essais par pompage, basées sur la dérivée des rabattements sont susceptibles de renseigner non seulement sur la structure et les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère pompé (homogène, anisotropie de perméabilité, multicouche, effet de limites, etc.), mais aussi, de mettre en évidence les modalités d'échange « nappe-rivière » (colmatage des berges, cours d'eau de faible incision ou non, etc.). Les courbes types proposées dans ce document présentent les modalités de comportements hydrodynamiques de chacun des modèles qui comparées aux

données expérimentales de terrain permettront de réaliser un diagnostic aussi précis que possible visant à identifier la solution mathématique la plus appropriée pour modéliser les rabattements et donc de faire les estimations d'impact sur le cours d'eau les plus précises possibles.

Malgré que dans l'absolu il soit préférable de modéliser conjointement les observations de rabattement et les mesures de flux des eaux de surface, bien souvent ces dernières sont absentes ou difficiles à réaliser. Néanmoins, le diagnostic de l'essai et le choix de la solution mathématique adéquate, eu égard à sa validation par d'autres données de terrain (géologie, géométrie de cours d'eau, etc.), permettra d'une part la modélisation des rabattements mais aussi, toujours par modélisation, d'évaluer a minima les ordres de grandeur de l'impact du pompage sur le cours d'eau avec un modèle réaliste.

Au niveau de grands bassins versants où sont présents de nombreux forages d'exploitation, l'utilisation de modèles numériques maillés s'avère souvent plus avantageuse car ils permettent de prendre en compte des aspects plus complexes de la réalité que ne le peuvent les solutions analytiques : géométrie des cours d'eau, géométrie des aquifères, occupation des sols, modalités de recharge des aquifères, etc., et d'évaluer les phénomènes de transport de polluants. Toutefois, l'utilisation de solutions analytiques sur ces secteurs reste primordiale car d'une part elle permet de caractériser les propriétés des aquifères et les modalités des échanges nappe-rivière qui alimenteront par la suite la modélisation numérique, et d'autre part, car ces solutions peuvent servir à réaliser une première estimation de ces impacts. A plus petite échelle, au niveau d'un captage ou d'un champ captant, les données sont la plupart du temps insuffisantes pour permettre l'élaboration d'un modèle numérique maillé, laissant alors place aux solutions analytiques tant pour l'estimation des débits d'exploitation des ouvrages que des éventuels impacts sur les eaux de surface. Ainsi, que ce soit à l'échelle d'un ouvrage ou à l'échelle d'un grand bassin versant, l'utilisation de ces solutions est largement répandue.

Ces solutions permettront à l'hydrogéologue praticien de se familiariser avec les problèmes d'échanges « rivière-nappe » au cours d'un pompage et de mettre à sa disposition une série de solutions adaptées permettant un calcul des débits soustraits à la rivière ou de façon plus générale aux eaux de surface. Ces solutions pourront être utilisées dans le cadre d'études d'incidence liées aux demandes de déclaration ou d'autorisation de prélèvements relatives aux rubriques 1.2.1.0. ou 1.3.1.0. de la nomenclature eau R214-1 du Code de l'Environnement.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. INTERACTIONS NAPPE-RIVIERE	11
1.2. METHODOLOGIE D'EVALUATION DE L'IMPACT SUR LES COURS D'EAU	12
2. Impact quantitatif d'un pompage dans un aquifère sur les eaux de surface (cours d'eau) : problématique et généralité	15
2.1. D'OU PROVIENT L'EAU POMPEE PAR LE PUIITS ?	15
2.2. QUEL IMPACT QUANTITATIF SUR UN COURS D'EAU ?	17
3. Impact quantitatif d'un pompage dans un aquifère sur les eaux de surface (cours d'eau) : les solutions mathématiques	23
3.1. LES DIFFERENTS TYPES DE MODELES D'AQUIFERE	24
3.1.1. Aquifère homogène et cours d'eau incisant complètement l'aquifère (nappe semi-finie)	29
3.1.2. Aquifère homogène et cours d'eau incisant complètement l'aquifère avec berge colmatée	31
3.1.3. Aquifère homogène et cours d'eau incisant partiellement l'aquifère avec lit colmaté	34
3.1.4. Aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface	37
3.1.5. Aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère supérieur	40
3.1.6. Aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère profond	43
3.1.7. Aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère profond et l'aquifère de surface	46
3.1.8. Aquifère multicouche traversé par une fracture verticale, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface	49
3.1.9. Aquifère multicouche, impact d'un pompage dans un aquifère sur une source	53
3.1.10. Autres modèles de types d'aquifère	56
3.2. LES DIFFERENTS TYPES DE MODELES D'AQUIFERE AVEC LIMITES	56
3.2.1. Aquifère homogène avec cours d'eau incisant complètement l'aquifère et limite de nappe	59
3.2.2. Aquifère homogène avec deux cours d'eau parallèles incisant complètement l'aquifère	63
3.2.3. Aquifère multicouche limité par deux limites étanches, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface	66
3.2.4. Aquifère multicouche limité par quatre limites étanches, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface	69

3.2.5. Aquifère multicouche limité par deux limites étanches, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface. Forage incliné.....	72
3.2.6. Autres modèles faisant intervenir des limites d'aquifères et/ou des géométries de cours d'eau.....	75
4. Quelques remarques importantes	77
5. Types de suivis de l'impact d'un pompage sur les systèmes de surface.....	81
5.1. SUIVI DANS LE(S) AQUIFERE(S)	81
5.2. SUIVI SUR LE SYSTEME DE SURFACE.....	81
6. Conclusions et recommandations.....	83
7. Références bibliographiques	85

Liste des figures

- Figure 1 : les lignes d'écoulement des eaux souterraines dans un système aquifère multi-couches : relation entre aquifères superficiels et profonds. Le temps de résidence des eaux souterraines peut varier de quelques années à des millénaires (modifié de Winter et al. 1998 dans Barlow et Leake, 2012). 12
- Figure 2 : évaluation de l'impact, en m³/h, sur le cours d'eau de l'Argens durant un essai multi-puits (F4-F5-Vidauban1) réalisé sur le site d'Entraigues (Var), extrait de Moulin et al. (2015). Modèle : Hunt (2003) modifié version multi-puits avec pompages dans l'aquifère inférieur (cf.§3.2.4). On notera le faible impact sur le cours d'eau, 15 m³/h, contre 1570 m³/h pompé..... 13
- Figure 3 : effet d'un pompage sur une nappe hypothétique (modifié de Barlow et Leake, 2012 et Lelièvre, 1969). Vue en coupe verticale et en plan des lignes de courant. A : en conditions naturelles sans pompage, B : juste après la mise en route du pompage (toute l'eau pompée provient de l'aquifère), C : le cône de dépression s'est agrandi, toute l'eau pompée provient de l'aquifère, mais constitue aussi un manque à gagner pour le cours d'eau, et D : le cône de dépression atteint le cours d'eau, la nappe est alors réalimentée par le cours d'eau car les flux au niveau de la rivière s'inversent (une partie significative de l'eau pompée provient du cours d'eau)..... 16
- Figure 4 : impact en terme de débit d'un pompage dans un aquifère à proximité d'un cours d'eau (exemple théorique). Modèles : cours d'eau incisant totalement (schéma 1 ; cf.§ 3.1.1) ou partiellement l'aquifère (schéma 4 ; cf.§ 3.1.3), pompage situé entre deux cours d'eau (schéma 3 ; cf.§ 3.2.2) et aquifère limité dans l'espace (schéma 2 ; cf.§ 3.2.1). Début du pompage à 30 jours ; forage pompé situé à 100 m du cours d'eau... 19
- Figure 5 : complément à la figure 4. Evolution au cours du temps du « manque à gagner » pour le cours d'eau (en pourcentage du débit pompé) pour différentes configurations d'aquifère et relations nappe-rivière. Modèles : cours d'eau incisant totalement (schéma 1) ou partiellement l'aquifère (schéma 4), pompage situé entre deux cours d'eau (schéma 3) et aquifère limité dans l'espace (schéma 2). Le forage pompé est situé à 100 m du cours d'eau..... 19
- Figure 6 : évolution de la part d'eau en provenance de l'aquifère (trait plein) et du cours d'eau (pointillés), en pourcentage du débit pompé pour différentes configurations d'aquifère et relations nappe-rivière. A : cours d'eau incisant totalement l'aquifère (schéma 1) B : Modèles : cours d'eau incisant totalement (schéma 1) ou partiellement l'aquifère

(schéma 4), pompage situé entre deux cours d'eau (schéma 3) et aquifère limité dans l'espace (schéma 2).....	20
Figure 7 : évolution au cours du temps du « manque à gagner » pour le cours d'eau (en pourcentage du débit pompé) pour un pompage situé à différentes distances du cours d'eau. Modèles : cours d'eau incisant totalement l'aquifère (schéma 1 des figures précédentes).	21
Figure 8 : schéma d'un aquifère (vue en plan) où le cours d'eau recoupe l'intégralité de l'aquifère ; $x=y=0$ sur la berge du cours d'eau.	23
Figure 9 : nappe semi-finie, cours d'eau incisant complètement l'aquifère (Theis, 1941 ; Glover et Balmer, 1954). Schéma extrait de Hunt (2014).	29
Figure 10 : nappe semi-finie, pour un pompage de plus en plus éloigné du cours d'eau. A : évolution du rabattement (sD) au puits de pompage et de sa dérivée (sD'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau.....	30
Figure 11 : nappe semi-finie, cours d'eau incisant complètement l'aquifère avec berge colmatée (Hantush, 1965). Schéma extrait de Hunt (2014).	31
Figure 12 : cours d'eau incisant totalement l'aquifère avec berge colmatée pour différentes valeurs de R (Hantush, 1965). A : évolution du rabattement (sD) au puits de pompage et de sa dérivée (sD'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance.	33
Figure 13 : cours d'eau incisant partiellement l'aquifère avec lit colmaté (Hunt, 1999). Schéma extrait de Hunt (2014).	34
Figure 14 : cours d'eau incisant partiellement l'aquifère avec lit colmaté pour différentes valeurs de λ (Hunt, 1999). A : évolution du rabattement (sD) au puits de pompage et de sa dérivée (sD'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance.	36
Figure 15 : cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt, 2003).	37
Figure 16 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt, 2003). Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (sD) au puits de pompage et de sa dérivée (sD'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m).	39
Figure 17 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère supérieur (Hunt, 2009).	40
Figure 18 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère supérieur (Hunt, 2009). Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (sD) au puits de pompage et de sa dérivée (sD'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m).	42
Figure 19 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère inférieur (Ward et Lough, 2011).	43
Figure 20 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère inférieur (Ward et Lough, 2011). Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (sD) au puits de pompage et de sa dérivée (sD'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m).	45
Figure 21 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans les deux niveaux aquifères.	46

- Figure 22 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans les aquifères supérieur et l'aquifère profond. Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (100 m). 48
- Figure 23 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans les aquifères supérieur et l'aquifère profond. Calculs pour différentes valeurs de λ . Evolution de la contribution en terme de débit des deux niveaux aquifères. 49
- Figure 24 : aquifère multicouche traversé par une fracture verticale, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface. 49
- Figure 25 : aquifère multicouche traversé par une fracture verticale, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface. Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Longueur de la fracture : 60 m, α : 45°. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m). 51
- Figure 26 : aquifère multicouche traversé par une fracture verticale, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface. Calculs pour différentes valeurs de α . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Longueur de la fracture : 60 m. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (15 m). 52
- Figure 27 : effet d'un pompage sur une source située dans un aquitard de surface (Hunt, 2004 ; Hunt et Smith, 2008). 53
- Figure 28 : aquifère multicouche, source avec fond colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt et Smith, 2008). Calculs pour différentes valeurs de α . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit de la source. La source est toujours située à la même distance (20 m). 55
- Figure 29 : autres configurations d'aquifère avec interaction d'un cours d'eau (Lelièvre, 1969): A- aquifère multicouche de type Hantush, B- Variations latérales de l'épaisseur aquifère et C- Nappe à surface libre inclinée ; la base de l'aquifère et la surface piézométrique sont parallèles au substratum imperméable (pente $\leq 2\%$). 56
- Figure 30 : aquifère homogène avec cours d'eau incisant complètement l'aquifère et limite de nappe. 59
- Figure 31 : aquifère homogène avec cours d'eau incisant complètement l'aquifère et limite de nappe. Le puits est situé à égale distance entre les deux limites, et les limites sont de plus en plus éloignées. A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. 61
- Figure 32 : aquifère homogène avec cours d'eau incisant complètement l'aquifère et limite de nappe. Le puits est situé à proximité de la limite de nappe, et la distance au cours d'eau est variable. A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. 62
- Figure 33 : aquifère homogène avec pompage entre deux cours d'eau incisant complètement l'aquifère et parallèles. 63
- Figure 34 : pompage situé dans un aquifère homogène limité par deux cours d'eau incisant complètement l'aquifère et parallèles. Le puits est situé à égale distance entre les deux limites, et les limites sont de plus en plus éloignées. A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. 64
- Figure 35 : pompage situé dans un aquifère homogène limité par deux cours d'eau incisant complètement l'aquifère et parallèles. Le puits est situé à proximité d'un des deux

cours d'eau, et la distance au deuxième est variable. A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. 65

Figure 36 : cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface et aquifère limité dans l'espace par deux limites étanches parallèles (Hunt, 2008) ; $x=y=0$ sur la berge la plus proche du puits. 66

Figure 37 : aquifère multicouche limité dans l'espace par deux limites étanches parallèles, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt, 2008). Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (5 m). 68

Figure 38 : cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface et aquifère limité dans l'espace par quatre limites étanches orthogonales ($x=y=0$ au puits de pompage). 69

Figure 39 : aquifère multicouche limité dans l'espace par quatre limites étanches orthogonales, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface. Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (20 m). 71

Figure 40 : cas d'un puits incliné, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface et aquifère limité dans l'espace par deux limites étanches parallèles ($x=y=0$ au puits de pompage). 72

Figure 41 : cas d'un puits incliné, aquifère multicouche limité dans l'espace par deux limites étanches parallèles, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface. Calculs pour différentes valeurs de α . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m). 74

Figure 42 : autres modèles faisant intervenir des limites d'aquifères et/ou des géométries de cours d'eau (Lelièvre, 1969) : A- cours d'eau formant un coude, B- cours d'eau et limites étanches formant un angle. 75

Figure 43 : évolution du débit d'infiltration en provenance du cours d'eau lors de l'arrêt du pompage. Modèle : Theis (1941). 78

Figure 44 : impact sur un cours d'eau d'un pompage dans un aquifère multicouche ; pompage dans un aquifère profond séparé de la surface par un niveau peu perméable ($K'=10^{-9}$, 5×10^{-9} , 10^{-8} et 10^{-7} m/s). Modèle de Ward et Lough (2011). 79

Figure 45 : calcul de l'impact sur un tronçon de cours d'eau, défini entre $-L$ et $+L$, pour un puits de pompage situé à 25 m du cours d'eau. Modèle : Hunt (2003). 82

Liste des tableaux

Tableau 1 : les différents types de modèles d'aquifère. 28

Tableau 2 : les différents types de modèles d'aquifère, les effets de limites géométriques des aquifères. 58

Liste des annexes

Annexe 1 Solutions supplémentaires et abaques	89
---	----

1. Introduction

1.1. INTERACTIONS NAPPE-RIVIERE

Les eaux souterraines sont une source importante d'eau pour les besoins humains, y compris pour l'approvisionnement en eau potable, mais aussi pour l'agriculture et l'industrie. Cependant, comme tout développement de ressource naturelle, des conséquences néfastes peuvent être associées à son utilisation. L'une des principales préoccupations liées au développement des eaux souterraines est l'effet du pompage sur les eaux de surface (rivière, lac, zone humide), comme le débit des cours d'eau.

De façon générale, les systèmes d'eaux de surface et les eaux souterraines sont liés, avec très souvent un soutien important de ces systèmes assurés par les eaux souterraines notamment durant les phases d'étiage. Ainsi, le pompage des eaux souterraines a pour effet de réduire la quantité d'eau souterraine qui s'écoule vers les cours d'eau et, dans certains cas extrêmes, il peut entraîner une perte totale du débit du cours d'eau vers le système sous-jacent des eaux souterraines. Ainsi tout prélèvement dans un aquifère connecté à un système d'eaux de surface constitue, la plupart du temps, un préjudice pour ce dernier (Bredehoeft et al., 1982). Néanmoins, il existe quelques exceptions où un pompage dans un aquifère peut augmenter la recharge naturelle. Par exemple en « capturant » des écoulements rapides (ruissellement) qui, en système sans pompage s'écouleraient vers les fleuves, la mer. C'est le cas par exemple de certains systèmes karstiques – on parle alors de gestion active (Avias, 1995 ; Ladouche et al., 2014), ou de systèmes où le niveau piézométrique est très proche de la surface (Barlow et Leake, 2012). Dans ces cas le pompage a pour effet de créer un vide par abaissement du niveau de la nappe, laissant donc un espace favorisant le stockage d'une partie des écoulements rapides.

Les réductions des apports en eaux souterraines aux systèmes des eaux de surface causées par le pompage dans les nappes aquifères sont une importante question pour la gestion des ressources en eau en raison des impacts négatifs que peut avoir la diminution des débits des cours d'eau sur les écosystèmes aquatiques, sur la disponibilité des eaux de surface ainsi que leur qualité, mais aussi sur la valeur esthétique que peuvent avoir les cours d'eau et les rivières (Barlow et Leake, 2012 ; Paran et al., 2015).

En raison de leur proximité à la surface et des eaux superficielles qui leur sont associées, les nappes d'accompagnement d'un cours d'eau, des aquifères libres, sont souvent le siège de pompage pouvant occasionner la diminution du débit des cours d'eau associés. Cependant, le pompage d'aquifères captifs (ou semi-captifs) peut également provoquer une diminution de leur débit. Le fait est que des lignes d'écoulement d'eaux souterraines existent entre les systèmes profonds (aquifères captifs) et les aquifères peu profonds (libres), signifiant que des changements de débit d'exploitation des eaux souterraines dans les niveaux confinés et profonds peuvent se propager aux aquifères peu profonds, eux-mêmes connectés aux systèmes d'eaux de surface (Figure 1). Ainsi, tout prélèvement par pompage, par exemple pour de l'alimentation en potable (captage AEP), effectué dans une nappe en relation plus ou moins directe avec les eaux de surface (rivière, lac, zone humide) est susceptible d'introduire un préjudice pour ces dernières.

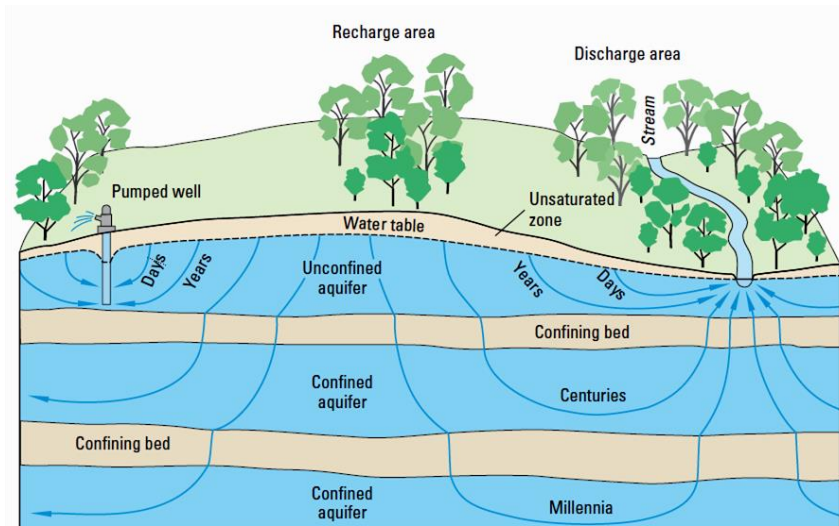


Figure 1 : les lignes d'écoulement des eaux souterraines dans un système aquifère multi-couches : relation entre aquifères superficiels et profonds. Le temps de résidence des eaux souterraines peut varier de quelques années à des millénaires (modifié de Winter et al. 1998 dans Barlow et Leake, 2012).

1.2. METHODOLOGIE D'EVALUATION DE L'IMPACT SUR LES COURS D'EAU

Les phénomènes d'échange entre nappe et cours d'eau voisins sont, dans la nature, relativement complexes. Aussi, l'intervention des techniques de simulation par modélisation numérique s'avère souvent nécessaire en particulier s'il s'agit d'évaluer les impacts des pompages au niveau de grand secteur, comme par exemple le long de fleuves ou de grandes rivières (voir par exemple : BRGM, 1996 ; Barlow et Leake, 2012). Toutefois, ceci n'empêche pas, même à ces échelles, l'emploi de solutions analytiques pour faire une première évaluation de ces impacts (Lelièvre, 1969 ; BRGM, 1996 ; Vernoux et al., 2001 avec l'application « CONEXMIN » développée par le BRGM (<http://www.brgm.fr/production-scientifique/logiciels-scientifiques/conexmin-calcul-influence-pompage-nappe>) et de celle de Hunt : « stream flow depletion »¹).

De façon assez générale, l'échelle d'étude se situe au niveau du captage, ou d'un champ captant, où l'on cherche à évaluer l'impact de ce dernier sur les eaux de surface. A cette échelle, l'information (géologique, propriétés du milieu, données de suivis, etc.) n'est souvent pas suffisante ou disponible pour permettre l'élaboration d'un modèle numérique, c'est pourquoi depuis près de 80 ans de nombreuses solutions analytiques ont été développées (Theis, 1941 ; Lelièvre, 1969 ; Jenkins, 1977 ; Hunt, 2014 ; etc.) et que leur usage est toujours d'actualité. Ces solutions, basées sur des configurations schématiques plus ou moins simples selon le contexte hydrogéologique, permettent de démontrer et de quantifier l'impact du pompage sur les eaux de surface.

Jusqu'à présent seules les solutions destinées à quantifier l'impact du pompage sur le système des eaux de surface étaient utilisées, sans qu'il n'y ait réellement d'analyse de la donnée au puits de pompage. Or, les techniques de diagnostic des essais par pompage mises en œuvre depuis les années 1980 et basées sur l'analyse de la dérivée des rabattements au puits de pompage (Bourdet et al., 1983, 1989 ; Spane and Wurstner, 1993, Deruyck ; et al., 1992, Shlumberger 2002 ;

¹ Disponible sur <http://www.civil.canterbury.ac.nz/staff/bhunt.shtml> ; Hunt (2005a).

Renard et al., 2009, etc.) sont susceptibles de renseigner non seulement sur la structure et les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère pompé (homogène, multicouche, effet de limites, etc.), mais aussi, de mettre en évidence l'éventuel impact du pompage sur les eaux de surface, ainsi que sur les modalités d'échange « nappe-rivière » (colmatage des berges, cours d'eau de faible incision ou non, etc.). Une fois le diagnostic posé, la solution mathématique représentant le plus fidèlement possible le système aquifère dans son ensemble (y compris les relations « nappe-rivière ») permettra de déduire, par modélisation, les paramètres de l'aquifère et ceux régissant les échanges avec les eaux de surface.

Si des mesures de l'évolution des flux des eaux de surface sont disponibles (par exemple le débit d'un cours d'eau), des modélisations conjointes du rabattement au puits pompé, voire de piézomètres d'observation, et des variations de flux observées pourront être envisagées. Cependant, bien souvent les mesures de flux des eaux de surface sont absentes ou difficiles à réaliser en raison de la courte durée des essais ou des trop faibles différences de flux entre celui du cours d'eau et la fraction interceptée par le pompage. Cependant, ces solutions mathématiques, calées sur les rabattements des essais par pompage pourront donner a minima des ordres de grandeur de l'impact du ou des pompages sur les systèmes de surface (Dewandel et al., 2015, Moulin et al., 2015 ; Arnaud et Dewandel, 2016 ; Figure 2).

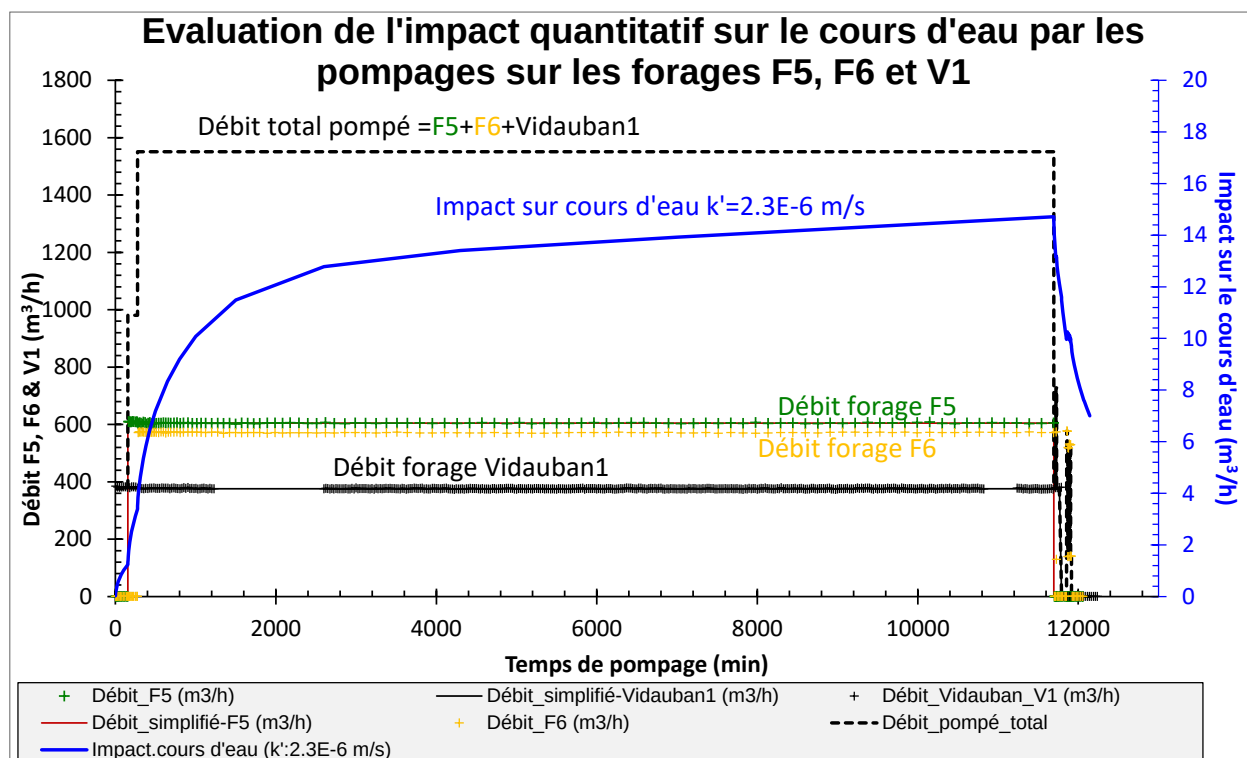


Figure 2 : évaluation de l'impact, en m³/h, sur le cours d'eau de l'Argens durant un essai multi-puits (F4-F5-Vidauban1) réalisé sur le site d'Entraigues (Var), extrait de Moulin et al. (2015). Modèle : Hunt (2003) modifié version multi-puits avec pompages dans l'aquifère inférieur (cf.§3.2.4). On notera le faible impact sur le cours d'eau, 15 m³/h, contre 1570 m³/h pompé.

Ce document a pour objectif de présenter une liste la plus exhaustive possible de courbes types d'évolution du rabattement au puits de pompage et de l'impact associé, en terme de débit, sur les eaux de surface pour diverses configurations schématiques plus ou moins simples selon le contexte hydrogéologique rencontré : aquifère simple et cours d'eau incisant totalement ou

partiellement l'aquifère, aquifère multicouches avec cours d'eau dans l'aquifère de surface avec pompage dans l'aquifère de surface ou profond, effet de limites géométriques de l'aquifère, etc. Ces solutions permettront à l'hydrogéologue praticien de se familiariser avec les problèmes d'échanges « rivière-nappe » au cours d'un pompage et de mettre à sa disposition une série de solutions adaptées permettant un calcul des débits soustraits à la rivière ou de façon plus générale aux eaux de surface. Ces solutions pourront être utilisées dans le cadre d'études d'incidence liées aux demandes de déclaration ou d'autorisation de prélèvements relatives aux rubriques 1.2.1.0. ou 1.3.1.0. de la nomenclature eau R214-1 du Code de l'Environnement.

Ce document est basé sur une série de travaux antérieurs menés au BRGM (Lelièvre, 1969, Forkasiewicz et Peaudecerf, 1976, etc.), de documents de synthèse produits par l'USGS (Jenkins, 1968 ; Barlow et Leake, 2012), mais aussi sur une bibliographie scientifique récente donnant accès à de nombreuses solutions analytiques (Butler et al., 2001 ; Lough et Hunt, 2006 ; Hunt, 2014, etc.). De ce fait, plusieurs emprunts de figures ont été faits à ces auteurs. Par ailleurs, d'autres solutions sont proposées par l'auteur de ce document.

2. Impact quantitatif d'un pompage dans un aquifère sur les eaux de surface (cours d'eau) : problématique et généralité

Cette section décrit les processus fondamentaux et les facteurs influant sur le temps, le taux et les lieux de l'impact d'un pompage dans un aquifère sur un cours d'eau voisin, ou au sens large sur n'importe quel système d'eaux de surface.

Dans les conditions naturelles, l'exutoire principal d'une nappe est constitué par un cours d'eau ou une source. Ainsi, toute quantité d'eau prélevée et consommée en un point quelconque du bassin est enlevée au volume d'eau qui aurait dû, en l'absence de prélèvement, s'écouler dans la rivière. Ce manque constitue alors, tôt ou tard, un préjudice pour le réseau superficiel. Ces considérations sur le régime moyen du système « nappe-rivière » n'excluent pas que localement ou temporairement (crues) les écoulements naturels soient dirigés de la rivière vers la nappe.

2.1. D'OU PROVIENT L'EAU POMPEE PAR LE PUITS ?

Deux hypothèses importantes sont faites tout au long de ce document, premièrement, que le cours d'eau et l'aquifère sous-jacent restent hydrauliquement connectés par une zone saturée continue et, deuxièmement, que le flux dans le cours d'eau ne s'assèche pas. Ces hypothèses peuvent ne pas être valables pour les cas extrêmes des eaux souterraines exploitées à grande échelle avec des débits de cours d'eau limités. Dans ce cas, les niveaux piézométriques au sein des aquifères peuvent être, localement, beaucoup plus bas que le lit des cours d'eau. Dans certains cas, il arrive que le cours d'eau ne puisse plus satisfaire la quantité d'eau pompée dans les aquifères, le cours d'eau peut alors se perdre totalement dans l'aquifère et devenir éphémère. De plus, même si le débit dans le cours d'eau existe toujours, une fois que le niveau des nappes de surface baisse au-dessous du lit de la rivière, une zone non-saturée peut s'y développer déconnectant ainsi les systèmes des eaux souterraines et des eaux de surface. A partir du moment où les systèmes sont déconnectés, le système des eaux de surface ne réagira plus aux sollicitations provoquées par les pompages, il y aura un écoulement quasi-continu des eaux de surface vers l'aquifère, fonction des propriétés des aquifères et des gradients hydrauliques locaux. Pour plus de détails sur l'effet de pompages sur ces systèmes déconnectés le lecteur pourra se rapporter, par exemple à Su et al. (2007), Brunner et al. (2011), Zhang et al. (2011) et Lough et Hunt (2006).

L'impact du pompage dans un aquifère sur un cours d'eau voisin, quand les systèmes sont hydrauliquement connectés, peut se présenter sous différentes formes. Au début de la mise en route du pompage, le niveau des eaux souterraines à proximité du puits pompé diminue, créant un cône de dépression autour du puits issu de la déviation des lignes de courant d'eau souterraine vers le puits (Figure 3B). Ce cône occupe une certaine dimension de l'espace mais n'a pas encore atteint le cours d'eau. De fait, toute l'eau pompée par le puits provient uniquement de l'eau stockée dans l'aquifère. Ce cas de figure représente par exemple le tout début d'un pompage pour un ouvrage situé à proximité d'un cours d'eau, ou alors celui d'un forage situé à une grande distance de ce dernier.

A fur et à mesure que le temps de pompage augmente (Figure 3C), le cône de dépression s'agrandit et s'approfondit, accentuant ainsi le gradient hydraulique. On notera que plus la diffusivité hydraulique de l'aquifère sera importante -cas par exemple des aquifères captifs, plus ce cône se propagera rapidement. A contrario, lorsqu'elle est plus faible – cas des aquifères libres

par exemple - sa progression sera beaucoup plus ténue. A ce stade, comme au stade précédent, il n'y a toujours pas d'inversion des lignes de courant, indiquant que toute l'eau pompée provient toujours du déstockage de l'aquifère. Cette eau capturée par le puits constitue néanmoins un « manque à gagner » pour le cours d'eau car celle-ci aurait, en partie, contribué à son alimentation. On notera que le phénomène est identique pour les autres systèmes d'eaux de surface (zones humides, lacs, sources, etc.).

Pour des temps de pompage longs, ou pour un pompage proche d'un cours d'eau (Figure 3D), non seulement les lignes de courant au sein de l'aquifère affluent toujours vers le puits, causant toujours un « manque à gagner » pour le cours d'eau, mais comme le cône de dépression s'est déplacé jusqu'au cours d'eau, le gradient hydraulique à l'interface aquifère-cours d'eau s'est inversé, induisant une alimentation de l'aquifère par le cours d'eau. A partir de ce moment se sont ces deux processus qui provoquent une diminution du débit dans le cours d'eau.

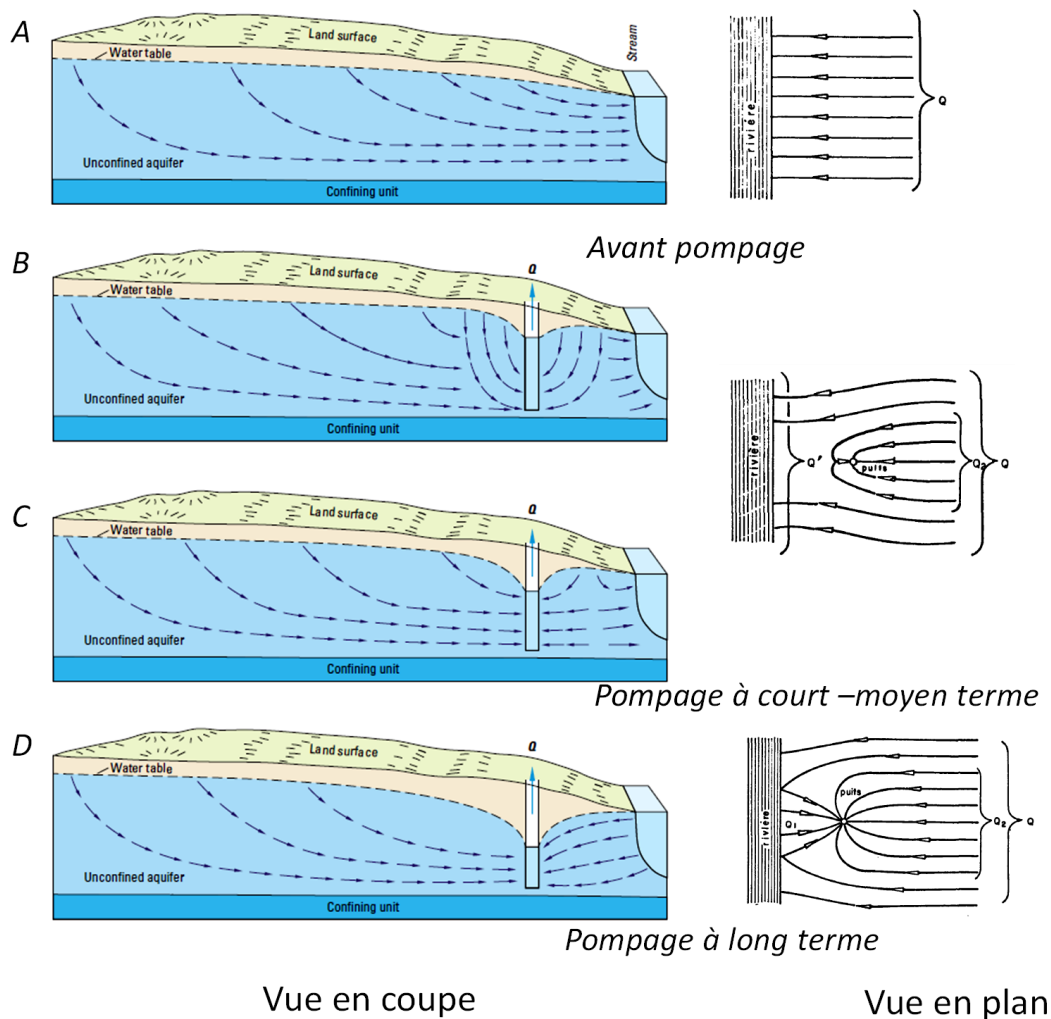


Figure 3 : effet d'un pompage sur une nappe hypothétique (modifié de Barlow et Leake, 2012 et Lelièvre, 1969). Vue en coupe verticale et en plan des lignes de courant. A : en conditions naturelles sans pompage, B : juste après la mise en route du pompage (toute l'eau pompée provient de l'aquifère), C : le cône de dépression s'est agrandi, toute l'eau pompée provient de l'aquifère, mais constitue aussi un manque à gagner pour le cours d'eau, et D : le cône de dépression atteint le cours d'eau, la nappe est alors réalimentée par le cours d'eau car les flux au niveau de la rivière s'inversent (une partie significative de l'eau pompée provient du cours d'eau).

2.2. QUEL IMPACT QUANTITATIF SUR UN COURS D'EAU ?

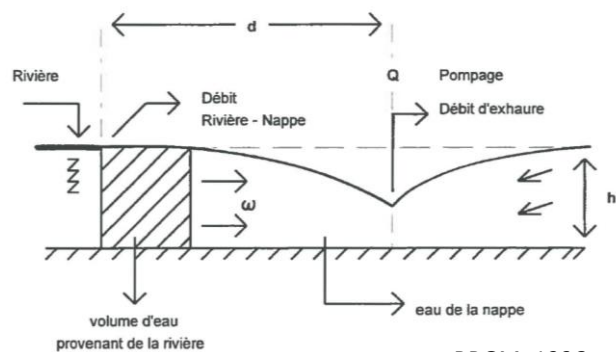
A titre d'exemple, la Figure 4 présente quelle serait la diminution du débit d'un cours d'eau hypothétique provoquée par un pompage dans différentes configurations d'aquifères et de relations nappe-rivière : cours d'eau incisant totalement (schéma 1) ou partiellement l'aquifère (schéma 4), pompage situé entre deux cours d'eau (schéma 3) et aquifère limité dans l'espace par une limite étanche (schéma 2). Quel que soit le modèle, le débit du cours d'eau diminue, malgré les événements pluvieux qui contribuent toujours à augmenter son débit. Les réponses temporelles des différents modèles du « manque à gagner » induites par le pompage sur le cours d'eau sont illustrées sur la Figure 5. Suivant les modèles, les réponses sont très différentes expliquant de ce fait les différences entre les courbes de la figure précédente. La Figure 6 montre comment évolue avec le temps les parts d'eau soustraites à l'aquifère (déstockage) et au cours d'eau pour les différentes configurations d'aquifère et de relations nappe-rivière. En début de pompage, c'est la part d'eau liée au déstockage de l'aquifère qui domine (voir aussi Figure 3B et C), mais sa contribution diminue, plus ou moins rapidement suivant le modèle pour ensuite être dominée par celle en provenance du cours d'eau. Pour des temps de pompage longs, ou des forages situés proches de cours d'eau, la source d'eau pompée provient exclusivement du cours d'eau, et cela quel que soit le modèle. A partir du moment où cela se produit, les niveaux dans l'aquifère n'évoluent plus, le cône de dépression ne s'élargit plus et le débit pompé au puits est égal à la quantité d'eau de surface s'infiltrant dans l'aquifère. Le temps nécessaire pour atteindre cet état d'équilibre est très différent suivant le type d'aquifère, ses relations avec les eaux de surface, mais aussi suivant la distance des pompes aux systèmes des eaux de surface (Figure 7). Il peut varier de plusieurs jours à plusieurs décennies et dans certains aquifères peut ne jamais être atteint, en particulier si le pompage de l'aquifère excède le flux pouvant provenir des eaux de surface (Barlow et Leake, 2012).

Ces exemples permettent de montrer les différents facteurs géologiques, hydrogéologiques et géométriques qui contrôlent l'impact quantitatif d'un pompage dans un aquifère situé à proximité d'un cours d'eau. Etant donné les fortes différences de réponses suivant l'importance de ces facteurs, tout l'intérêt sera pour le praticien de bien identifier le type d'aquifère et de relation nappe-rivière en présence afin de faire l'évaluation la plus réaliste possible de l'impact quantitatif sur le système d'eau de surface.

Dans la suite de ce document est présenté un ensemble de solutions mathématiques s'appliquant pour différentes configurations d'aquifères et de relations « nappe-rivière ».

A ne pas confondre avec la quantité d'eau de surface qui arrive au puits pompé

Les calculs présentés ici, et par la suite, indiquent la quantité d'eau qui s'infiltre depuis la rivière (ou au sens large des eaux de surface) vers la nappe, mais pas la quantité d'eau de rivière qui est pompée. Si la part d'eau s'infiltrant du cours d'eau vers l'aquifère est indépendante du débit de pompage (mais fonction des paramètres aquifères), l'eau qui va quitter la rivière va mettre un certain temps avant d'arriver au puits. Ce temps, intitulé le « temps de percée », est inversement proportionnel au débit de pompage, et vaut d'après BRGM (1996), pour un cours d'eau incisant complètement l'aquifère :



BRGM, 1996

$$t_p = \frac{2}{3Q} \pi \omega d^2 h$$

Où Q est le débit de pompage, ω le coefficient d'emmagasinement (ou porosité) de l'aquifère, d la distance puits-rivière et h l'épaisseur de l'aquifère (h est constante).

Le calcul pour déterminer en fonction du temps la part d'eau du cours d'eau effectivement captée par l'ouvrage est complexe, nécessitant le couplage d'approche hydrodynamique et de transport, et est non résolu simplement en analytique.

Cependant, en ce qui concerne les échanges « nappe-rivière » et l'évaluation de l'impact quantitatif que peut avoir un pompage sur un cours d'eau les solutions analytiques présentées par la suite sont d'une aide beaucoup plus opérationnelle, en particulier en période d'étiage sévère des eaux de surface.

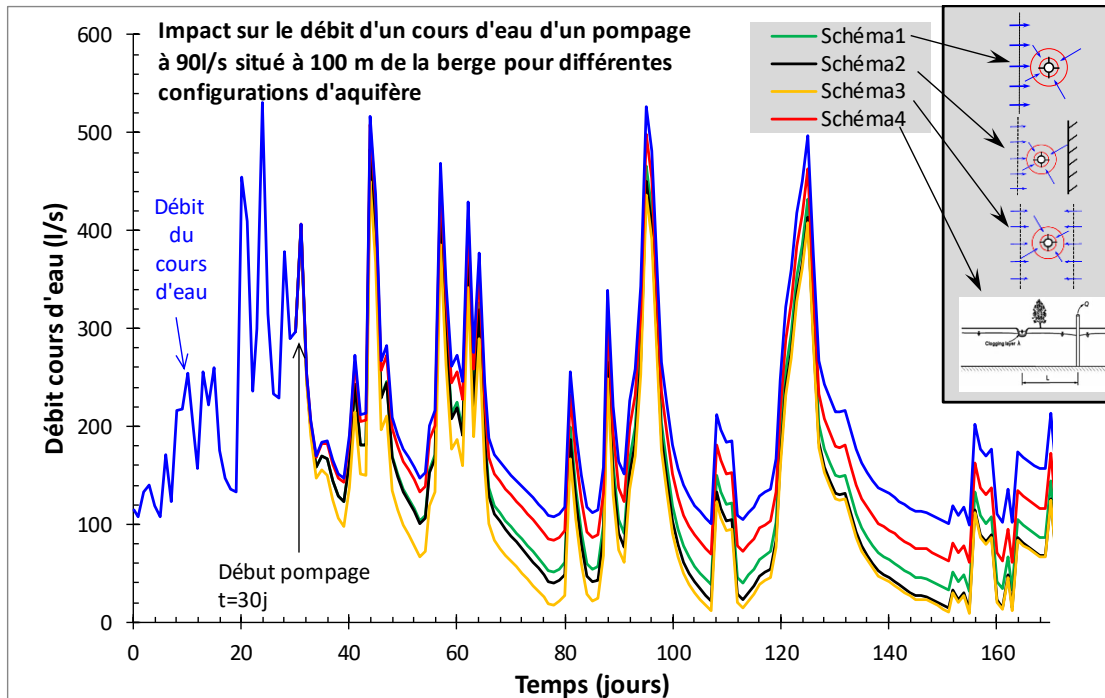


Figure 4 : impact en terme de débit d'un pompage dans un aquifère à proximité d'un cours d'eau (exemple théorique). Modèles : cours d'eau incisant totalement (schéma 1 ; cf. § 3.1.1) ou partiellement l'aquifère (schéma 4 ; cf. § 3.1.3), pompage situé entre deux cours d'eau (schéma 3 ; cf. § 3.2.2) et aquifère limité dans l'espace (schéma 2 ; cf. § 3.2.1). Début du pompage à 30 jours ; forage pompé situé à 100 m du cours d'eau.

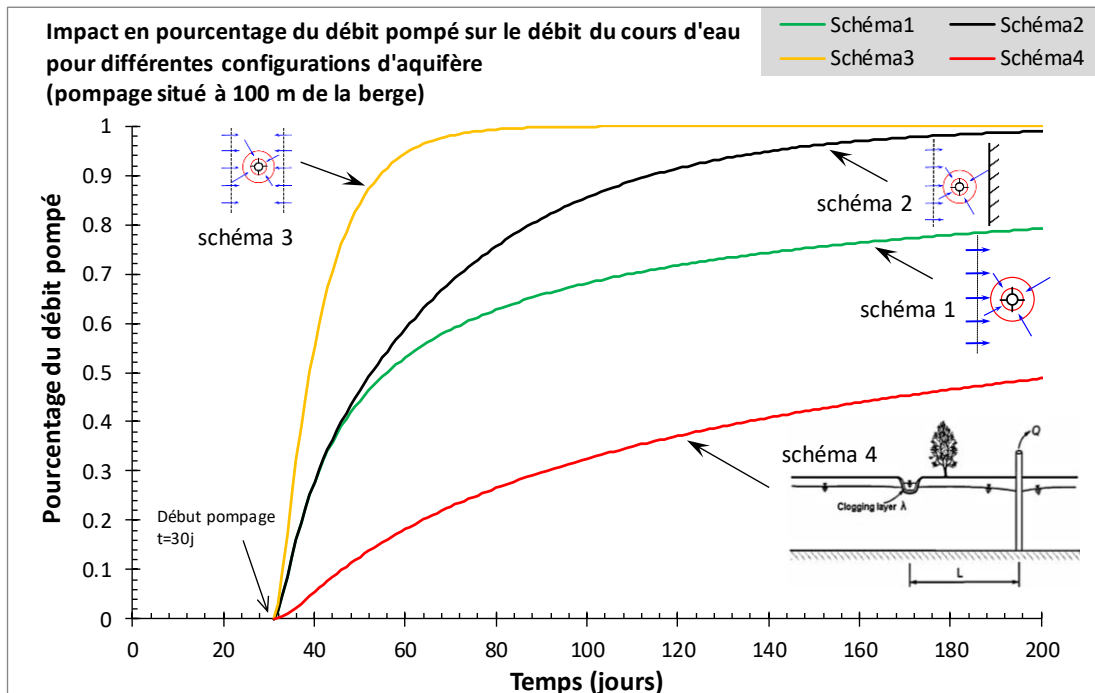


Figure 5 : complément à la figure 4. Evolution au cours du temps du « manque à gagner » pour le cours d'eau (en pourcentage du débit pompé) pour différentes configurations d'aquifère et relations nappe-rivière. Modèles : cours d'eau incisant totalement (schéma 1) ou partiellement l'aquifère (schéma 4), pompage situé entre deux cours d'eau (schéma 3) et aquifère limité dans l'espace (schéma 2). Le forage pompé est situé à 100 m du cours d'eau.

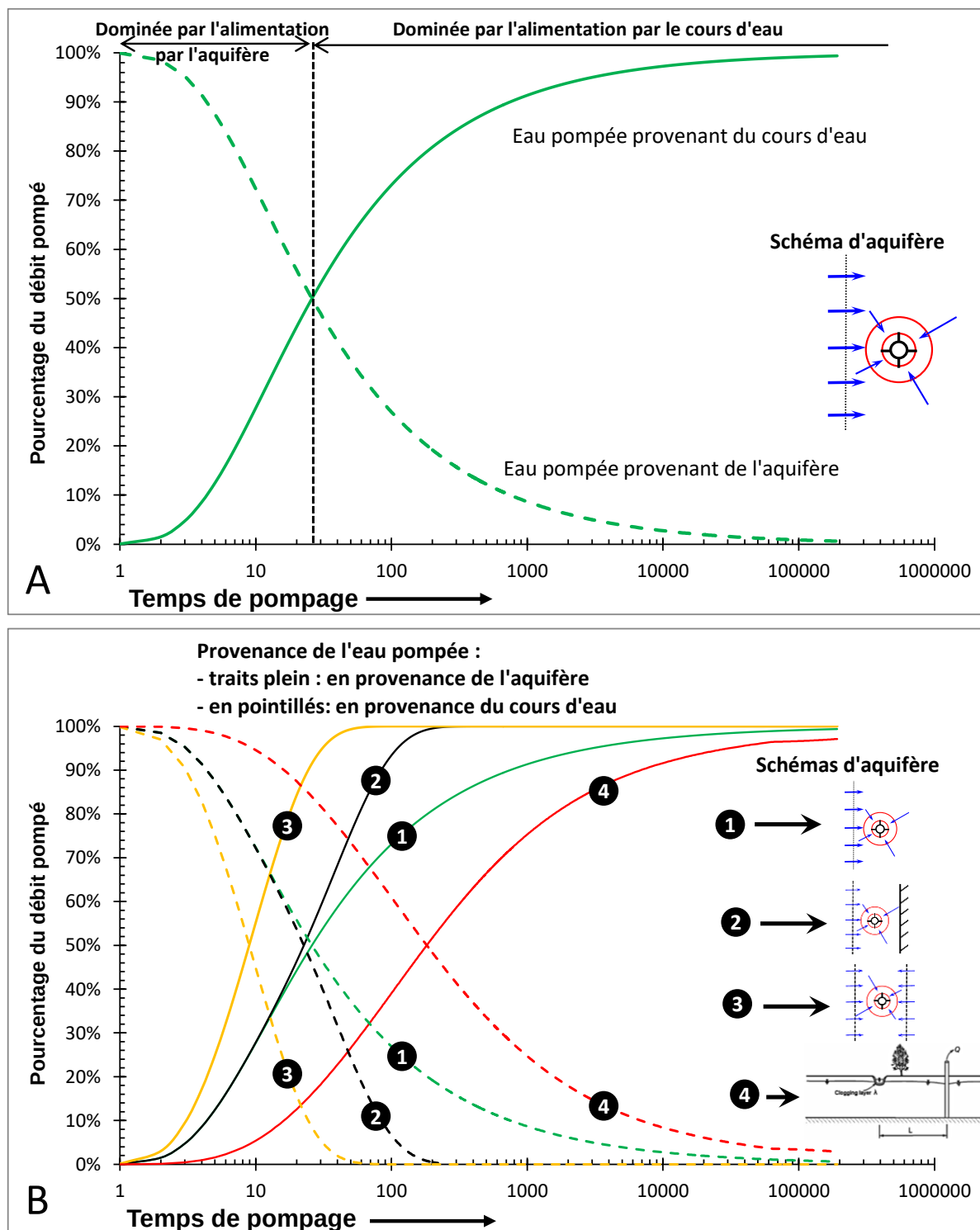


Figure 6 : évolution de la part d'eau en provenance de l'aquifère (trait plein) et du cours d'eau (pointillés), en pourcentage du débit pompé pour différentes configurations d'aquifère et relations nappe-rivière. A : cours d'eau incisant totalement l'aquifère (schéma 1) B : Modèles : cours d'eau incisant totalement (schéma 1) ou partiellement l'aquifère (schéma 4), pompage situé entre deux cours d'eau (schéma 3) et aquifère limité dans l'espace (schéma 2).

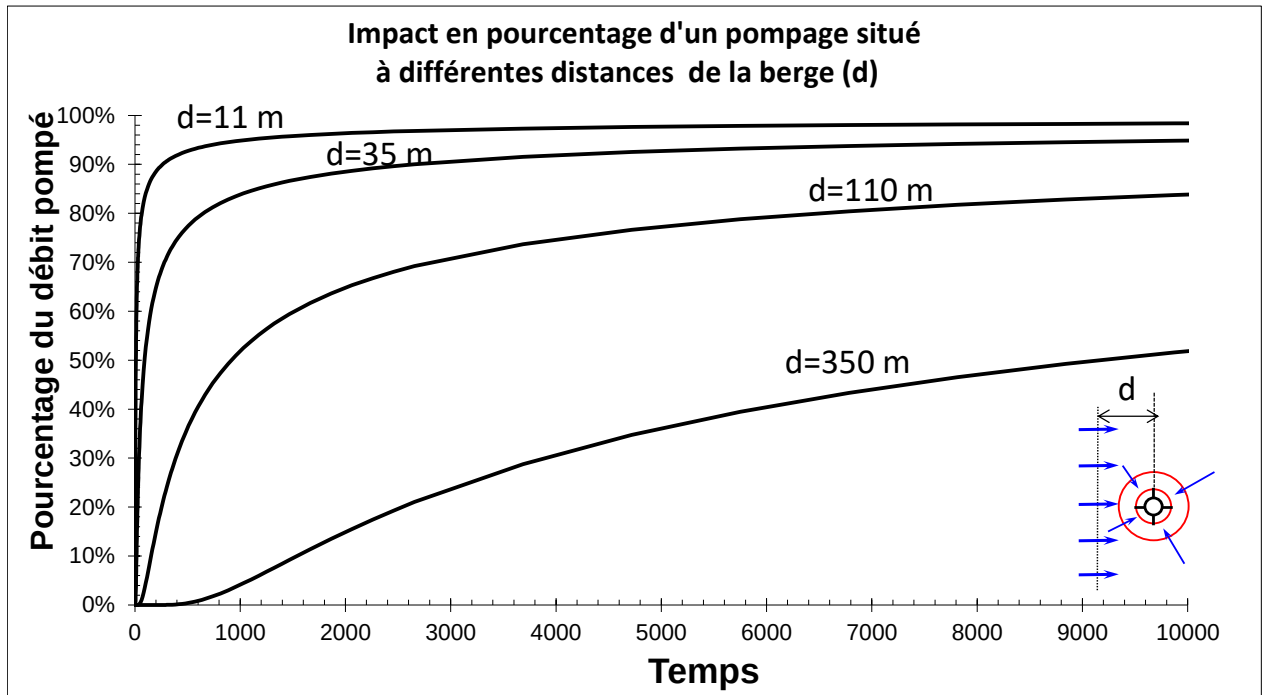


Figure 7 : évolution au cours du temps du « manque à gagner » pour le cours d'eau (en pourcentage du débit pompé) pour un pompage situé à différentes distances du cours d'eau. Modèles : cours d'eau incisant totalement l'aquifère (schéma 1 des figures précédentes).

Les solutions mathématiques ayant servi aux calculs des impacts (figures 4 à 6) sont présentées :

- au § 3.1.1 pour le schéma 1, aquifère homogène et cours d'eau incisant complètement l'aquifère (nappe semi-finie),
- au § 3.2.1 pour le schéma 2, aquifère homogène avec cours d'eau incisant complètement l'aquifère et limite de nappe,
- au § 3.2.2 pour le schéma 3, aquifère homogène avec deux cours d'eau parallèles incisant complètement l'aquifère,
- et au § 3.1.3 pour le schéma 4, aquifère homogène et cours d'eau incisant partiellement l'aquifère avec lit colmaté.

3. Impact quantitatif d'un pompage dans un aquifère sur les eaux de surface (cours d'eau) : les solutions mathématiques

L'un des travaux les plus exhaustifs qui a été réalisé dans ce domaine est très probablement celui de Lelièvre (1969), repris plus tard par Forkasiewicz et Peaudecerf (1976) et d'autres, où pas moins de 11 cas de figures sont traités. Inspiré de travaux antérieurs tels ceux de Collins (1959) ou de Hantush pour les cas où l'épaisseur aquifère n'est pas constante (Hantush, 1962 ; 1964 ; 1965), de nombreux autres cas traitent d'effets de limites étanches, correspondant à une ou deux limites latérales -parallèles entre elles ou bien sécantes- de la nappe d'accompagnement du cours d'eau. Néanmoins, dans toutes ces solutions le cours d'eau incise complètement l'aquifère. De nombreux abaques très pratiques de l'impact quantitatif sur le cours d'eau (ou un système d'eaux de surface) y sont présentés, ici seule une partie d'entre eux est reprise.

Il faudra attendre les années 2000 avec les travaux de Hunt (Hunt, 1999 ; 2003 ; 2004 ; 2009), de Butler (Butler et al., 2001; 2007) et d'autres pour voir apparaître d'autres solutions analytiques permettant de prendre en compte des situations plus complexes, telles que l'incision du cours d'eau, son colmatage - bien qu' Hantush (1965) en propose une solution approchée, de pompage dans des aquifères multicouches, etc.

L'ensemble de ces travaux, et les autres solutions exposées ci-après, présente tous des formulations mathématiques plus ou moins complexes de la part du cours d'eau s'infiltrant dans l'aquifère. Cependant, à partir du moment où une solution analytique est disponible pour le calcul du rabattement en tout point de l'espace pour un type d'aquifère donné, il est possible pour le cas où le cours d'eau incise complètement l'aquifère d'utiliser la théorie des images pour prendre en compte une ou plusieurs limites d'alimentation (voir par exemple, Ferris et al., 1962 ou Kruseman et de Ridder, 1994). Ensuite, il suffira de calculer par intégration la quantité d'eau s'infiltrant à chaque instant au niveau de la ou des limites d'alimentation (Figure 8) :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \int_{-\infty}^{+\infty} s(0, y, t) dy$$

Où ΔQ est le ratio de diminution du débit, Q , le débit de pompage et $s(0, y, t)$ le rabattement le long du cours d'eau.

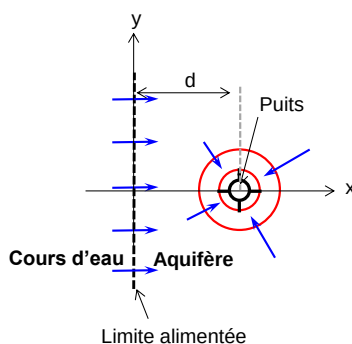


Figure 8 : schéma d'un aquifère (vue en plan) où le cours d'eau recoupe l'intégralité de l'aquifère ; $x=y=0$ sur la berge du cours d'eau.

C'est d'ailleurs de cette façon que fût proposée la première solution (Theis, 1941) qui sera repris plus tard par Glover et Balmer (1954). Par ailleurs, cette méthode peut aussi être utilisée pour évaluer la quantité d'eau infiltrée le long d'un tronçon de cours d'eau (Lelièvre, 1969), dans ce cas les bornes d'intégration ne seront plus $+\infty$ et $-\infty$, mais les ordonnées limites du tronçon.

Dans les parties qui suivent, les courbes types du rabattement et de l'impact sur le cours d'eau n'ont été réalisées que sur les modèles les plus utilisés ou jugés les plus représentatifs de cas naturels « généraux ». D'autres solutions sont également présentées sous forme d'abaques. Le cas échéant, pour ces autres solutions, le lecteur pourra se rapporter aux travaux cités pour plus d'informations.

Il faut noter que tous les modèles exposés, développés pour des milieux captifs (c'est-à-dire) sans évolution de l'épaisseur aquifère au cours du temps) sont applicables sur des aquifères captifs ou libres à condition que le rabattement dans l'aquifère au niveau de l'ouvrage pompé soit faible devant l'épaisseur de l'aquifère. En pratique, ces solutions donneront toujours de bons résultats si la désaturation de l'aquifère au niveau de l'ouvrage pompé n'excède pas 25% (Kruseman et de Ridder, 1994 ; Barlow et Leake, 2012).

Les courbes types des modèles présentés ci-après sont représentés en fonction du temps adimensionnel calculé en fonction du rayon du puits, t_D , et du rabattement adimensionnel, s_D , ainsi que de sa dérivée logarithmique, s_D' ($s_D' = \partial s / \partial \ln t$, Bourdet et al., 1983). Ceci permettra d'interpréter les courbes de dérivée de façon conventionnelle (Bourdarot, 1996 ; Bourdet, 2002).

Les relations entre le rabattement, le temps et les formes adimensionnelles sont :

$$t_D = \frac{tT}{Sr^2} \text{ et } s_D = \frac{2\pi T}{Q} s$$

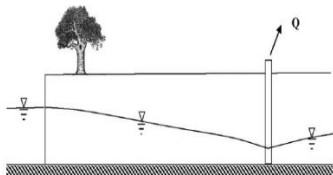
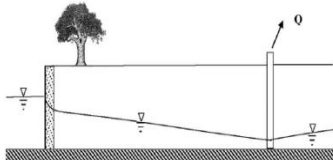
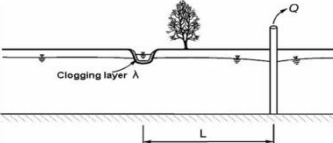
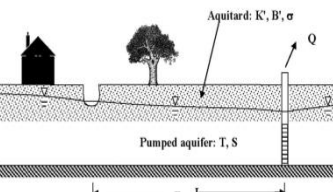
Où T et S sont les transmissivité et le coefficient d'emmagasinement (ou porosité efficace) de l'aquifère pompé, s , le rabattement à l'instant t , Q le débit de pompage, et r le rayon du puits.

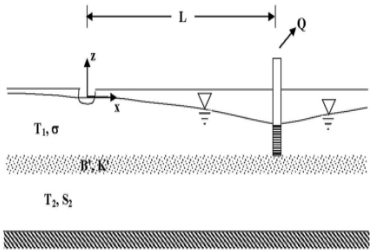
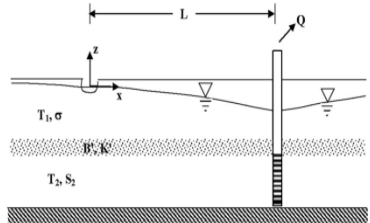
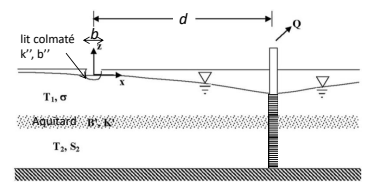
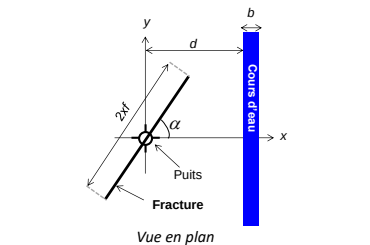
L'impact en termes de débit, adimensionnel, du pompage sur le cours d'eau est donné par le ratio $\frac{\Delta Q}{Q}$ avec ΔQ le ratio d'impact; il est donc proportionnel au débit pompé.

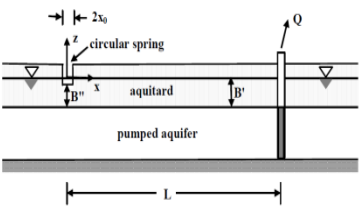
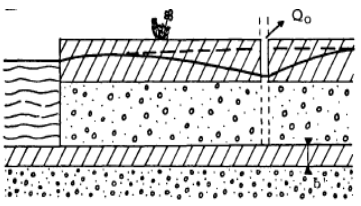
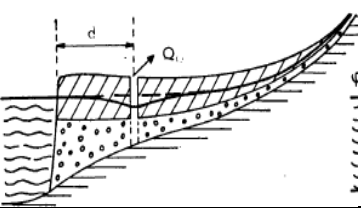
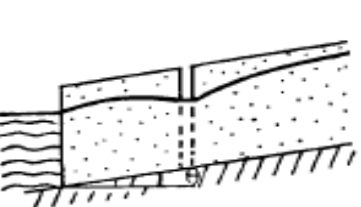
3.1. LES DIFFERENTS TYPES DE MODELES D'AQUIFERE

Le Tableau 1 présente les différents types de modèles d'aquifères qui ont été résolus dans la littérature, et les références où sont disponibles les solutions analytiques de l'impact en termes de débit sur le cours d'eau et de rabattement associé. Dans cette partie, les effets de limites liées à la géométrie des aquifères (limites étanches) ne sont pas présentés ; ils font l'objet de la partie suivante.

Les types d'aquifères

Types de modèles	Type d'aquifère	Géométrie de l'aquifère	Incision du cours d'eau dans l'aquifère	Solution de débit	Solution de rabattement
	Aquifère captif ou libre	horizontale	Complète	Theis, 1941; Glover-Balmer, 1954 Abaques disponibles : Lelièvre, 1969 ; Forkasiewicz, Peaudecerf, 1976	Theis, 1941
	Aquifère captif ou libre	horizontale	Complète + semi-perméable entre le cours d'eau et l'aquifère	Hantush, 1965 Abaques disponibles : Lelièvre, 1969 ; Forkasiewicz, Peaudecerf, 1976	Hantush, 1965
	Aquifère captif ou libre	horizontale	Incision du cours d'eau pouvant être négligeable devant l'épaisseur aquifère	Hunt, 1999 ; Hunt et al., 2001	Hunt, 1999 ; Hunt et al., 2001
	Aquifère semi-captif (type Boulton)	horizontale	Incision du cours d'eau négligeable devant l'épaisseur aquifère + semi-perméable entre le cours d'eau et l'aquifère	Hunt, 2003	Hunt, 2003

Types de modèle	Type d'aquifère	Géométrie de l'aquifère	Incision du cours d'eau dans l'aquifère	Solution de débit	Solution de rabattement
	Système multi-couche ; pompage dans l'aquifère supérieur	horizontale	Incision du cours d'eau négligeable devant l'épaisseur aquifère +semi-perméable entre le cours d'eau et l'aquifère	Hunt, 2009	Hunt, 2009
	Système multi-couche ; pompage dans l'aquifère inférieur	horizontale	Incision du cours d'eau négligeable devant l'épaisseur aquifère +semi-perméable entre le cours d'eau et l'aquifère	Ward et Lough, 2011	Ward et Lough, 2011
	Système multi-couche ; pompage dans l'aquifère supérieur et inférieur	horizontale	Incision du cours d'eau négligeable devant l'épaisseur aquifère +semi-perméable entre le cours d'eau et l'aquifère	BRGM (B.Dewandel)	BRGM (B.Dewandel)
 <i>Vue en plan</i>	Aquifère semi-captif (type Boulton), traversé par une fracture verticale	horizontale	Incision du cours d'eau négligeable devant l'épaisseur aquifère +semi-perméable entre le cours d'eau et l'aquifère	BRGM (B.Dewandel)	BRGM (B.Dewandel)

Types de modèle	Type d'aquifère	Géométrie de l'aquifère	Incision du cours d'eau dans l'aquifère	Solution de débit	Solution de rabattement
	Aquifère semi-captif (type Boulton)	horizontale	Impact sur le débit d'une source	Hunt, 2004	Hunt, 2004
	Aquifère semi-captif (type Hantush)	horizontale	Complète	Abaques disponibles : Lelièvre, 1969 ; Forkasiewicz, Peaudecerf, 1976	Hantush, 1965
	Aquifère captif ou libre	Variation uniforme de l'épaisseur	Complète	Abaques disponibles : Lelièvre, 1969 ; Forkasiewicz, Peaudecerf, 1976	Hantush, 1962
	Aquifère captif ou libre	Epaisseur aquifère homogène, faisant un angle avec le substratum	Complète	Abaques disponibles : Lelièvre, 1969 ; Forkasiewicz, Peaudecerf, 1976	Hantush, 1964

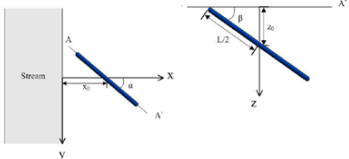
Types de modèle	Type d'aquifère	Géométrie de l'aquifère	Incision du cours d'eau dans l'aquifère	Solution de débit	Solution de rabattement
	Forage incliné	horizontale	Complète	Tsou et al., 2010	Tsou et al., 2010

Tableau 1 : les différents types de modèles d'aquifère.

3.1.1. Aquifère homogène et cours d'eau incisant complètement l'aquifère (nappe semi-finie)

Ce cas de figure représente le cas le plus simple, et de loin le plus utilisé. Il représente le cas d'un pompage dans un aquifère homogène et isotrope où le cours d'eau incise complètement l'aquifère et où le forage capte complètement l'aquifère. Dans ce modèle, l'écoulement du cours d'eau vers l'aquifère est parfait, et il est fait l'hypothèse que les lignes de courant dans l'aquifère sont horizontales (approximation de Dupuit).

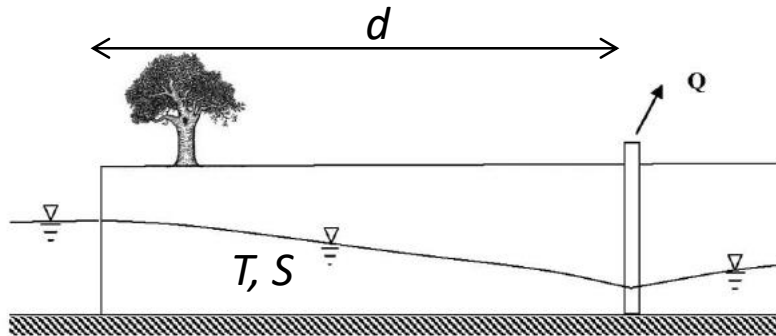


Figure 9 : nappe semi-finie, cours d'eau incisant complètement l'aquifère (Theis, 1941 ; Glover et Balmer, 1954). Schéma extrait de Hunt (2014).

Dans ce cas, l'évolution du rabattement au puits de pompage et l'impact sur le cours d'eau sont donnés respectivement par les formulations suivantes :

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \{W(u) - W(u')\} \quad \text{avec} \quad u = \frac{Sr_p^2}{4Tt}, \quad u' = \frac{S(2d)^2}{4Tt}$$

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \operatorname{Erfc} \sqrt{\frac{Sd^2}{4Tt}}$$

Où T et S sont respectivement la transmissivité et le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère, d la distance puits-rivière, r_p le rayon du puits et t le temps. Erfc est la fonction erreur complémentaire et $W(u)$ l'exponentielle intégrale. À noter que S est le coefficient d'emmagasinement (sans dimension), et non pas le coefficient d'emmagasinement intrinsèque de dimension $[L^{-1}]$.

La Figure 10 présente une série de courbes types de l'évolution du rabattement au puits de pompage et de sa dérivée, et de l'impact sur le cours d'eau pour un puits de pompage de plus en plus éloigné du cours d'eau (cas 1 à 4). Le cas 5 représente la solution de Theis (1935), c'est-à-dire sans l'effet d'un cours d'eau.

Au cours des premiers temps de pompage ($t_D < 1\,800$), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') sont en forme de « cloche » caractérisant les effets liés au puits (effet capacitif du puits), puis un écoulement radial s'établit, caractérisé par une droite horizontale des dérivées -ce qui veut aussi dire que le rabattement évolue suivant une droite dans un graphe semi-log. Enfin, pour les temps plus longs et à partir du moment où le rabattement atteint le cours d'eau, la dérivée diminue, indiquant que le rabattement évolue moins vite, et suit une pente de -1. La valeur de

cette pente est caractéristique de l'atteinte de ce type de limite d'alimentation. En conséquence lorsque cette succession d'écoulement est mise en évidence avec la dérivée, on pourra en conclure que le puits est situé dans un aquifère homogène, éventuellement anisotrope, à proximité d'une limite d'alimentation recoupant l'aquifère.

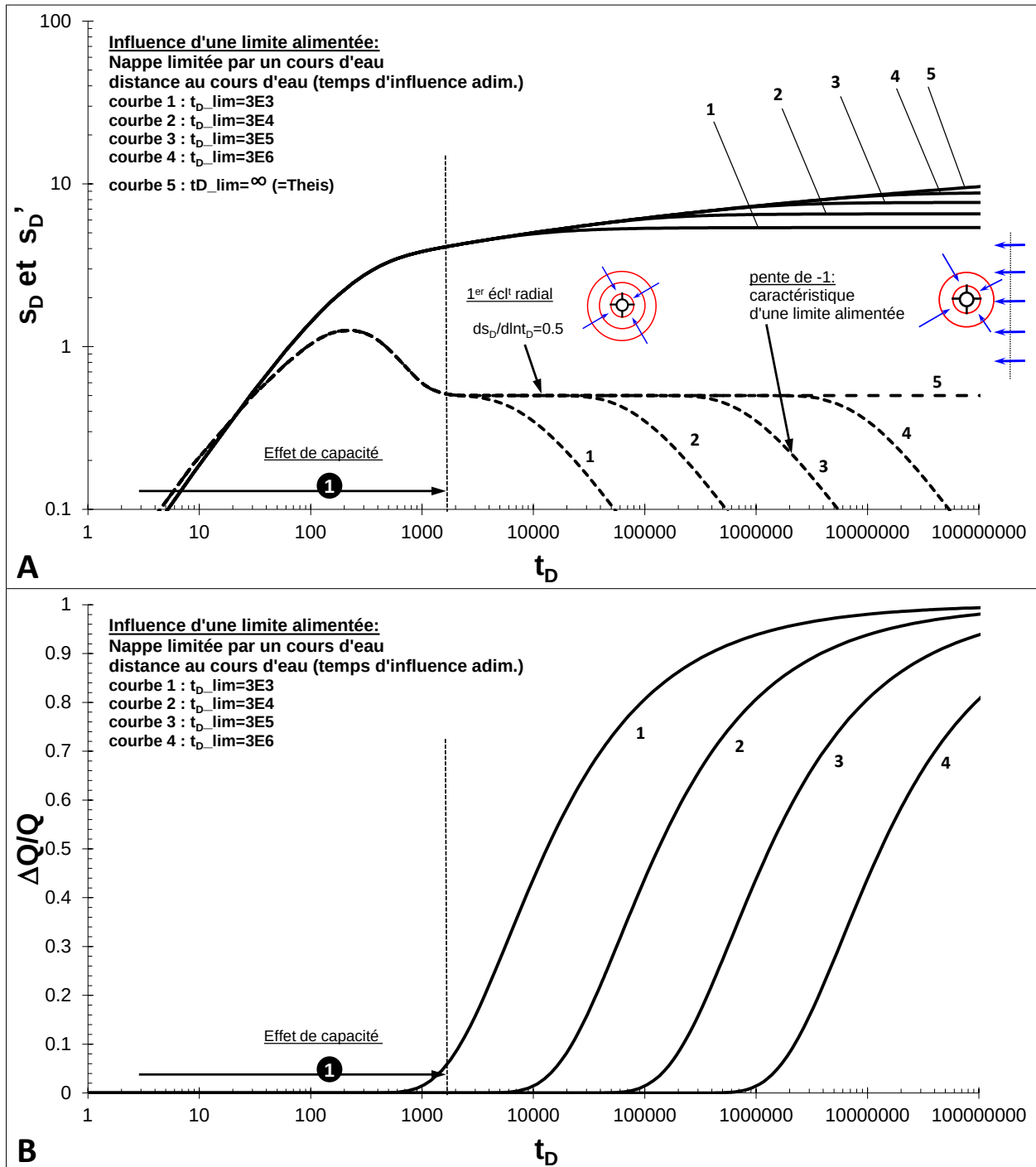


Figure 10 : nappe semi-finie, pour un pompage de plus en plus éloigné du cours d'eau. A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau.

s_D , s_D' : rabattement (trait plein) et dérivée (pointillés) adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

3.1.2. Aquifère homogène et cours d'eau incisant complètement l'aquifère avec berge colmatée

Ce cas de figure présente les mêmes caractéristiques que le cas précédent mais dans le cas où la berge entre l'aquifère et le cours d'eau est partiellement colmatée (Hantush, 1965 ; Figure 11). Dans ce modèle, il est aussi fait l'hypothèse que les lignes de courant dans l'aquifère sont horizontales (approximation de Dupuit).

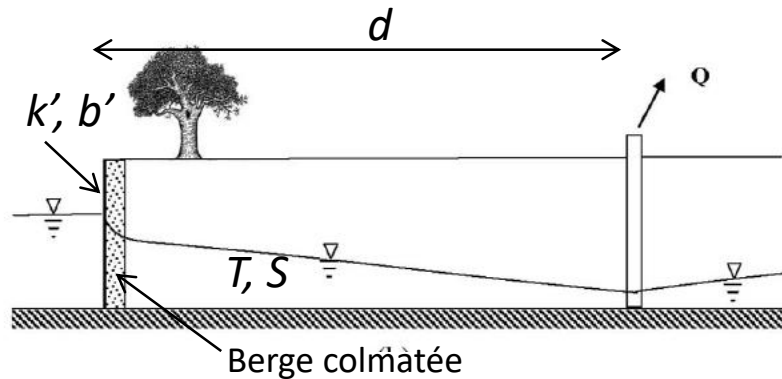


Figure 11 : nappe semi-finie, cours d'eau incisant complètement l'aquifère avec berge colmatée (Hantush, 1965). Schéma extrait de Hunt (2014).

L'évolution du rabattement au puits de pompage est :

$$s(r,t) = \frac{Q}{4\pi T} \{W(u) - W(u') + 2J^*(\alpha)\}$$

$$\text{avec } u = \frac{Sr_p^2}{4Tt}, \quad u' = \frac{S(2d)^2}{4Tt} ; \quad J^*(\alpha) = 2 \int_1^\infty \text{Exp}\left(-\alpha(\theta-1) - \frac{Sd^2}{tT}\theta^2\right) \frac{d\theta}{\theta}$$

$$\alpha = 2d/R ; \text{ où } R \text{ est le coefficient de retard, } R = \frac{k}{k'}b'.$$

où k est la perméabilité de l'aquifère, et k' et b' respectivement, la perméabilité et l'épaisseur de la berge semi-perméable. Exp est la fonction exponentielle.

Et l'évolution de l'impact sur le cours d'eau est donné par :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \text{Erfc}\sqrt{\frac{Sd^2}{4Tt}} - \text{Exp}\left(\frac{Tt}{SR^2} + \frac{d}{R}\right) \text{Erfc}\left(\sqrt{\frac{Tt}{SR^2}} + \sqrt{\frac{Sd^2}{4Tt}}\right)$$

La Figure 12 présente une série de courbes types de l'évolution du rabattement au puits de pompage et de sa dérivée, et de l'impact sur le cours d'eau pour différentes valeurs du coefficient R (cas 1 à 6). Le cas 6 représente la solution où la limite avec le cours d'eau est étanche ($R \rightarrow \infty$), on retrouve ainsi la solution de Theis + une limite étanche. Dans ces modèles le cours d'eau est toujours situé à la même distance.

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 30\,000$), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent successivement les effets liés à la capacité du puits, puis un écoulement radial. Ensuite, pour les temps plus longs et à partir du moment où le rabattement atteint le cours d'eau, la dérivée augmente d'abord si la berge est peu perméable traduisant l'effet d'une limite peu perméable, puis diminue progressivement indiquant que le rabattement évolue de moins en moins vite en raison de l'alimentation par le cours d'eau. Par le cas où le coefficient R est faible (courbe 1), on ne voit pas l'augmentation de la dérivée car il n'y a pas suffisamment de contraste entre la perméabilité de l'aquifère et celle de la berge. On notera que moins la berge est perméable (fortes valeurs de R), plus l'échange entre le cours d'eau et l'aquifère est faible, et donc que le rabattement prend plus de temps à stabiliser. Cela se traduit par une plus faible contribution du cours d'eau à l'aquifère. Dans le cas où R tend vers l'infini, dans ce cas la berge est étanche (courbe 6 ; Theis + une limite étanche), il n'y a plus de contribution du cours d'eau. Pour les temps longs la pente du rabattement double dans un graphe semi-logarithmique, ce qui se traduit par un doublement de la valeur du plateau de la dérivée.

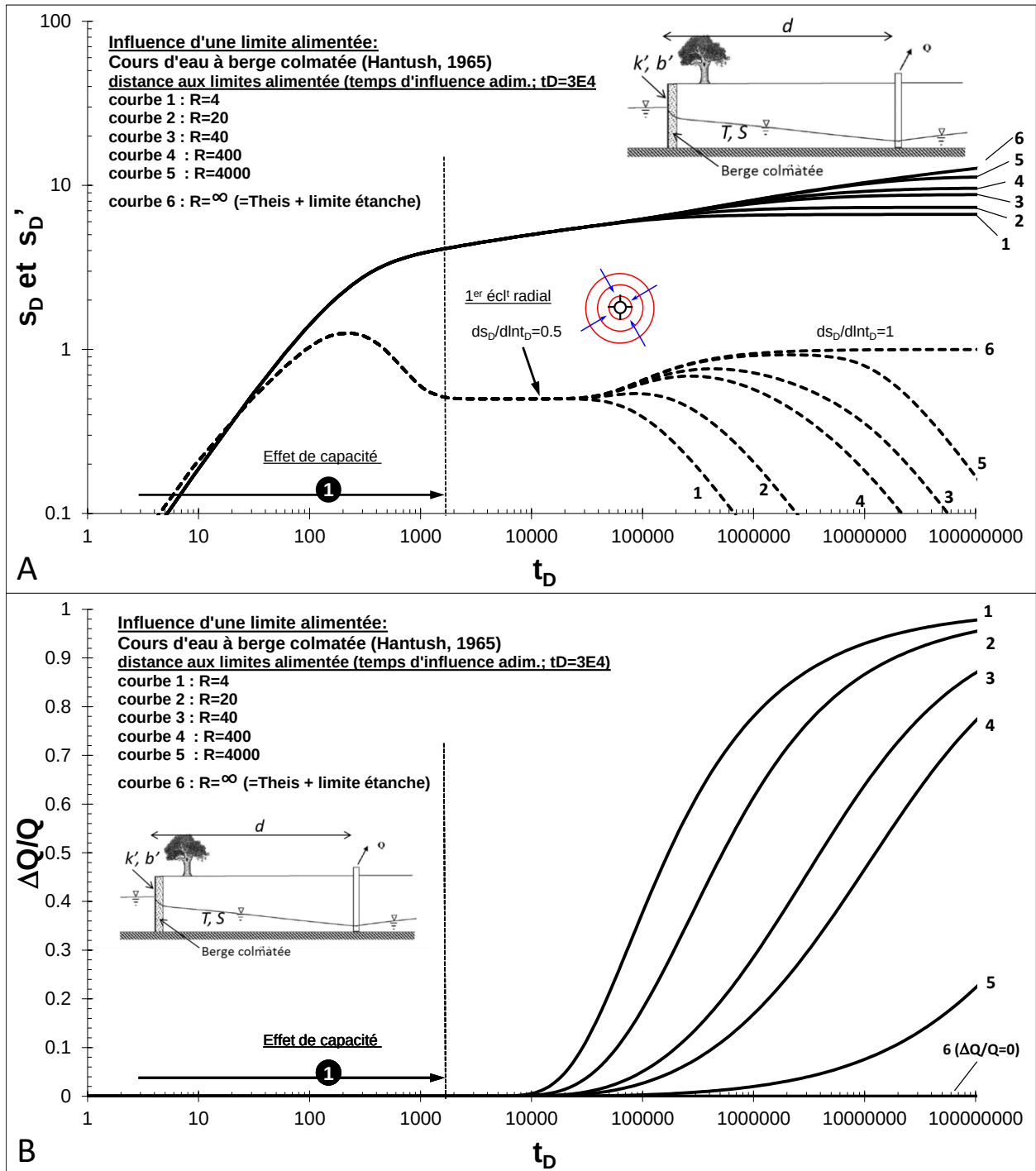


Figure 12 : cours d'eau incisant totalement l'aquifère avec berge colmatée pour différentes valeurs de R (Hantush, 1965). A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s'_D), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance.

s_D , s'_D : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

3.1.3. Aquifère homogène et cours d'eau incisant partiellement l'aquifère avec lit colmaté

Dans ce cas (Hunt, 1999), l'aquifère est toujours homogène et isotrope, mais le cours d'eau ne l'incise que partiellement (Figure 13). Ainsi, le rabattement peut se propager de l'autre côté du cours d'eau. Dans ce modèle, il est fait l'hypothèse que les lignes de courant dans l'aquifère sont horizontales (approximation de Dupuit). Le lit du cours d'eau peut aussi être partiellement colmaté.

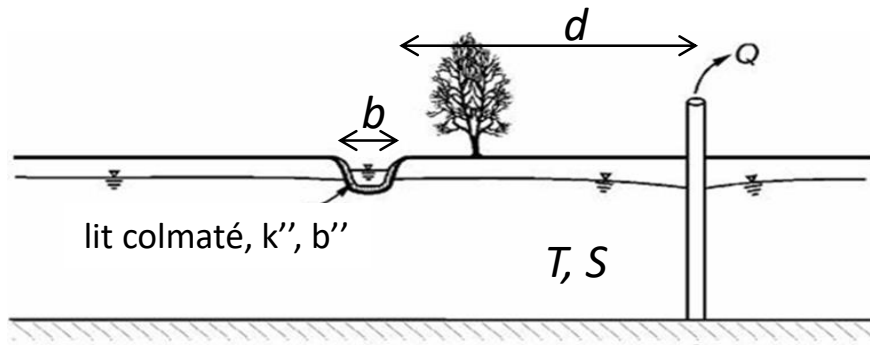


Figure 13 : cours d'eau incisant partiellement l'aquifère avec lit colmaté (Hunt, 1999). Schéma extrait de Hunt (2014).

Les solutions du rabattement et de l'impact sur le cours d'eau sont (Hunt, 1999 ; Hunt et al., 2001) :

$$s(x, y, t) = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W \left(\frac{[(d-x)^2 + y^2]}{4Tt/S} \right) - \int_0^\infty \text{Exp}(-\theta) W \left(\frac{[(d+|x| + 2T\theta/\lambda)^2 + y^2]}{4Tt/S} \right) d\theta \right\}$$

où x et y sont les coordonnées du puits ou du piézomètre d'observation dans le référentiel $x=0$ au niveau du cours d'eau et y le long du cours d'eau.

Et :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \text{Erfc} \sqrt{\frac{Sd^2}{4Tt}} - \text{Exp} \left(\frac{\lambda^2 t}{4ST} + \frac{\lambda d}{2T} \right) \text{Erfc} \left(\sqrt{\frac{\lambda^2 t}{4ST}} + \sqrt{\frac{Sd^2}{4Tt}} \right)$$

Où λ est le coefficient de drainance ou de conductance du cours d'eau, $\lambda = \frac{b}{b''} k''$ avec b , la largeur du cours d'eau, k'' et b'' respectivement la perméabilité et l'épaisseur du lit du cours d'eau. Notons que b'' peut aussi être l'épaisseur de l'aquifère sous le cours d'eau, et k'' , la perméabilité de l'aquifère.

On notera que cette solution d'impact sur le cours d'eau est identique à la solution précédente en posant $\lambda = 2T/R$. Elle est aussi identique à celle de Theis (1941) en posant k' ou $k'' \rightarrow \infty$ (donc $\lambda \rightarrow \infty$). En somme, cette solution admet deux cas particuliers, qui sont les deux cas précédents.

La Figure 14 présente une série de courbes types de l'évolution du rabattement au puits de pompage et de sa dérivée, et de l'impact sur le cours d'eau pour différentes valeurs du coefficient

λ (cas 1 à 6). Le cas 6 représente la solution d'un cours incisant complètement l'aquifère avec contact parfait entre le cours d'eau et l'aquifère (solution de Theis, 1941 ; 3.1.1, Figure 9). Dans ces modèles le cours d'eau est toujours situé à la même distance.

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 30\,000$), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent successivement les effets liés à la capacité du puits, puis un écoulement radial. Ensuite, pour les temps plus longs et à partir du moment où le rabattement atteint le cours d'eau, la dérivée diminue progressivement, indiquant que le rabattement évolue de moins en moins vite mais avec une pente supérieure à -1. On notera que plus l'échange entre le cours d'eau et l'aquifère est faible (faible valeur de λ), plus le rabattement prend du temps à stabiliser. Par conséquent cela se traduit par une plus faible contribution du cours d'eau à l'aquifère. Ainsi, les courbes de dérivée du rabattement montrent qu'il est possible de faire la différence entre un cours d'eau qui incise totalement et partiellement un aquifère, ou encore que la berge de ce dernier est colmatée.

Astuce mathématique

L'évaluation numérique de l'intégrale dans la solution du rabattement peut s'avérer être complexe en raison de sa borne supérieure située à l'infini. Une astuce pour résoudre ce type d'intégrale consiste à procéder au changement de variable suivant :

$$\theta = -Ln(u) \text{ donc } d\theta = -\frac{1}{u} du ; Ln = \text{logarithme népérien.}$$

Les bornes 0 et ∞ deviennent respectivement 1 et 0.

$$\text{Et } \int_0^{\infty} \text{Exp}(-\theta) W\left(\frac{[(d + |x| + 2T\theta/\lambda)^2 + y^2]}{4Tt/S}\right) d\theta \text{ devient } \int_1^0 W\left(\frac{[(d + |x| - 2TLn(u))/\lambda]^2 + y^2]}{4Tt/S}\right) du$$

Une intégrale plus facile à résoudre et aux bornes finies.

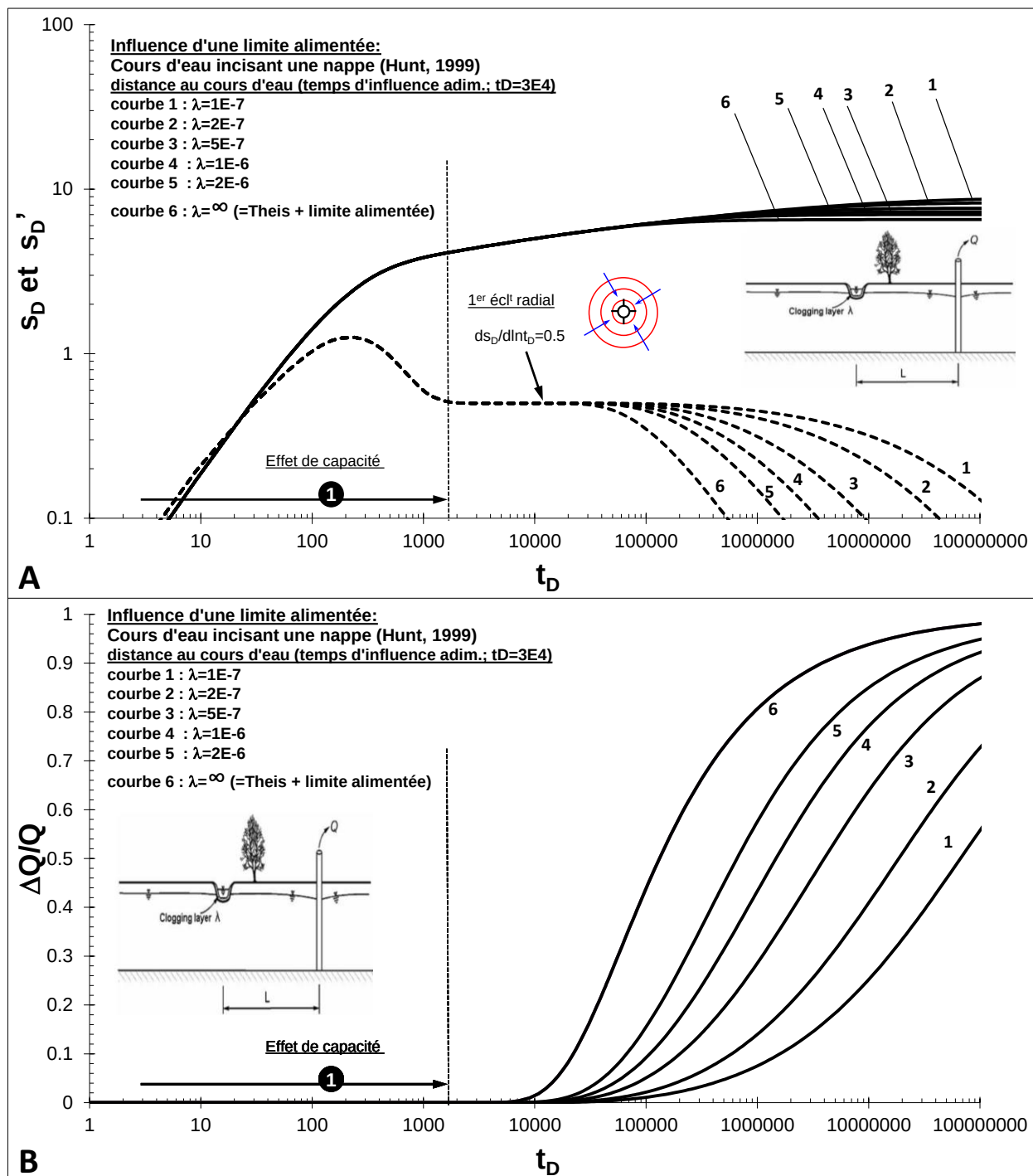


Figure 14 : cours d'eau incisant partiellement l'aquifère avec lit colmaté pour différentes valeurs de λ (Hunt, 1999). A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance.

s_D, s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

3.1.4. Aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface

Dans ce cas (Hunt, 2003), l'aquifère est cette fois-ci un multicouche. L'aquifère pompé est toujours homogène et isotrope, mais le cours d'eau incise ici partiellement un aquitard de surface (Figure 15). L'aquitard de surface est de type Boulton (Boulton, 1973), c'est-à-dire peu perméable comparé à la perméabilité de l'aquifère, mais poreux.

Comme dans le modèle précédent, le rabattement peut se propager de l'autre côté du cours d'eau. Dans ce modèle, il est fait l'hypothèse que le cours d'eau a une faible incision comparée à l'épaisseur de l'aquifère, et que les lignes de courant dans l'aquifère sont horizontales. Le lit du cours d'eau peut aussi être partiellement colmaté.

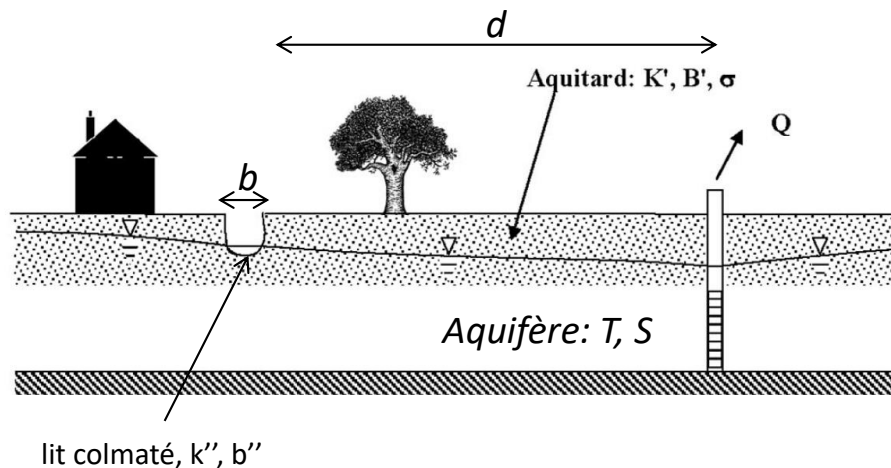


Figure 15 : cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt, 2003).

Les solutions sont données pour le rabattement dans l'aquifère pompé et l'aquitard, et l'impact sur le cours d'eau. Cependant, celles-ci sont plus complexes et nécessitent l'inversion de transformées de Laplace. Néanmoins, ces solutions sont disponibles dans la référence citée et sur le site de l'auteur (B. Hunt ; <http://www.civil.canterbury.ac.nz/staff/bhunt.shtml>).

Dans ce modèle (Figure 15), K' et B' sont respectivement la perméabilité et l'épaisseur de l'aquitard, σ son coefficient d'emmagasinement, k'' et b'' respectivement la perméabilité et l'épaisseur du lit du cours d'eau et b sa largeur. b'' peut aussi être l'épaisseur de l'aquifère sous le cours d'eau, et k'' , de l'aquitard ; ceci est aussi valable pour les autres schémas du même type (cf. configurations des autres paragraphes).

Le calcul de l'évolution de l'impact sur le cours d'eau au cours du temps est obtenu par l'intégrale suivante :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \lambda \int_{-\infty}^{+\infty} s(0, y, t) dy \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{b}{b''} k''$$

Où ΔQ est le ratio de diminution du débit en fonction du temps, Q , le débit de pompage et $s(0, y, t)$ le rabattement le long du cours d'eau.

Cette solution permet de résoudre le problème pour un schéma aquifère relativement complexe, et permet aussi de résoudre les trois cas précédents. En effet, elle peut être utilisée pour

reproduire le schéma de la Figure 9 (cours d'eau incisant complètement l'aquifère) en posant $K'=0$, et $\sigma=S$ et $\lambda \rightarrow \infty$ (par ex. 10 000) ou celui de la Figure 11 ou Figure 13 en posant $K'=0$ et $\sigma=S$. De plus, cette solution utilise un aquitard de type Boulton, donc que le niveau de ce dernier va s'abaisser durant le pompage, ce qui est beaucoup plus réaliste qu'avec un modèle de type Hantush (Hantush, 1964) où a contrario le niveau ne s'abaisse pas (dans ce cas $\sigma \rightarrow \infty$).

Ainsi cette solution offre un panel de schémas hydrogéologiques réalistes vis-à-vis de situations que l'on peut rencontrer dans le milieu naturel. C'est donc une solution à privilégier.

La Figure 16 présente une série de courbes types du modèle proposé pour différents coefficients de drainance du cours d'eau λ (cas 1 à 5). Le cas 1 représente le cas où ce coefficient est très faible alors que le cas 5 celui d'un cours d'eau incisant complètement l'aquifère (Theis, 1941 ; facteur de drainance, Br et $\lambda \rightarrow \infty$). Dans les illustrations qui suivent le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m) et les paramètres de l'aquitard sont constants (cf. Figure 16). A l'aide des solutions mathématiques proposées, d'autres courbes types pourront être établies pour d'autres paramètres aquifères et d'autres distances au cours d'eau.

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 5\,000$), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent successivement les effets liés à la capacité du puits, puis un écoulement radial. Ensuite, pour les temps plus longs et avant que ne soit perçue la drainance en provenance du cours d'eau, la courbe de dérivée forme une sorte de « V » traduisant l'alimentation induite par l'aquitard de surface. Il s'agit d'un effet de drainance qui va momentanément créer une pseudo-stabilisation du rabattement dans l'aquifère pompé suivie d'une ré-augmentation. Enfin lorsque le rabattement dans l'aquifère est suffisant pour créer un gradient au niveau du cours d'eau, un flux s'instaure entre le cours d'eau, l'aquitard et l'aquifère pompé, induisant une nouvelle stabilisation du niveau et donc une nouvelle diminution de la dérivée. Dans le cas 1 (lit du cours d'eau très peu perméable), la dérivée du rabattement forme un deuxième écoulement radial, qui correspond à la réponse globale de l'aquifère en l'absence de cours d'eau (Figure 16).

On note aussi que cette solution peut aussi servir à résoudre le cas de plusieurs niveaux peu perméables entre l'aquifère pompé et l'aquitard (Lough et Hunt, 2006). Dans ce cas les paramètres de drainance de l'aquitard seront une moyenne de l'ensemble des niveaux semi-perméables, la valeur du coefficient λ en sera aussi moyennée.

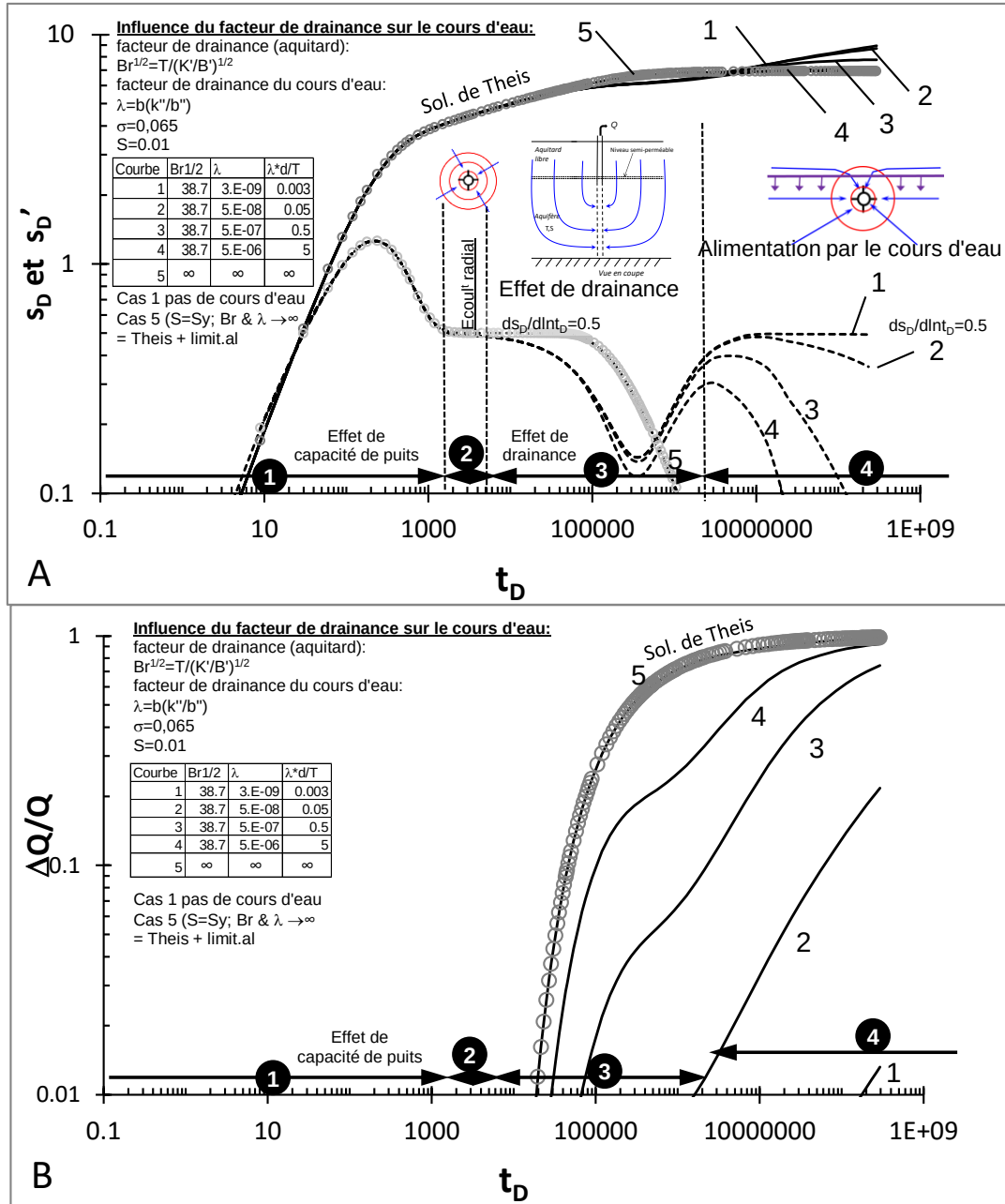


Figure 16 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt, 2003). Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s'_D), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m).

s_D, s'_D : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

3.1.5. Aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère supérieur

Ce cas correspond à la solution développée par Hunt (2009). Le cours d'eau incise partiellement un aquifère de surface qui est pompé (Figure 17). Sous-jacent à cet aquifère, il y a un aquitard puis un aquifère profond non-pompés. Dans ce modèle, il est fait l'hypothèse que le cours d'eau à une faible incision comparée à l'épaisseur de l'aquifère pompé, et que les lignes de courant dans l'aquifère sont horizontales. Le lit du cours d'eau peut aussi être partiellement colmaté.

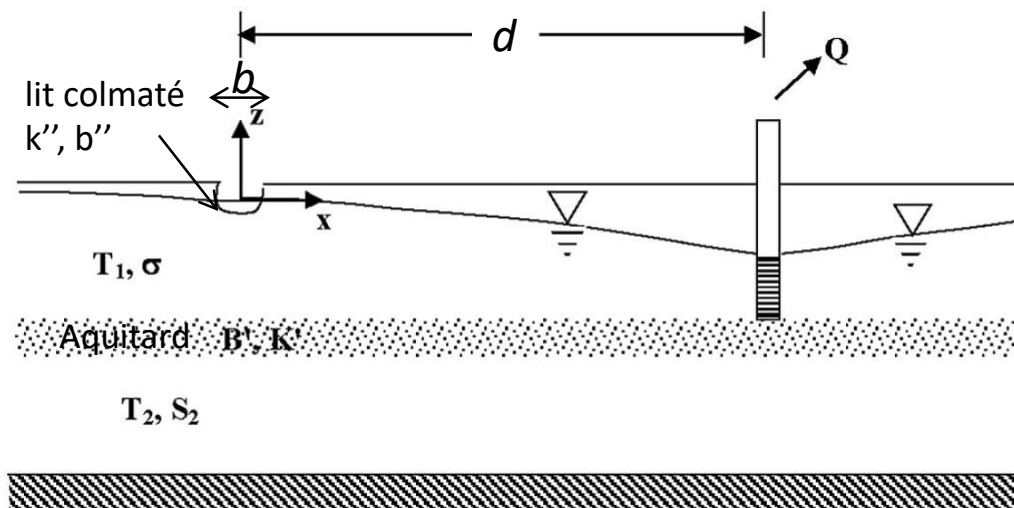


Figure 17 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère supérieur (Hunt, 2009).

Les solutions sont données pour le rabattement dans l'aquifère pompé et l'aquifère profond, et l'impact sur le cours d'eau. Cependant, celles-ci sont plus complexes car nécessitant l'inversion de transformées de Laplace. Ces solutions sont disponibles dans la référence citée et sur le site de l'auteur (B. Hunt ; <http://www.civil.canterbury.ac.nz/staff/bhunt.shtml>). Comme les autres codes et solutions, ces codes ont été testés et il s'est avéré que la méthode de quadrature proposée par l'auteur pour résoudre la principale intégrale n'était pas du tout satisfaisante pour le rabattement de piézomètres situés à approximativement moins de 10 m du puits. Par conséquent, au puits aussi, la modalité de calcul proposée n'est pas satisfaisante. De ce fait, d'autres méthodes d'intégration numérique ont été testées et c'est une quadrature Gauss-Legendre à pas d'intégration variables (loi polynomiale) qui a montré les résultats les plus satisfaisants, bien que parfois il y ait un peu d'instabilité numérique. Pour valider cette méthode de calcul, divers tests ont été réalisés en considérant les schémas précédents et des solutions d'aquifères multicouches sans cours d'eau. Cependant, il est possible que d'autres méthodes soient encore plus performantes. Aucun problème particulier n'a été constaté sur le code de résolution de l'impact sur le cours d'eau.

Dans ce modèle (Figure 17), T_1 et σ sont respectivement la transmissivité et le coefficient d'emménagement (ou porosité) de l'aquifère de surface, T_2 et S_2 , ceux de l'aquifère profond, K' et B' la perméabilité et l'épaisseur de l'aquitard, et, k'' et b'' la perméabilité et l'épaisseur du lit du cours d'eau et b sa largeur.

Le calcul de l'évolution de l'impact sur le cours d'eau au cours du temps est obtenu par l'intégrale suivante :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \lambda \int_{-\infty}^{+\infty} s(0, y, t) dy \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{b}{b''} k''$$

Où ΔQ est le ratio de diminution du débit en fonction du temps, Q , le débit de pompage et $s_1(0, y, t)$ le rabattement le long du cours d'eau dans l'aquifère pompé.

Cette solution permet de résoudre le problème pour un schéma aquifère encore plus complexe que dans les cas précédents, mais il permet aussi de les résoudre. On note aussi que la solution décrite à la Figure 13 (Hunt, 1999) peut être utilisée pour décrire ce système en remplaçant la transmissivité unique par la somme des deux transmissivités ($T_1 + T_2$). Il en est de même pour l'utilisation de la solution de Hunt (2003) décrite à la Figure 15. De plus, on notera que la solution de Butler et al. (2007), où l'aquifère profond est remplacé par un aquitard, correspond à un cas particulier de cette solution avec T_2 ou $S_2 \rightarrow \infty$.

La Figure 18 présente une série de courbes types du modèle proposé pour différents coefficients de drainance du cours d'eau λ (cas 1 à 6). Le cas 6 représente la solution de Theis, (1941) ; $\lambda \rightarrow \infty$. Dans les illustrations qui suivent le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m) et les paramètres des aquifères sont constants (cf. Figure 18). Pour d'autres paramètres aquifères et/ou d'autres distances au cours d'eau, il conviendra de recalculer d'autres courbes à partir des solutions proposées.

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 100$), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent l'écoulement radial ; ici il n'a pas été calculé d'effet de capacité lié au puits. Ensuite, pour les temps plus longs et avant que ne soit perçue la drainance en provenance du cours d'eau, la courbe de dérivée diminue légèrement avant de former, si le cours d'eau est peu drainant (courbe 1, faible valeur de λ), un second plateau fonction de la somme des transmissivités du système ($T_1 + T_2$). Dans l'exemple donné, la transmissivité des deux aquifères étant la même, la valeur du plateau est donc divisée par deux. Ensuite, les dérivées diminuent à nouveau, cette fois à cause de l'infiltration de l'eau du cours d'eau dans le système.

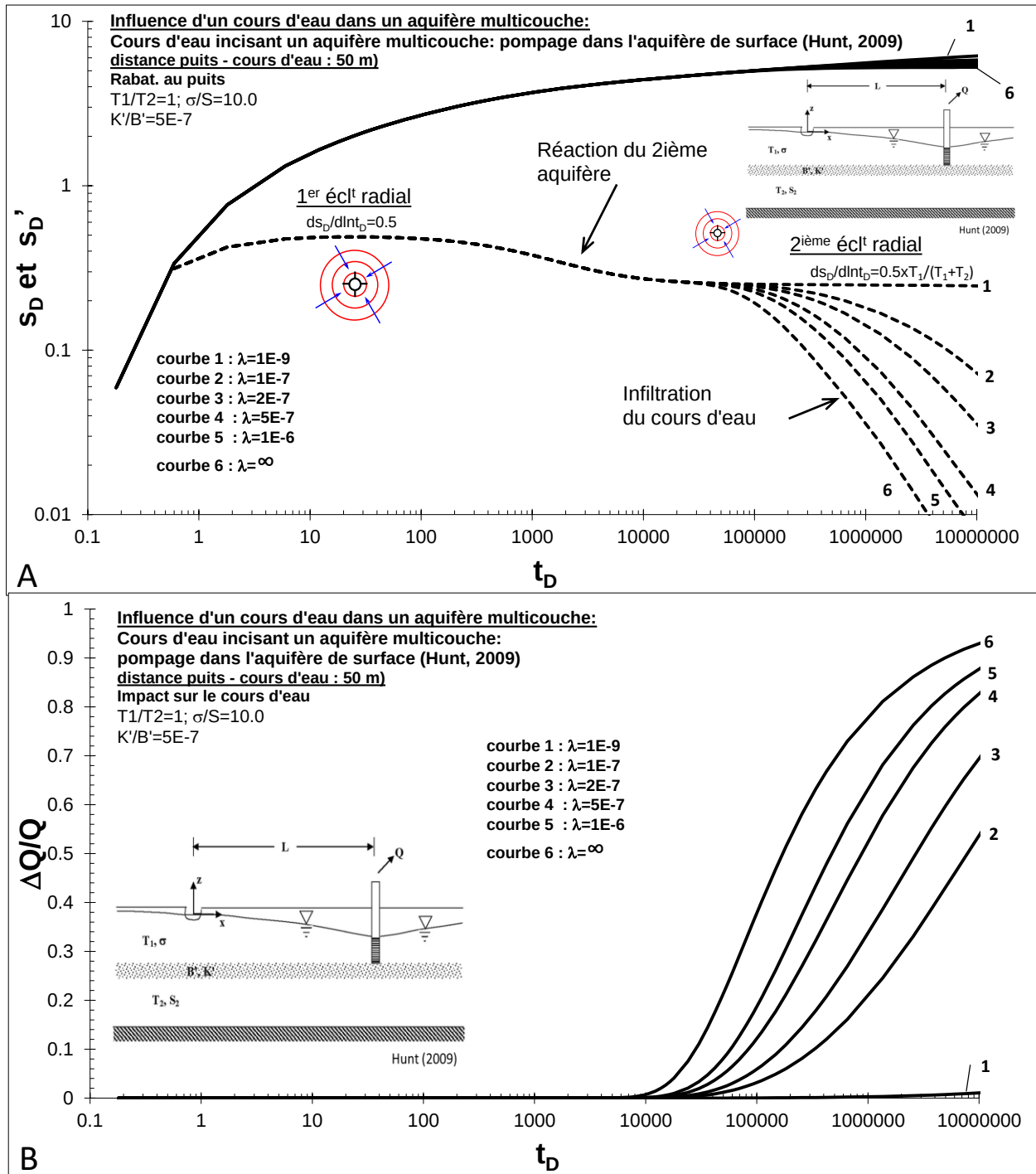


Figure 18 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère supérieur (Hunt, 2009). Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m).

s_D, s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

3.1.6. Aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère profond

Ce cas correspond au même cas que précédemment mais avec un pompage dans l'aquifère inférieur (Ward et Lough, 2011).

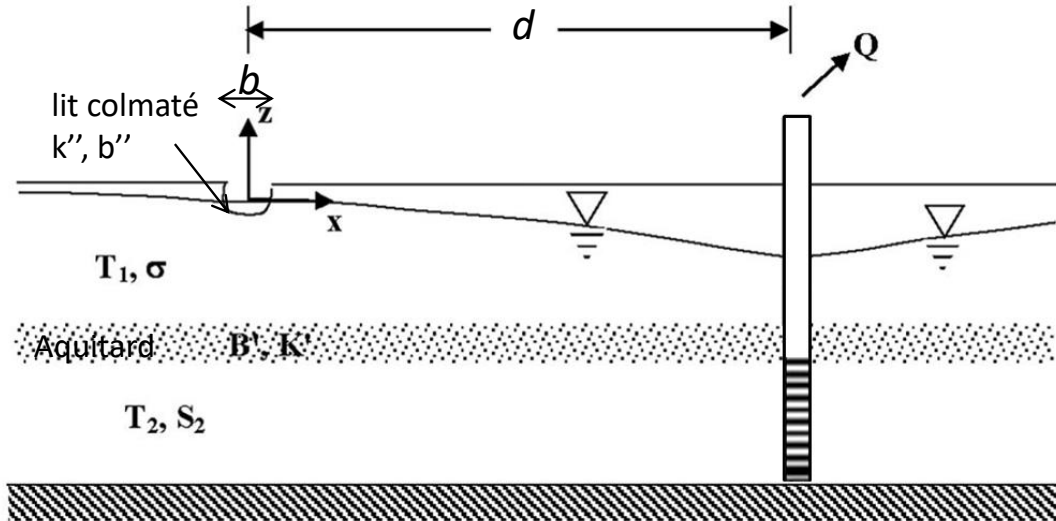


Figure 19 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère inférieur (Ward et Lough, 2011).

Les solutions sont données pour le rabattement dans l'aquifère pompé et l'aquifère profond, et l'impact sur le cours d'eau. Celles-ci sont complexes mais les solutions sont disponibles dans la référence citée et sur le site de B.Hunt (<http://www.civil.canterbury.ac.nz/staff/bhunt.shtml>). Par contre, nous avons fait le même constat que précédemment pour la résolution du calcul du rabattement, le même algorithme de résolution que proposé précédemment a donc été utilisé après avoir été testé. Rien n'est à signaler de particulier en ce qui concerne l'évaluation de l'impact sur le cours d'eau.

Le calcul de l'évolution de l'impact sur le cours d'eau au cours du temps est obtenu par l'intégrale suivante :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \lambda \int_{-\infty}^{+\infty} s(0, y, t) dy \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{b}{b''} k''$$

Cette solution a des propriétés similaires à la solution précédente, et peut reproduire aussi des cas plus simples comme ceux de Hunt (1999) ou Hunt (2003), en jouant sur les valeurs de T_1 et λ . Elle peut aussi être combinée à la solution précédente pour permettre de résoudre le cas de pompages dans des ouvrages captant les deux aquifères (voir par exemple la solution suivante).

La Figure 20 présente une série de courbes types pour le modèle proposé et différents coefficients de drainance du cours d'eau λ (cas 1 à 6). Dans les illustrations qui suivent le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m) et les paramètres des aquifères sont constants (cf. Figure 20). Les paramètres des aquifères du modèle proposé sont les mêmes que ceux du cas précédents (Figure 18), mais avec cette fois avec un pompage dans l'aquifère profond.

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 100$), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent l'écoulement radial ; ici il n'a pas été calculé d'effet de capacité lié au puits. Ensuite, pour les temps plus longs et avant que ne soit perçue la drainance en provenance du cours d'eau, la courbe de dérivée forme une « V » caractéristique de l'effet de drainance de l'aquifère supérieur, celui-ci est similaire à celui de la solution de Hunt 2003 (Figure 16). Puis, si l'effet de drainance lié au cours d'eau n'a pas encore débuté (courbe 1 ; faible valeur de λ), on observe un deuxième plateau de la dérivée, qui comme dans le cas précédent est fonction de la somme des transmissivités du système ($T_1 + T_2$). Ensuite, les dérivées diminuent à nouveau, mais à cause de l'infiltration de l'eau du cours d'eau dans le système. On notera, comparé à l'exemple du modèle précédent (Figure 18), la plus faible contribution du cours d'eau à cause de la présence de l'aquitard entre l'aquifère pompé et le cours d'eau.

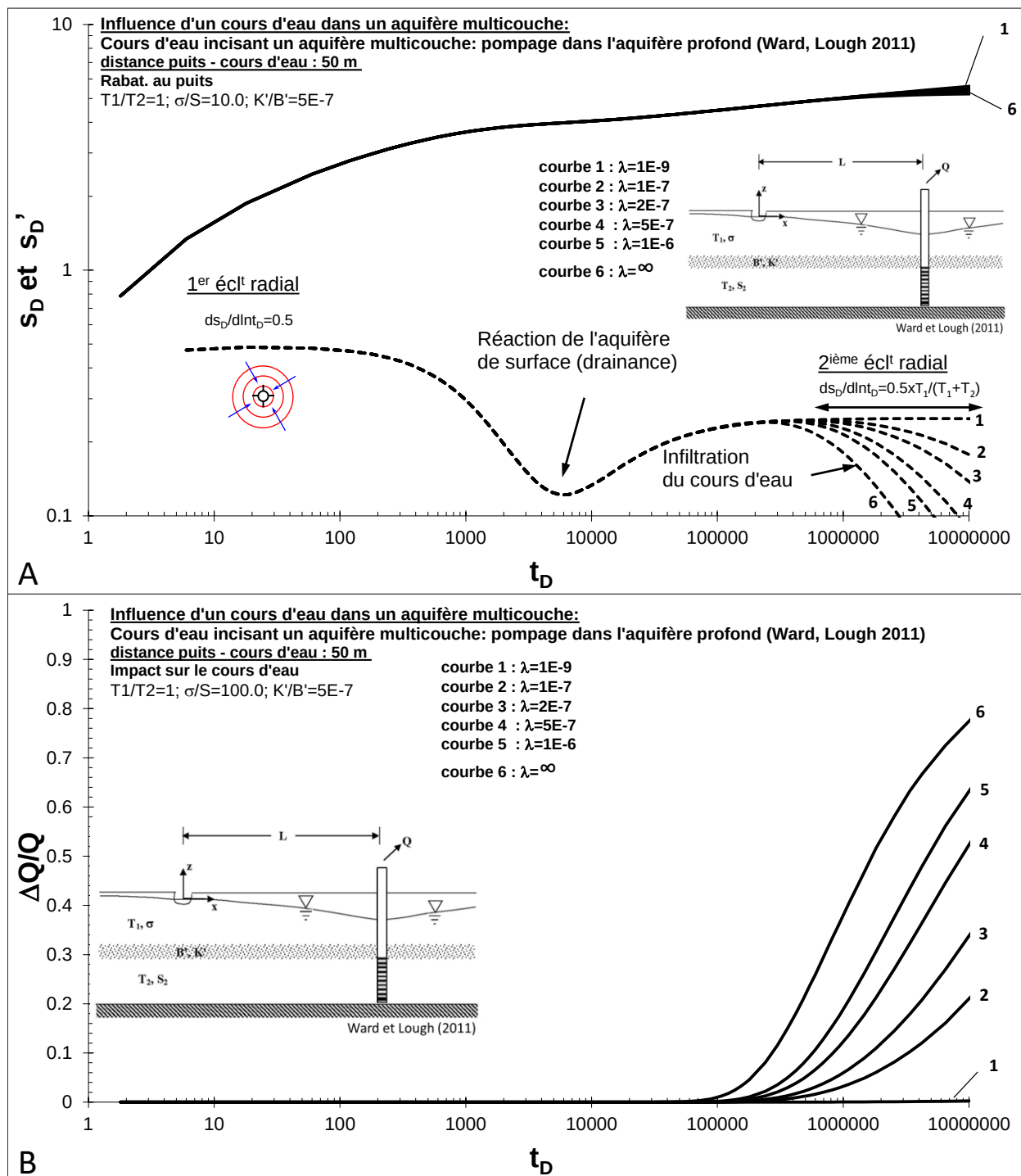


Figure 20 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère inférieur (Ward et Lough, 2011). Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (sD) au puits de pompage et de sa dérivée (sD'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m).

s_D, s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

3.1.7. Aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans l'aquifère profond et l'aquifère de surface

Ce cas correspond au cas où à la fois les aquifères supérieur et inférieur sont pompés (Figure 21). Les paramètres du modèle sont identiques aux cas précédents (§ 3.1.5 et 3.1.6). La solution pour ce problème, développée par l'auteur de ce rapport, est obtenue en utilisant le principe de superposition des rabattements à partir des solutions proposées par Hunt (2009) pour le pompage dans l'aquifère de surface et, par Ward et Lough (2011) pour le pompage dans l'aquifère profond.

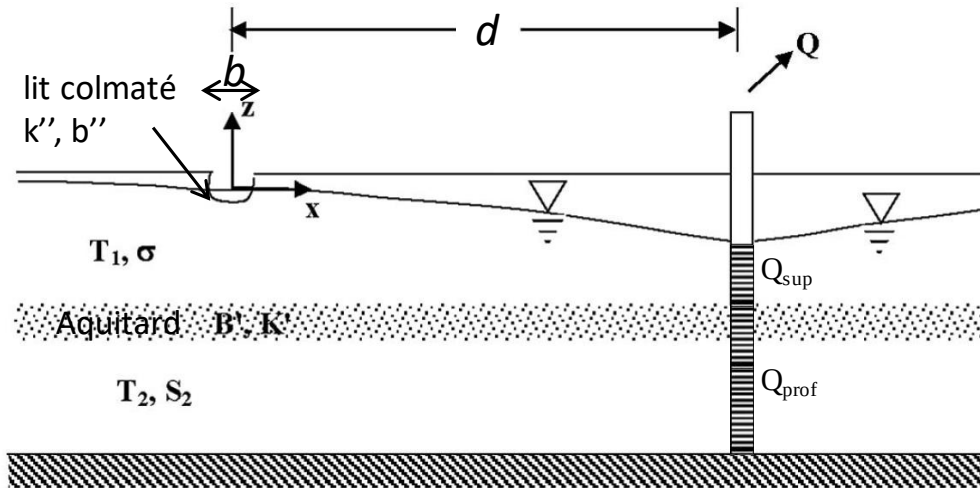


Figure 21 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans les deux niveaux aquifères.

Dans ce modèle (Figure 21), T_1 et σ sont respectivement la transmissivité et le coefficient d'emménagement (ou porosité) de l'aquifère de surface, T_2 et S_2 , ceux de l'aquifère profond, K' et B' la perméabilité et l'épaisseur de l'aquitard, et, k'' et b'' la perméabilité et l'épaisseur du lit du cours d'eau et b sa largeur.

Comme les aquifères superficiel et profond sont caractérisés par des propriétés différentes, la contribution en terme de débit des deux niveaux aquifères est différente. En utilisant les propriétés linéaires de l'équation de diffusivité, c'est-à-dire que le rabattement en un point de l'espace est la somme de plusieurs sources de pompage, on peut calculer le rabattement au puits, et en tout point de l'espace, et la contribution (débit) de chacun des niveaux pompés (Dewandel et al., 2018) ; voir encadré.

Le calcul de l'évolution de l'impact sur le cours d'eau au cours du temps est obtenu en utilisant le même principe de superposition à partir des solutions proposées par Hunt (2009) et, Ward et Lough (2011) ou en résolvant l'intégrale suivante :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \lambda \int_{-\infty}^{+\infty} s(0, y, t) dy \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{b}{b''} k''$$

Où ΔQ est le ratio de diminution du débit en fonction du temps, Q , le débit de pompage et $s(0, y, t)$ le rabattement dans l'aquifère le long du cours d'eau induit par le pompage dans les deux niveaux aquifères.

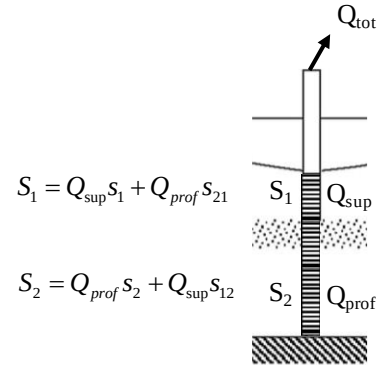
Calcul du rabattement dans le forage et de l'évolution des débits des deux niveaux aquifères (extrait de Dewandel et al., 2018).

Dans ce problème, le débit total de l'ouvrage est la somme des débits pompés dans les deux niveaux donc :

$$Q_{tot} = Q_{sup} + Q_{prof}$$

et le rabattement au puits équivaut à :

$$s_{tot} Q_{tot} = \frac{1}{2} [Q_{sup} (s_1 + s_{12}) + Q_{prof} (s_2 + s_{21})]$$



Où, s_1 (aquifère de surface) et s_2 (aquifère profond) sont les solutions des rabattements au niveau des aquifères pompés. s_{12} est le rabattement du pompage dans l'aquifère de surface sur l'aquifère profond, et s_{21} , celui induit par le pompage dans l'aquifère profond sur l'aquifère de surface.

En supposant que le rabattement au niveau du puits dans les deux aquifères est identique ($S_1=S_2$), la résolution de ce système d'équations, donne la solution du rabattement au puits:

$$s_{tot} = \frac{1}{2} (A + BC) / (1 + C)$$

Et les contributions, en terme de débit, des deux niveaux pompés :

$$Q_{sup} = Q_{tot} / (1 + C) \text{ et } Q_{prof} = Q_{tot} C / (1 + C)$$

avec $A = (s_1 + s_{12})$, $B = (s_2 + s_{21})$ et $C = (s_1 - s_{12}) / (s_2 - s_{21})$.

La Figure 22 présente une série de courbes types pour le modèle proposé et différents coefficients de drainance du cours d'eau λ (cas 1 à 6). Le cas 6 représente la solution où le lit du cours d'eau est quasiment imperméable ; $\lambda \rightarrow 0$. Dans ces modèles le cours d'eau est toujours situé à la même distance (100 m) et les paramètres des aquifères sont constants (cf. Figure 22). La Figure 23 présente l'évolution en terme de débit des deux niveaux pompés. Quel que soit la valeur de λ , les courbes sont très proches. Dans le détail elles ne sont différentes que pour les temps longs (diminution de Q_{sup} quand λ augmente) date à laquelle le cours d'eau commence à influencer le pompage ($t_D > 2 \times 10^5$). Pour les temps courts, c'est essentiellement l'aquifère de surface qui contribue au pompage en raison de la plus faible diffusivité de l'aquifère, mais aussi de son lien direct avec le cours d'eau. Quand le temps augmente sa contribution diminue rapidement pour finir, pour les temps longs, quasi identique à celle de l'aquifère profond. Cette équivalence est liée au fait que les transmissivités des deux aquifères sont les mêmes.

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 20$; Figure 22A), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent l'écoulement radial qui dans ce cas est proportionnel à la transmissivité totale du système ($T_1 + T_2$) ; ici il n'a pas été calculé d'effet de capacité lié au puits. Ensuite, pour les temps plus longs, la dérivée forme un « U » qui caractérise dans ce cas un flux

de drainance en provenance de l'aquifère superficiel vers le profond car $T_2/S_2 > T_1/\sigma$. En effet, comme le rabattement se propage plus vite et est plus important dans l'aquifère profond, un flux de drainance (« cross flow » en anglais) s'instaure entre les deux aquifères. Pour les temps longs, les courbes de dérivée diminuent à nouveau (courbes 1 à 5), cette fois à cause de la drainance en provenance du cours d'eau. Dans le cas où le lit du cours d'eau est quasiment imperméable (courbe 6 ; faible valeur de λ), la courbe de dérivée forme un second plateau fonction de la somme des transmissivités du système (T_1+T_2). La solution proposée permet d'évaluer l'impact sur le cours d'eau lié au pompage dans les deux aquifères, mais aussi ceux liés au pompage dans l'un ou l'autre aquifère (Figure 22B).

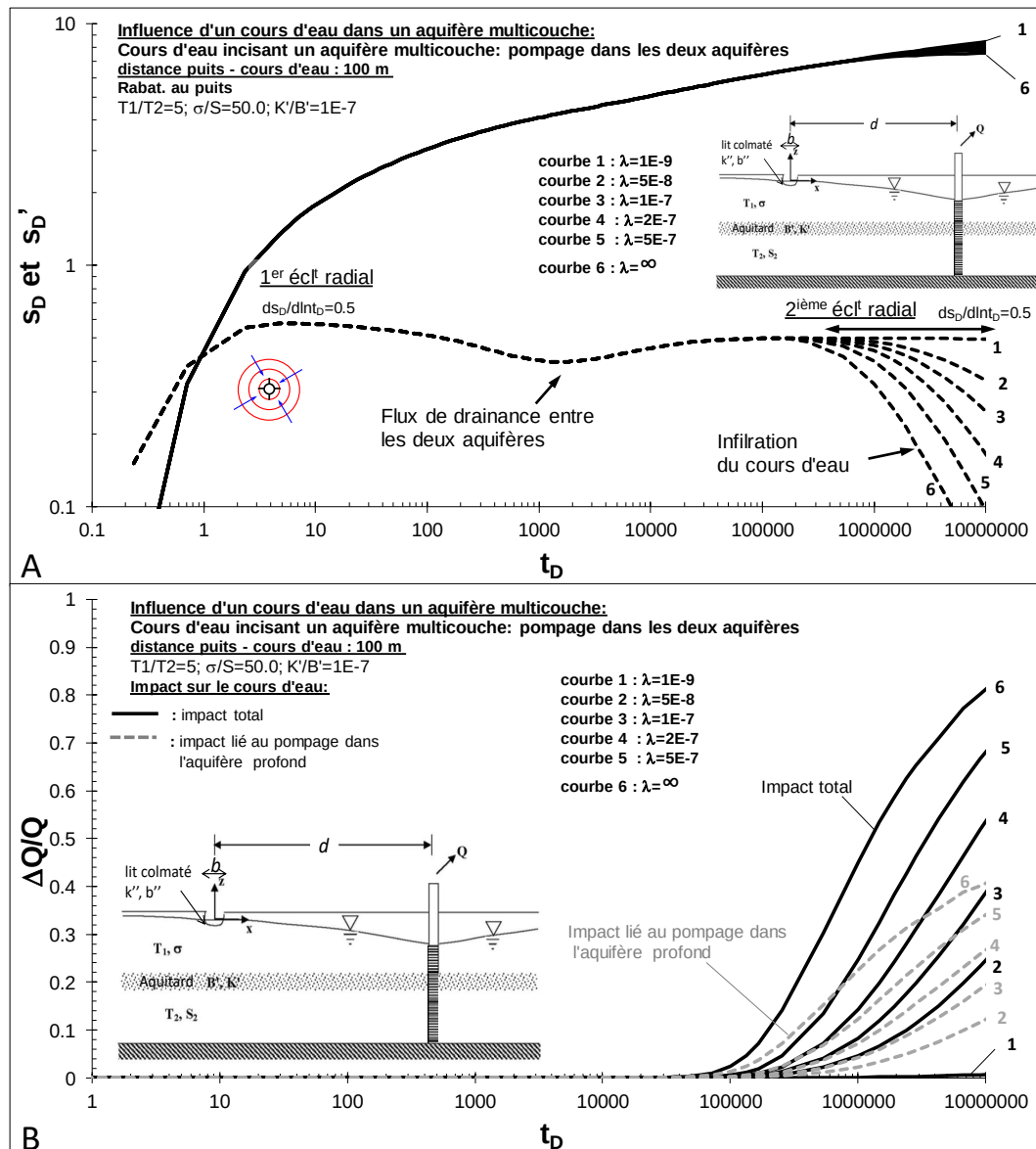


Figure 22 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans les aquifères supérieur et l'aquifère profond. Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (100 m).

s_D , s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

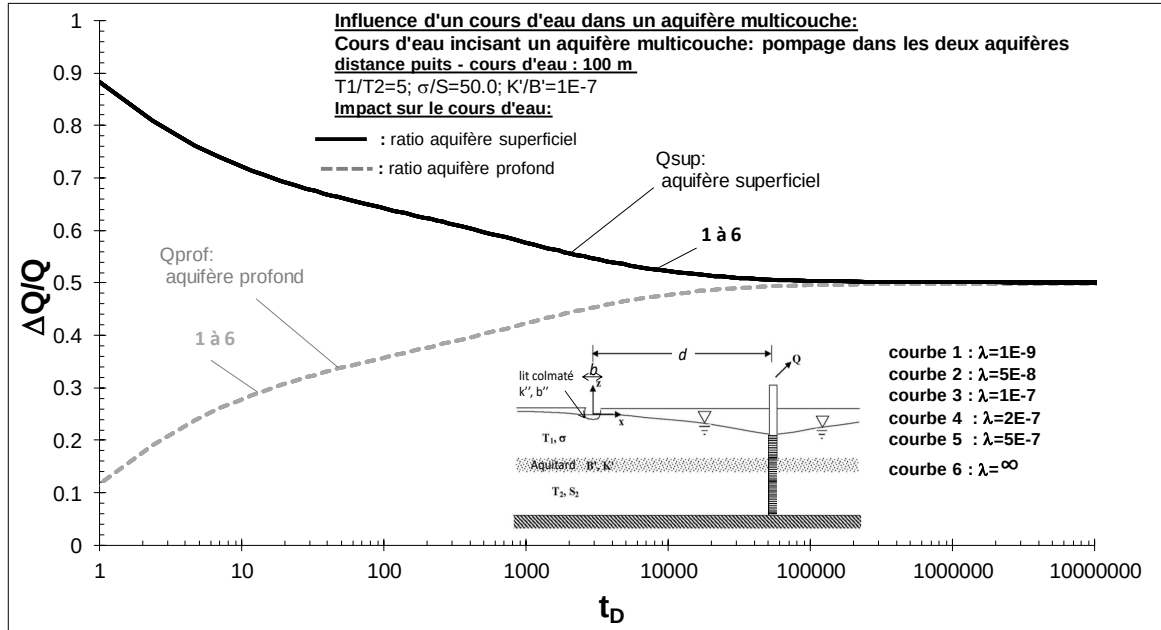


Figure 23 : aquifère multicouche, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement l'aquifère de surface - pompage dans les aquifères supérieur et l'aquifère profond. Calculs pour différentes valeurs de λ . Evolution de la contribution en terme de débit des deux niveaux aquifères.

3.1.8. Aquifère multicouche traversé par une fracture verticale, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface

Cette solution, développée par l'auteur de ce rapport, suppose une fracture verticale recoupant complètement un aquifère pompé et surmonté d'un aquitard traversé par un cours d'eau (Figure 24) ; cette solution est une extension de la solution générique proposée par Dewandel et al. (2018) pour résoudre le problème de forage interceptant une ou plusieurs fractures. L'aquifère, l'aquitard et le cours d'eau ont les mêmes propriétés que dans la solution de Hunt (2003) ; cf. §3.1.4.

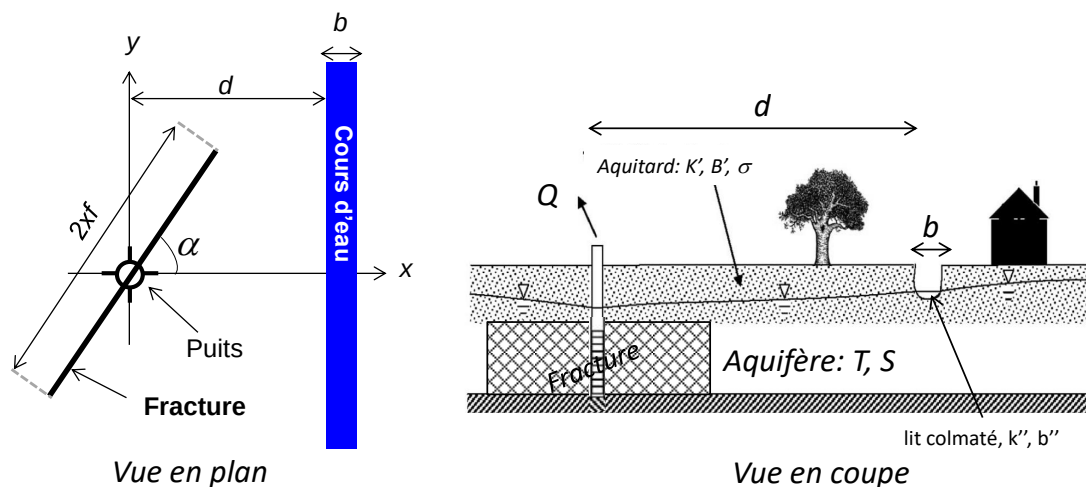


Figure 24 : aquifère multicouche traversé par une fracture verticale, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface.

Dans ce modèle (Figure 24), K' et B' sont respectivement la perméabilité et l'épaisseur de l'aquitard, σ son coefficient d'emménagement, k'' et b'' respectivement la perméabilité et l'épaisseur du lit du cours d'eau et b sa largeur. b'' peut aussi être l'épaisseur de l'aquifère sous le cours d'eau, et k'' , de l'aquitard. La fracture est définie par sa demi-longueur, x_f , et son angle, α , par rapport à l'axe des x .

La solution du rabattement est donnée par la résolution de l'intégrale suivante :

$$s(x, y, t) = \int_{-x_f}^{+x_f} s_H(x, y, t) d\xi$$

Où $s_H(x, y, t)$ est la solution de Hunt (2003). Cette équation est résolue pour le cas où le flux dans la fracture a une distribution uniforme. Notons que dans le cas où $\sigma=0$ (ou $k'=0$) cette solution est identique à celle de Gringarten et al. (1974), pompage dans une fracture verticale située dans un aquifère homogène et isotrope.

Le calcul de l'évolution de l'impact sur le cours d'eau au cours du temps est obtenu par l'intégrale suivante :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \lambda \int_{-\infty}^{+\infty} s(d, y, t) dy \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{b}{b''} k'', \quad \text{et } s(d, y, t) \text{ le rabattement dans l'aquifère le long du cours d'eau.}$$

La Figure 25 présente une série de courbes types pour le modèle proposé pour différents coefficients de drainance du cours d'eau λ (cas 1 à 5). Le cas 1 représente le cas où ce coefficient est très faible alors que le cas 5 celui où $\lambda \rightarrow \infty$. Est également représenté, le cas où il n'y a pas de fracture (réponse au puits de pompage ; solution de Hunt, 2003). Dans les illustrations qui suivent le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m) et les paramètres de l'aquitard sont constants (cf. Figure 25).

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 5\,000$), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent d'abord l'écoulement au sein de la fracture caractérisée par une pente de la dérivée de 0,5 (écoulement bi-linéaire), puis une sorte de « V » traduisant l'alimentation induite par l'aquitard de surface. Enfin, pour les temps longs et suivant les valeurs de λ , les courbes de dérivée diminuent à nouveau, caractérisant l'infiltration du cours d'eau. Dans le cas 1 (lit du cours d'eau très peu perméable), la dérivée du rabattement forme un écoulement radial (plateau de la dérivée) qui correspond à la réponse globale de l'aquifère en l'absence de cours d'eau. La comparaison avec la solution où le pompage n'est que dans le puits (solution de Hunt, 2003) montre de nettes différences en termes de courbes de rabattement et dérivées, mais peu de différences en termes d'impact sur le cours d'eau. On peut donc en déduire que même si l'ouvrage intercepte une fracture la solution de Hunt (2003) pour estimer le débit sera une approximation valable.

La Figure 26 montre que suivant l'angle, α , entre la fracture et le cours d'eau les courbes de rabattement et d'impact sur le cours d'eau sont quasiment identiques. La comparaison avec la solution au puits (solution de Hunt, 2003) pour le calcul de l'impact sur le cours d'eau montre aussi peu de différence ; on en conclue la même remarque que précédemment. Cependant, ces calculs ont été faits dans le cas où l'aquifère est isotrope (transmissivité identique dans toutes les directions de l'espace), s'il avait été anisotrope les réponses auraient été différentes suivant l'angle α , et ce que ce soit en termes de rabattement ou d'impact sur le cours d'eau.

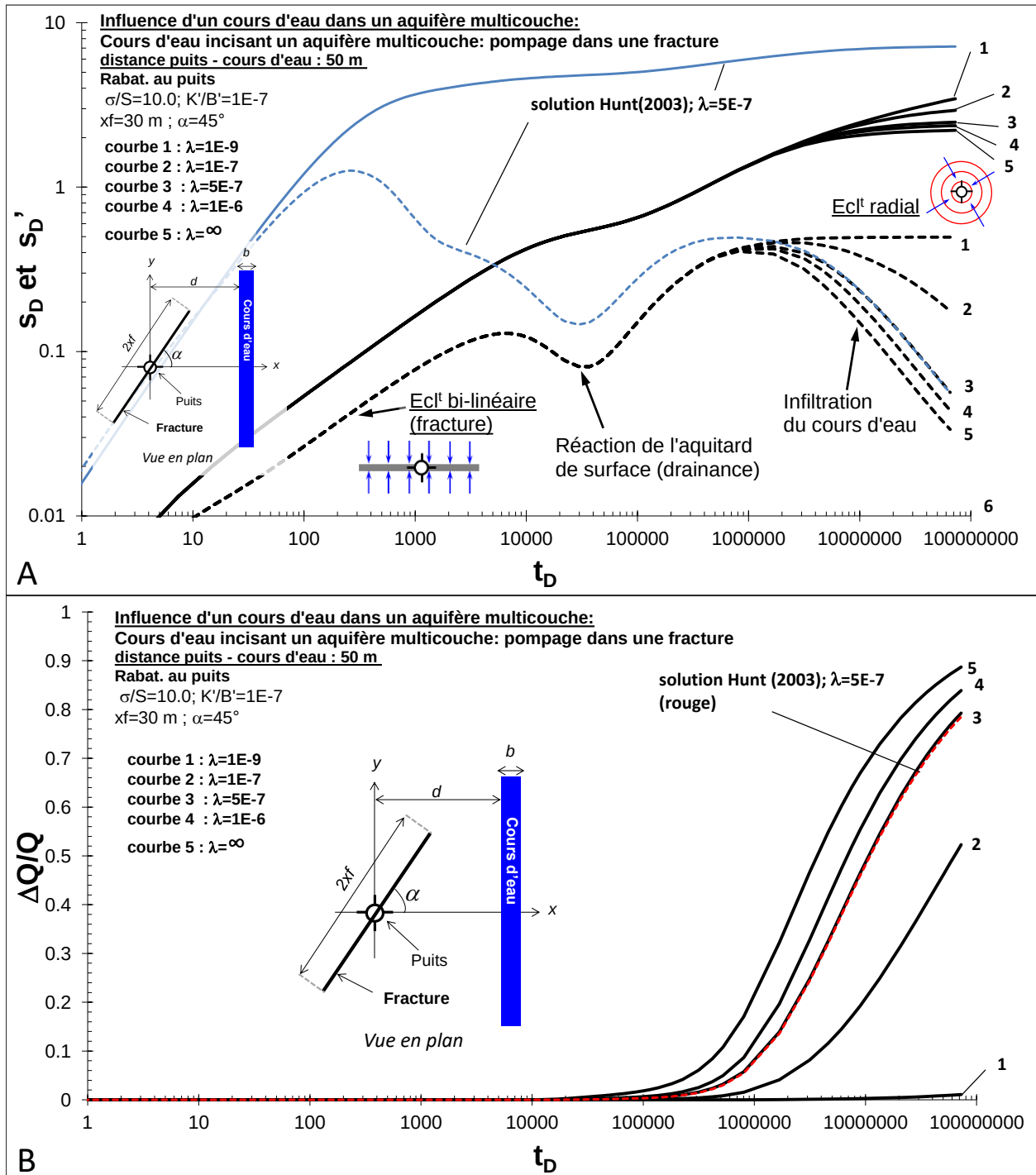


Figure 25 : aquifère multicouche traversé par une fracture verticale, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface. Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Longueur de la fracture : 60 m, $\alpha : 45^\circ$. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m).

s_D, s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

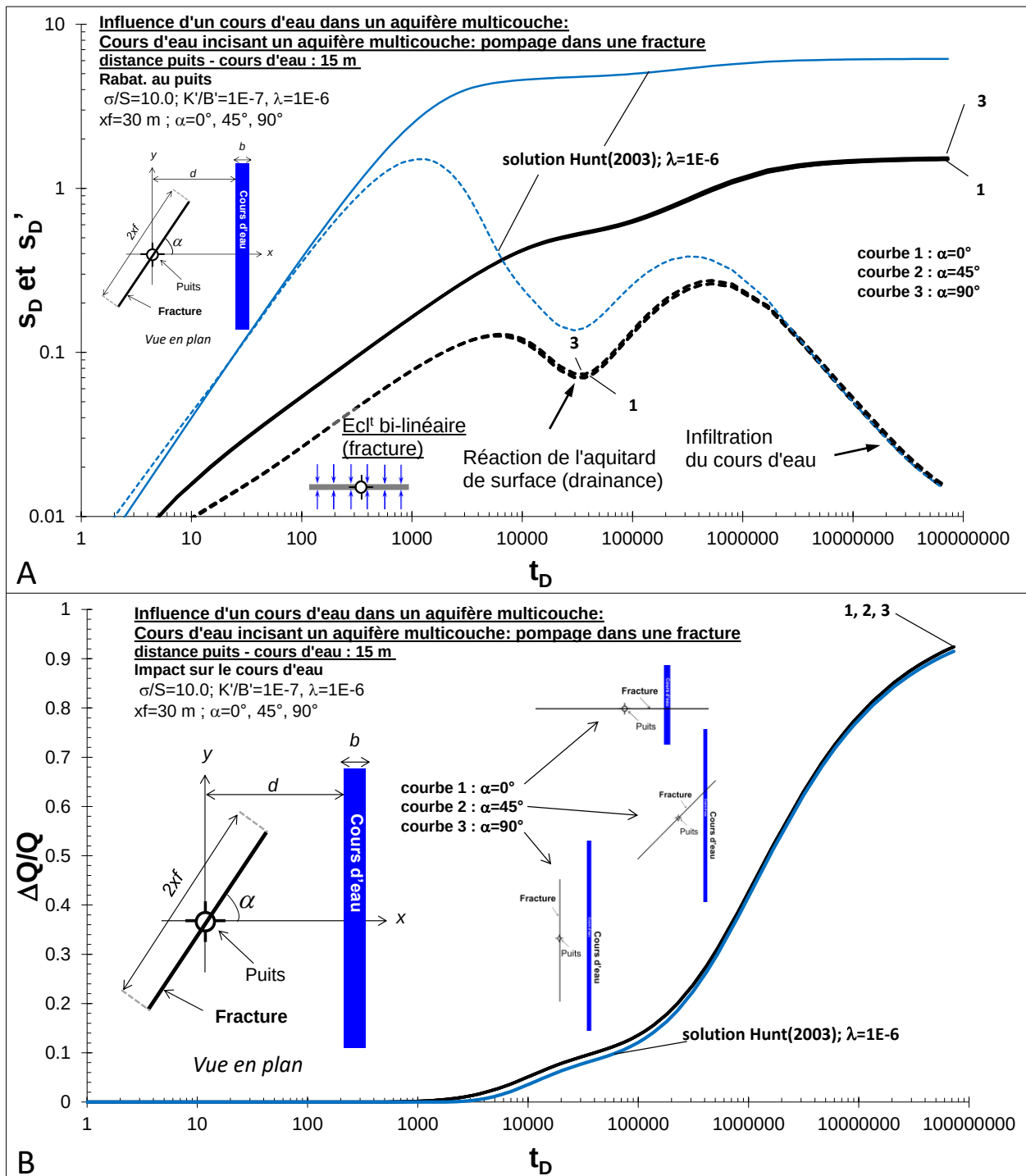


Figure 26 : aquifère multicouche traversé par une fracture verticale, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface. Calculs pour différentes valeurs de a . A : évolution du rabattement (sD) au puits de pompage et de sa dérivée (sD'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Longueur de la fracture : 60 m. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (15 m).

sD, sD' : rabattement et dérivée adimensionnels ; tD : temps adimensionnel.

3.1.9. Aquifère multicouche, impact d'un pompage dans un aquifère sur une source

Ce modèle décrit dans Hunt et Smith (2008) est semblable à celui de Hunt (2003) - Figure 15- mais où le cours d'eau est remplacé par une source circulaire de diamètre $2x_0$.

L'aquifère pompé est toujours homogène et isotrope et la source incise partiellement un aquitard de surface (Figure 27) de type Boulton (Boulton, 1973), c'est-à-dire peu perméable comparé à la perméabilité de l'aquifère, mais poreux.

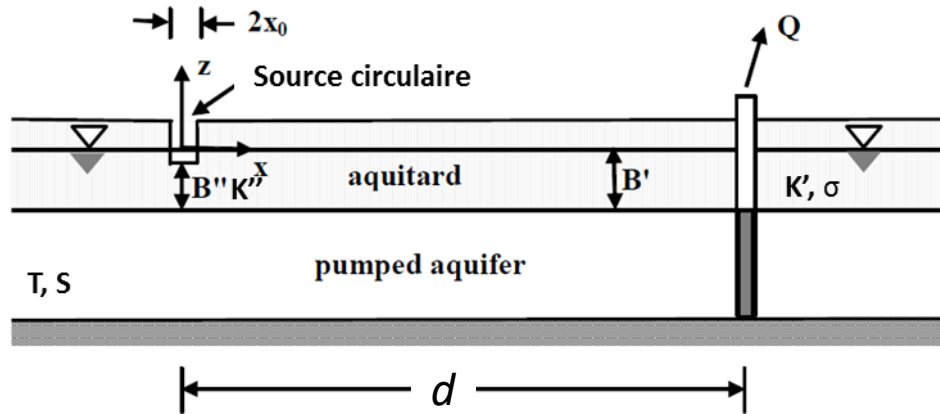


Figure 27 : effet d'un pompage sur une source située dans un aquitard de surface (Hunt, 2004 ; Hunt et Smith, 2008).

Comme dans les modèles précédents, le rabattement peut se propager de l'autre côté de la source. Dans ce modèle, il est fait l'hypothèse que le cours d'eau a une faible incision comparée à l'épaisseur de l'aquifère, et que les lignes de courant dans l'aquifère sont horizontales. Le fond de la source peut aussi être partiellement colmaté.

Les solutions sont données pour le rabattement dans l'aquifère pompé et l'aquitard, et l'impact sur le cours d'eau. Ces solutions sont disponibles dans la référence citée et sur le site de l'auteur (B. Hunt ; <http://www.civil.canterbury.ac.nz/staff/bhunt.shtml>).

Dans ce modèle (Figure 27), K' et B' sont respectivement la perméabilité et l'épaisseur de l'aquitard, σ son coefficient d'emmagasinement (ou porosité), k'' et b'' respectivement la perméabilité et l'épaisseur du lit sous la source, ou l'épaisseur d'aquitard sous la source, et x_0 son rayon.

Le calcul de l'évolution de l'impact sur la source au cours du temps est obtenu par :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \alpha Ts(x_0, 0, t) \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{\pi x_0^2}{T b''} k''$$

Notons que le coefficient α peut ne pas avoir de réalité physique, en particulier dans le cas d'une émergence par une zone de fractures où α peut avoir une valeur très élevée (Hunt et Smith, 2008). Il conviendra alors de fixer expérimentalement, par calage de la courbe du rabattement et/ou de la diminution du débit de la source, une valeur pour ce coefficient.

La Figure 28 présente une série de courbes types du modèle proposé pour différents coefficients de drainage de la source α (cas 1 à 6). Dans ces modèles la source est toujours située à la même distance (20 m) et les paramètres des aquifères sont constants (cf. Figure 28).

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 2\,000$), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent l'écoulement radial ; ici il n'a pas été calculé d'effet de capacité lié au puits. Ensuite, pour les temps plus longs et avant que ne soit perçue la drainance en provenance de la source, la courbe de dérivée forme un « V » caractéristique de l'effet de drainance de l'aquitard supérieur. Notons que celui-ci est similaire à celui de la solution de Hunt 2003 (Figure 16). Puis, si l'effet de drainance lié à la source n'a pas encore commencé (courbe 1 ; faible valeur de α), on observe un deuxième plateau de la dérivée, qui est fonction de la transmissivité du système. Pour les autres courbes, la dérivée diminue à nouveau, mais à cause de l'infiltration de l'eau de la source dans le système.

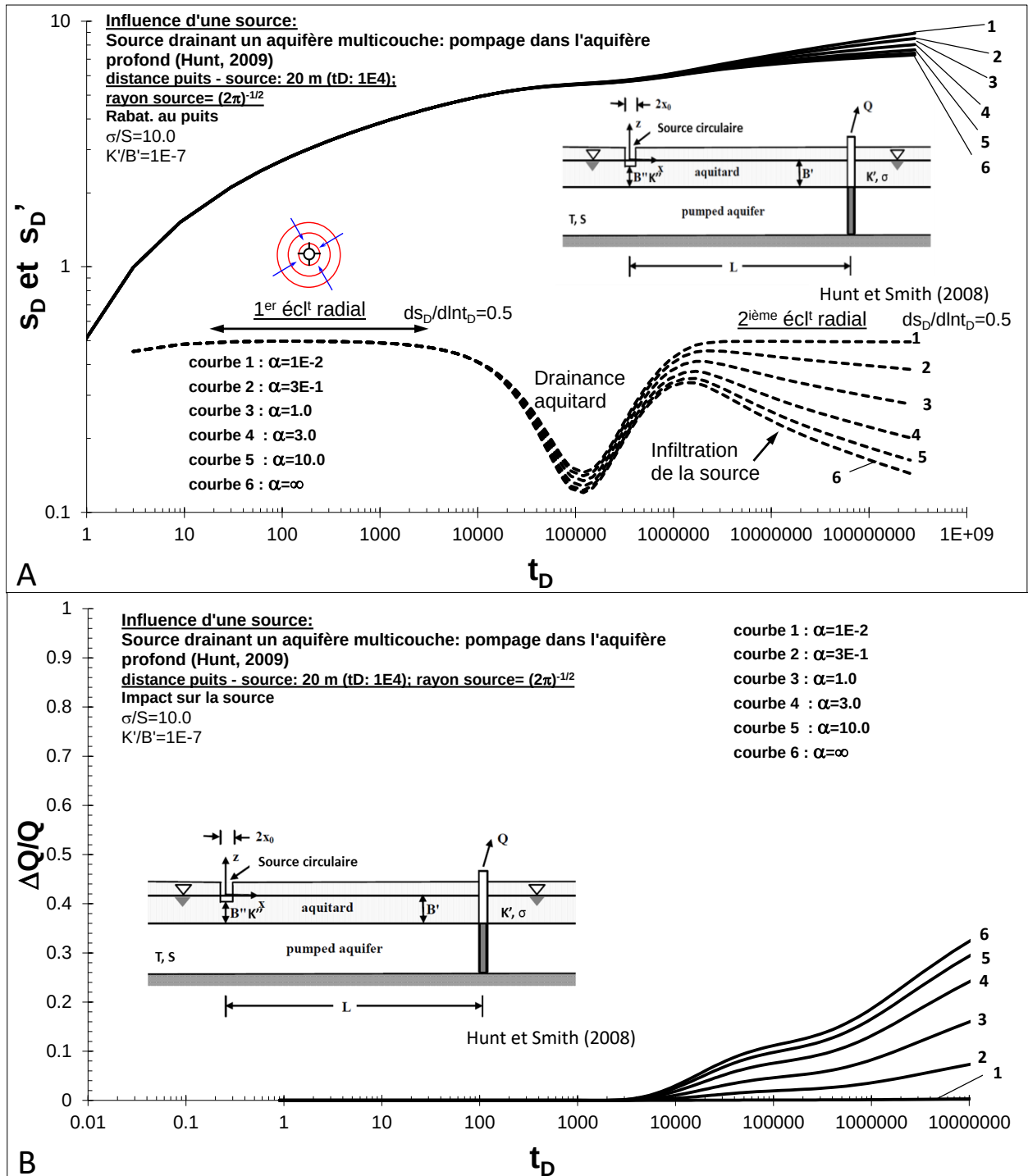


Figure 28 : aquifère multicouche, source avec fond colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt et Smith, 2008). Calculs pour différentes valeurs de α . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit de la source. La source est toujours située à la même distance (20 m).

s_D, s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

3.1.10. Autres modèles de types d'aquifère

Dans la littérature on trouve d'autres types de configurations cours d'eau - aquifère. Les courbes types de ces cas n'ont pas été reprises car ces modèles sont assujettis à des configurations très particulières comme un aquifère surmonté d'un milieu peu-perméable au stock d'eau infini (modèle de type Hantush, nappe semi-captive), soit un cas particulier du schéma exposé à la Figure 15, ou un aquifère où son épaisseur varie suivant une loi exponentielle, ou encore au d'aquifère faiblement incliné mais d'épaisseur constante (Figure 29). Les solutions relatives à ces modèles sont disponibles dans les travaux de Hantush (1962, 1964) et Kruseman et de Ridder (1994) pour les solutions de rabattements et, Lelièvre (1969) et, Forkasiewicz et Peaudecerf (1976) pour l'impact sur le cours d'eau. Néanmoins, les abaques d'impact sur le cours d'eau ont été mis en annexe.

On trouve aussi dans la littérature le cas d'un forage incliné situé à proximité d'un cours d'eau incisant complètement l'aquifère (Tsou et al., 2010) ; néanmoins on trouvera au § 3.2.5 une solution plus élaborée.

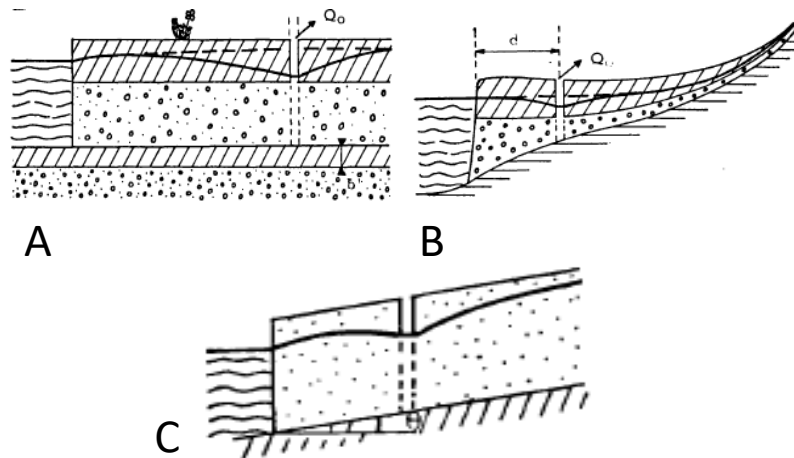


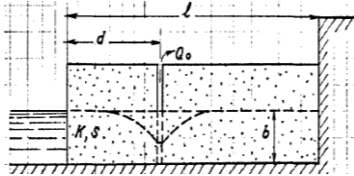
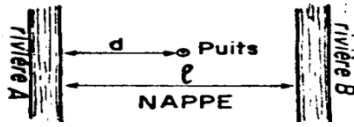
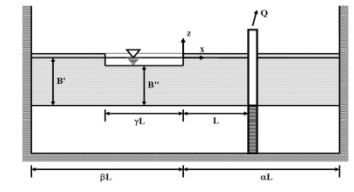
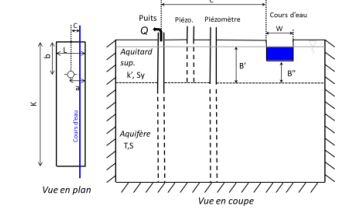
Figure 29 : autres configurations d'aquifère avec interaction d'un cours d'eau (Lelièvre, 1969): A- aquifère multicouche de type Hantush, B- Variations latérales de l'épaisseur aquifère et C- Nappe à surface libre inclinée ; la base de l'aquifère et la surface piézométrique sont parallèles au substratum imperméable (pente $\leq 2\%$).

3.2. LES DIFFERENTS TYPES DE MODELES D'AQUIFERE AVEC LIMITES

Le Tableau 2 présente les différents types de modèles d'aquifères avec effets de limites géométriques qui ont été résolus dans la littérature, et les références où sont disponibles les solutions analytiques de l'impact en termes de débit sur le cours d'eau et de rabattement associé. Ces effets de limites rendent compte des limites naturelles des aquifères, par exemple une vallée alluviale incisant un socle imperméable. On parlera donc dans ce cas de limites étanches. A contrario, ces limites peuvent être celles d'un aquifère situé entre deux cours d'eau, dans ce cas on parlera de limites d'alimentation.

De nombreux cas de ces effets de limites géométriques ont été traités par Lelièvre (1969) –voir aussi Forkasiewicz et Peaudecerf, 1976), comme de limites sécantes ou de rivière formant un coude (Tableau 2).

Les types d'aquifères, modèles avec limites géométriques des aquifères

Type de modèles	Type d'aquifère	Géométrie de l'aquifère	Incision du cours d'eau dans l'aquifère	Solution de débit	Solution de rabattement
	Aquifère captif ou libre ; Une limite étanche parallèle au cours d'eau	horizontale	Complète	Abaques disponibles : Lelièvre, 1969 ; Forkasiewicz, 1976 ; Peaudecerf, 1976	Disponible à calculer à partir de la théorie des images (Ferris et al., 1962 ; Kruseman et de Ridder, 1994)
	Aquifère captif ou libre ; deux cours d'eau parallèles	horizontale	Complète	Abaques disponibles : Lelièvre, R.F., 1969 ; Forkasiewicz, J., 1976 ; Peaudecerf, P., 1976	Disponible à calculer à partir de la théorie des images (Ferris et al., 1962 ; Kruseman et de Ridder, 1994)
	Aquifère semi-captif (type Boulton) limité dans l'espace (2 limites étanches parallèles)	horizontale	Incision du cours d'eau négligeable devant l'épaisseur aquifère + semi-perméable entre le cours d'eau et l'aquifère	Hunt, 2008	Hunt, 2008
	Aquifère semi-captif (type Boulton) limité dans l'espace (jusqu'à 4 lim. étanches orthogonales)	horizontale	Incision du cours d'eau négligeable devant l'épaisseur aquifère + semi-perméable entre le cours d'eau et l'aquifère	BRGM (B.Dewandel)	BRGM (B.Dewandel)

Types de modèle	Type d'aquifère	Géométrie de l'aquifère	Incision du cours d'eau dans l'aquifère	Solution de débit	Solution de rabattement
	Aquifère semi-captif (type Boulton) limité dans l'espace (2 limites étanches parallèles) ; forage incliné	horizontale	Incision du cours d'eau négligeable devant l'épaisseur aquifère + semi-perméable entre le cours d'eau et l'aquifère	BRGM (B.Dewandel)	BRGM (B.Dewandel)
	Aquifère captif ou libre ; Cours d'eau formant un angle droit	horizontale	Complète	Abaques disponibles : Lelièvre, R.F., 1969; Forkasiewicz, J., Peaudecerf, P., 1976	Disponible à calculer à partir de la théorie des images
	Aquifère captif ou libre ; Cours d'eau formant un angle θ avec une limite étanche	horizontale	Complète	Lelièvre, R.F., 1969; Forkasiewicz, J., Peaudecerf, P., 1976 (abaques disponibles pour $\theta = \pi/2, \pi/4, \pi/6$)	Disponible à calculer à partir de la théorie des images. Note : schéma pouvant être répété pour deux cours d'eau formant un angle θ

Tableau 2 : les différents types de modèles d'aquifère, les effets de limites géométriques des aquifères.

3.2.1. Aquifère homogène avec cours d'eau incisant complètement l'aquifère et limite de nappe

Ce cas de figure est identique à celui de la Figure 9 mais avec présence de la limite de l'aquifère (Figure 30). Dans ce modèle, les deux limites sont parallèles, l'écoulement du cours d'eau vers l'aquifère est parfait, et il est fait l'hypothèse que les vitesses (donc les lignes de courant) dans l'aquifère sont horizontales (approximation de Dupuit). Ce modèle est un modèle simple mais fréquemment utilisé.

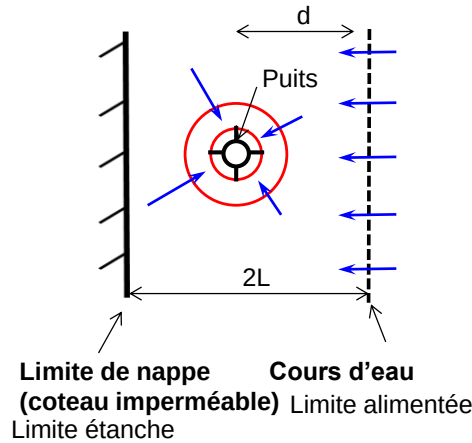


Figure 30 : aquifère homogène avec cours d'eau incisant complètement l'aquifère et limite de nappe.

L'évolution du rabattement au puits de pompage, ou à un piézomètre, est obtenu par la méthode des images (voir par exemple, Ferris et al., 1962 ; Kruseman et de Ridder, 1994) et à pour expression :

$$s(x, y, t) = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \begin{aligned} &W(u_r) + \sum_{n=0,2,4,\dots}^{\infty} b^{n/2+1} c^{n/2} W\left(\frac{(2nL + 2d - x)^2 + y^2}{r^2} u_r\right) \\ &+ \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} (bc)^{n/2} W\left(\frac{(-2nL - x)^2 + y^2}{r^2} u_r\right) \\ &+ \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} (bc)^{n/2} W\left(\frac{(2nL - x)^2 + y^2}{r^2} u_r\right) \\ &+ \sum_{n=2,4,\dots}^{\infty} b^{n/2-1} c^{n/2} W\left(\frac{(-(2nL - 2d) - x)^2 + y^2}{r^2} u_r\right) \end{aligned} \right\}$$

Avec $u_r = \frac{r^2 S}{4Tt}$ et $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, x, y étant les coordonnées du forage ou du piézomètre (dans ce cas $x=y=0$ au puits de pompage). Dans le cas où la limite est étanche b ou $c=1$, et dans le cas où elle est alimentée, b ou $c=-1$. Le code de calcul TIGRE du BRGM (Thiéry 2012 ; <http://marthe.brgm.fr/> , à la page « TIGRE ») permet en particulier de calculer ce rabattement.

La formulation de l'impact en termes de débit est donnée par (Lelièvre, 1969) :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \operatorname{Erfc} \sqrt{\frac{Sd^2}{4Tt}} + \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} (-1)^n \left[\operatorname{Erfc} \left(\frac{4nL + d}{2\sqrt{Tt/S}} \right) - \operatorname{Erfc} \left(\frac{4nL - d}{2\sqrt{Tt/S}} \right) \right]$$

$2L$ étant la distance entre le cours d'eau et la limite alimentée.

La Figure 31 et la Figure 32 présentent des séries de courbes types de l'évolution du rabattement au puits de pompage et de sa dérivée, et de l'impact sur le cours d'eau. La Figure 31 présente le cas d'un pompage situé à équidistance des deux limites mais pour des distances de plus en plus éloignées. Sur la Figure 31, la courbe 5 (limites à l'infini) correspond à la solution de Theis (1935). Dans la Figure 32, le forage est toujours situé entre les deux limites, mais la limite étanche reste à proximité et fixe, alors que la limite alimentée est de plus en plus éloignée. Dans ce cas, la courbe 5 (limite alimentée à l'infini) correspond à la solution de Theis plus une limite étanche ; pour les temps longs la pente du rabattement dans un graphe semi-log double ce qui se traduit par un doublement du plateau de la dérivée.

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 10\,000$, Figure 31 et $t_D < 2\,000$, Figure 32), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent successivement les effets liés à la capacité du puits, puis un écoulement radial. Ensuite (Figure 31), pour les temps plus longs et à partir du moment où le rabattement atteint le cours d'eau, la dérivée diminue rapidement, indiquant que le rabattement évolue de moins en moins vite. Dans le cas de la Figure 32, le rabattement augmente d'abord car la limite étanche est plus proche que l'alimentée. Ceci se traduit par une augmentation de la dérivée jusqu'à un plateau valant deux fois le précédent. Puis, lorsque le cours d'eau est atteint, la dérivée diminue.

Comme vu dans le cas sans limite étanche (3.1.1 ; Figure 10) plus le cours d'eau est éloigné de l'aquifère, plus le rabattement prend du temps à stabiliser. D'autre part, comparé au modèle sans limite étanche, l'impact sur le cours d'eau est plus rapide. Cela est dû au caractère limité de l'aquifère qui va forcer le pompage à aller chercher de l'eau plus rapidement là où elle est disponible, dans le cours d'eau.

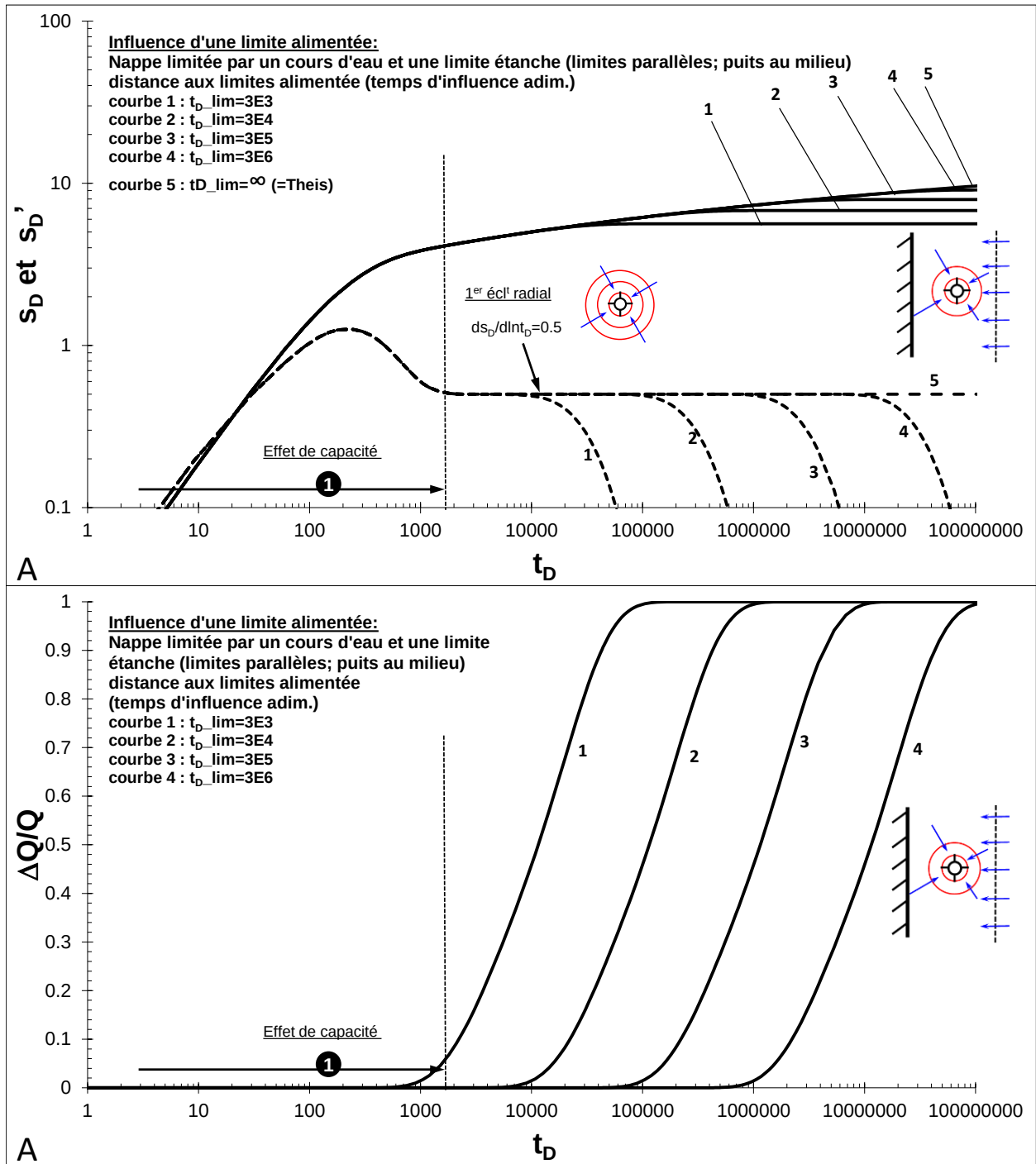


Figure 31 : aquifère homogène avec cours d'eau incisant complètement l'aquifère et limite de nappe. Le puits est situé à égale distance entre les deux limites, et les limites sont de plus en plus éloignées. A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau.

s_D, s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

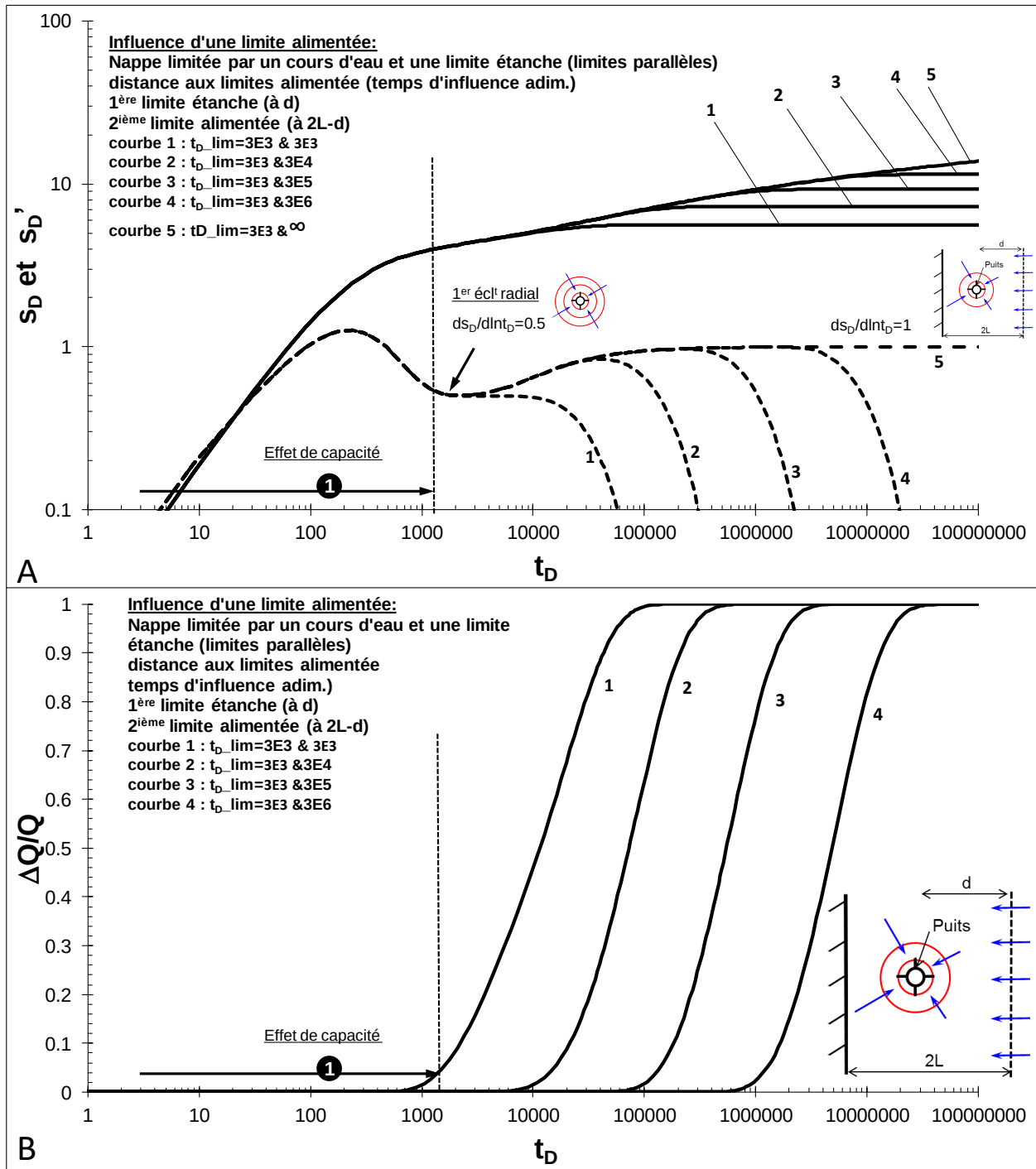


Figure 32 : aquifère homogène avec cours d'eau incisant complètement l'aquifère et limite de nappe. Le puits est situé à proximité de la limite de nappe, et la distance au cours d'eau est variable. A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s'_D), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau.

s_D, s'_D : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

3.2.2. Aquifère homogène avec deux cours d'eau parallèles incisant complètement l'aquifère

Ce cas de figure est identique à celui du cas précédent, mais la limite étanche est remplacée par une limite alimentée représentant un deuxième cours d'eau (Figure 33).

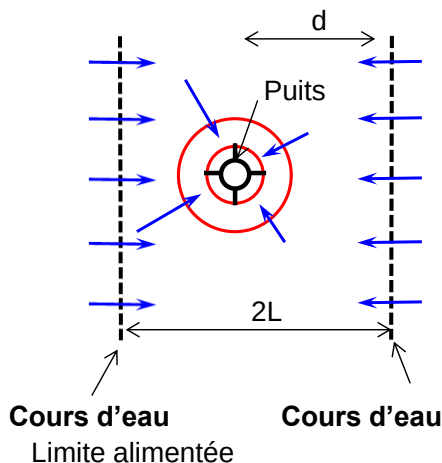


Figure 33 : aquifère homogène avec pompage entre deux cours d'eau incisant complètement l'aquifère et parallèles.

L'évolution du rabattement au puits de pompage, ou à un piézomètre, et toujours obtenu par la méthode des images, il est semblable à la formule précédente en posant $b=c=-1$.

La formulation de l'impact en termes de débit sur le premier cours d'eau (distance : d) est donnée par (Lelièvre, 1969) :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \operatorname{Erfc} \sqrt{\frac{Sd^2}{4Tt}} + \sum_{n=1,2,3,\dots}^{\infty} (-1)^n \left[\operatorname{Erfc} \left(\frac{4nL - d}{2\sqrt{Tt/S}} \right) - \operatorname{Erfc} \left(\frac{4nL + d}{2\sqrt{Tt/S}} \right) \right]; \text{ pour le 2}^{\text{ème}} \text{ cours d'eau } d \text{ devient } 2L-d.$$

La Figure 34 et la Figure 35 présentent des séries de courbes types de l'évolution du rabattement au puits de pompage et de sa dérivée, et de l'impact sur les deux cours d'eau (somme des deux impacts). La Figure 34 présente le cas d'un pompage situé à équidistance des deux limites pour le cas où elles sont de plus en plus éloignées. Dans ce cas, la courbe 5 (limites à l'infini) correspond à la solution de Theis (1935). Dans le deuxième cas (Figure 35), le forage est toujours situé entre les deux limites, mais le premier cours d'eau reste à une distance fixe, alors que le deuxième est de plus en plus éloigné. Dans ce second cas, la courbe 5 (limite alimentée à l'infini) correspond à la solution décrite (au §3.1.1, Figure 10).

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 2000$, Figure 34 et Figure 35), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent les effets liés à la capacité du puits, puis un écoulement radial. Ensuite (Figure 34), pour les temps plus longs et à partir du moment où le rabattement atteint les deux cours d'eau, la dérivée diminue rapidement, beaucoup plus rapidement que dans les cas précédents, indiquant que le rabattement évolue de moins en moins vite. Dans le cas de la Figure 35, le rabattement évolue moins vite, car le premier cours d'eau alimente rapidement l'aquifère, puis lorsque le cône de rabattement rencontre le deuxième cours d'eau, le rabattement diminue encore moins vite. Si en termes de rabattement les différentes courbes ne sont pas très différentes, l'évolution de l'impact sur les cours d'eau est par contre très différente et très sensible à la position du deuxième cours d'eau (Figure 35).

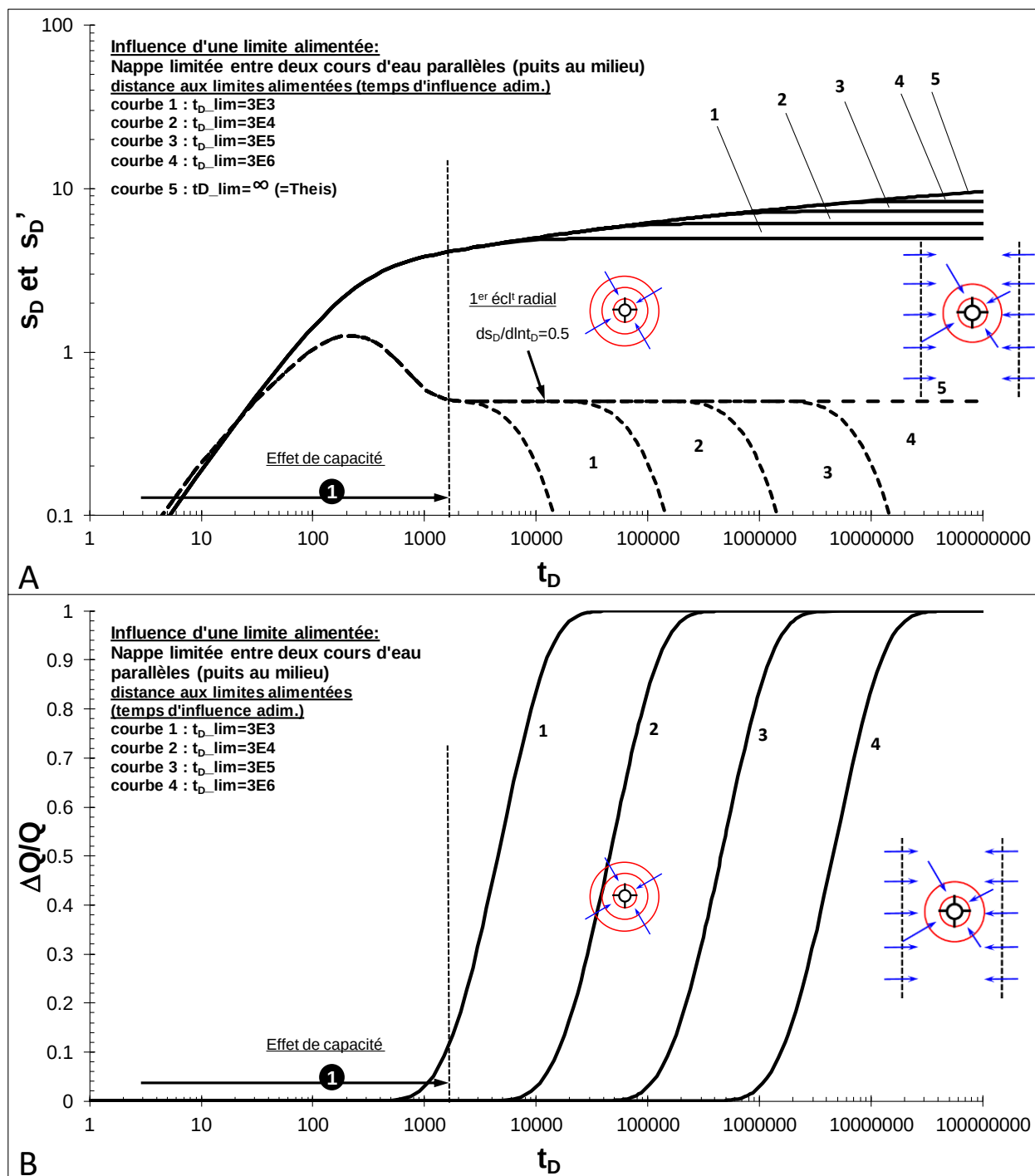


Figure 34 : pompage situé dans un aquifère homogène limité par deux cours d'eau incisant complètement l'aquifère et parallèles. Le puits est situé à égale distance entre les deux limites, et les limites sont de plus en plus éloignées. A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s'_D), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau.

s_D, s'_D : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

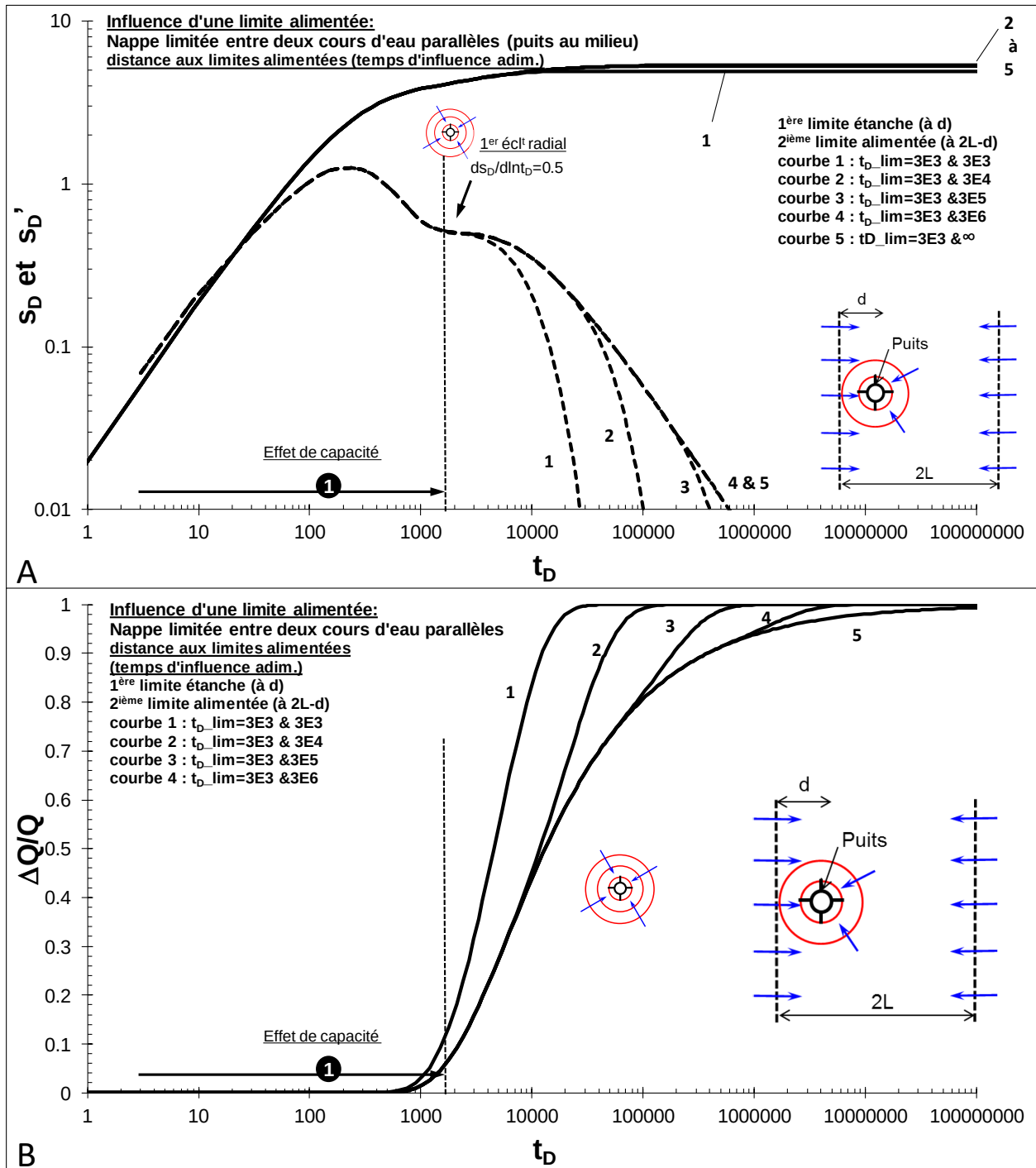


Figure 35 : pompage situé dans un aquifère homogène limité par deux cours d'eau incisant complètement l'aquifère et parallèles. Le puits est situé à proximité d'un des deux cours d'eau, et la distance au deuxième est variable. A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau.

s_D , s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

3.2.3. Aquifère multicouche limité par deux limites étanches, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface

Cette solution, issue de Hunt (2008), fait suite à celle présentée au § 3.1.4 (Hunt, 2003 ; Figure 15). L'aquifère pompé est homogène et isotrope, le cours d'eau incise partiellement un aquitard de surface de type Boulton, et l'ensemble est limité dans l'espace par deux limites étanches parallèles (Figure 36).

Comme dans les autres modèles où le cours d'eau incise partiellement l'aquitard ou un aquifère, le rabattement peut se propager de l'autre côté du cours d'eau. Dans ce modèle, il est fait l'hypothèse que le cours d'eau a une faible incision comparée à l'épaisseur de l'aquifère, et que les lignes de courant dans l'aquifère pompé sont horizontales. Le lit du cours d'eau peut aussi être partiellement colmaté.

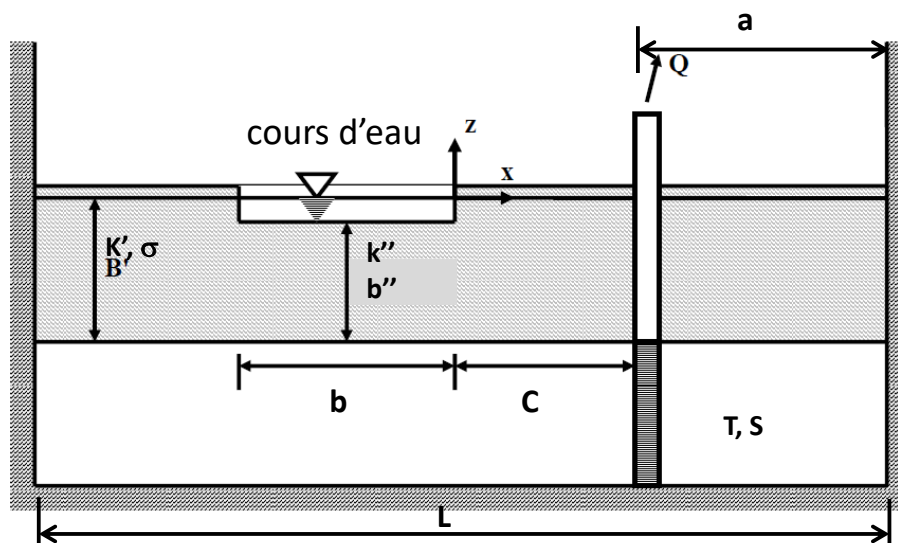


Figure 36 : cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface et aquifère limité dans l'espace par deux limites étanches parallèles (Hunt, 2008) ; $x=y=0$ sur la berge la plus proche du puits.

Les solutions sont données pour le rabattement dans l'aquifère pompé et l'aquitard, et l'impact sur le cours d'eau. Non présentées ici, le lecteur trouvera ces solutions dans la référence citée et sur le site de l'auteur (B. Hunt ; <http://www.civil.canterbury.ac.nz/staff/bhunt.shtml>). Néanmoins, l'intégration nécessaire au calcul du rabattement au puits de pompage proposé par l'auteur n'est pas satisfaisante, ce qui a nécessité l'utilisation d'un autre algorithme (cf. 3.1.5).

Dans ce modèle (Figure 36), K' et B' sont respectivement la perméabilité et l'épaisseur de l'aquitard, σ son coefficient d'emmagasinement (ou porosité), k'' et b'' respectivement la perméabilité et l'épaisseur de l'aquifère sous le cours d'eau ou celle du lit du cours d'eau, et b sa largeur. C est ici la distance entre le puits pompé et le cours d'eau, a la distance entre le puits et la limite étanche située sur la même berge, et L la distance entre les deux limites étanches.

L'impact sur le cours d'eau est toujours fonction du coefficient de drainance, s'écrivant :

$$\lambda = \frac{b}{b''} k''.$$

Le calcul de l'évolution de l'impact sur le cours d'eau au cours du temps est obtenu par la double intégrale suivante :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{k''}{b''} \int_{-b-\infty}^0 \int_{-\infty}^{+\infty} s(x, y, t) dx dy$$

Où ΔQ est le ratio de diminution du débit en fonction du temps, Q , le débit de pompage et $s(x, y, t)$ le rabattement.

Cette solution permet de résoudre le problème pour un schéma aquifère relativement complexe, et peut aussi s'appliquer au cas présenté en Figure 13 (§ 3.1.3) en posant $K'=0$ et $\sigma=S$. De plus comme la solution présentée au § 3.1.4 (Hunt, 2003 ; Figure 15), cette solution utilise un aquitard de type Boulton, donc que le niveau de ce dernier va s'abaisser durant le pompage. Ce type de modèle qui est ainsi plus réaliste qu'avec un modèle de type Hantush (Hantush, 1965) où au contrario le niveau ne s'abaisse pas (dans ce cas $\sigma \rightarrow \infty$). De ce fait, la solution proposée par Butler et al. (2001), où l'aquitard de surface a un stock d'eau infini, est un cas particulier. Notons, que cette solution peut être utilisée dans le cas où il n'y a qu'une seule limite étanche, soit celle située sur la même berge que le puits soit sur celle d'en face. Cette solution offre ainsi un panel de schémas hydrogéologiques réalistes vis-à-vis de situations que l'on peut rencontrer dans le milieu naturel. C'est donc aussi une solution à privilégier.

La Figure 37 présente une série de courbes types pour le modèle proposé et pour différents coefficients de drainance du cours d'eau λ (cas 1 à 7). Le cas 1 représente le cas où ce coefficient est très faible alors que le cas 7 celui de la solution d'un cours incisant complètement un aquifère limité par une limite étanche ($\lambda \rightarrow \infty$; § 3.2.1, Figure 30). Dans ces modèles le cours d'eau est toujours situé à la même distance (5 m) et les paramètres de l'aquitard sont constants (cf. Figure 37).

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 700$), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent successivement un écoulement radial ; ici les effets liés à la capacité du puits non pas été pris en compte. Ensuite, pour les temps plus longs et avant que ne soit perçue la drainance en provenance du cours d'eau (faibles valeurs de λ , courbes 1 à 4), les courbes de dérivée forment une sorte de « V » traduisant l'alimentation induite par l'aquitard de surface. Cet effet de drainance va momentanément créer une pseudo-stabilisation du rabattement dans l'aquifère pompé suivie d'une ré-augmentation du rabattement induite par la baisse du niveau dans l'aquitard. Enfin lorsque le rabattement dans l'aquifère est suffisant pour créer un gradient au niveau du cours d'eau, un flux s'instaure entre le cours d'eau, l'aquitard et l'aquifère pompé, induisant une nouvelle stabilisation du niveau et donc une nouvelle diminution de la dérivée. Dans le cas 1, cas d'un lit de cours d'eau très peu perméable, la dérivée du rabattement suit une pente de 0,5, caractéristique d'un écoulement chenalisé (aquifère limité par deux limites étanches parallèles). La courbe 7 ($\lambda \rightarrow \infty$) est similaire à la solution décrite au § 3.2.1 (Figure 30) car la seconde limite n'est pas perçue, le cours d'eau fait alors écran à la propagation du rabattement. On notera aussi, par rapport aux autres solutions, les augmentations et changement de régimes de la part d'eau du cours d'eau s'infiltrant dans l'aquifère à cause de l'atteinte des limites étanches de l'aquifère. En effet, chaque fois qu'une limite est atteinte, le flux augmente plus rapidement, car le pompage crée plus de rabattement, en particulier au niveau du cours d'eau, augmentant de ce fait le gradient entre le cours d'eau et l'aquifère.

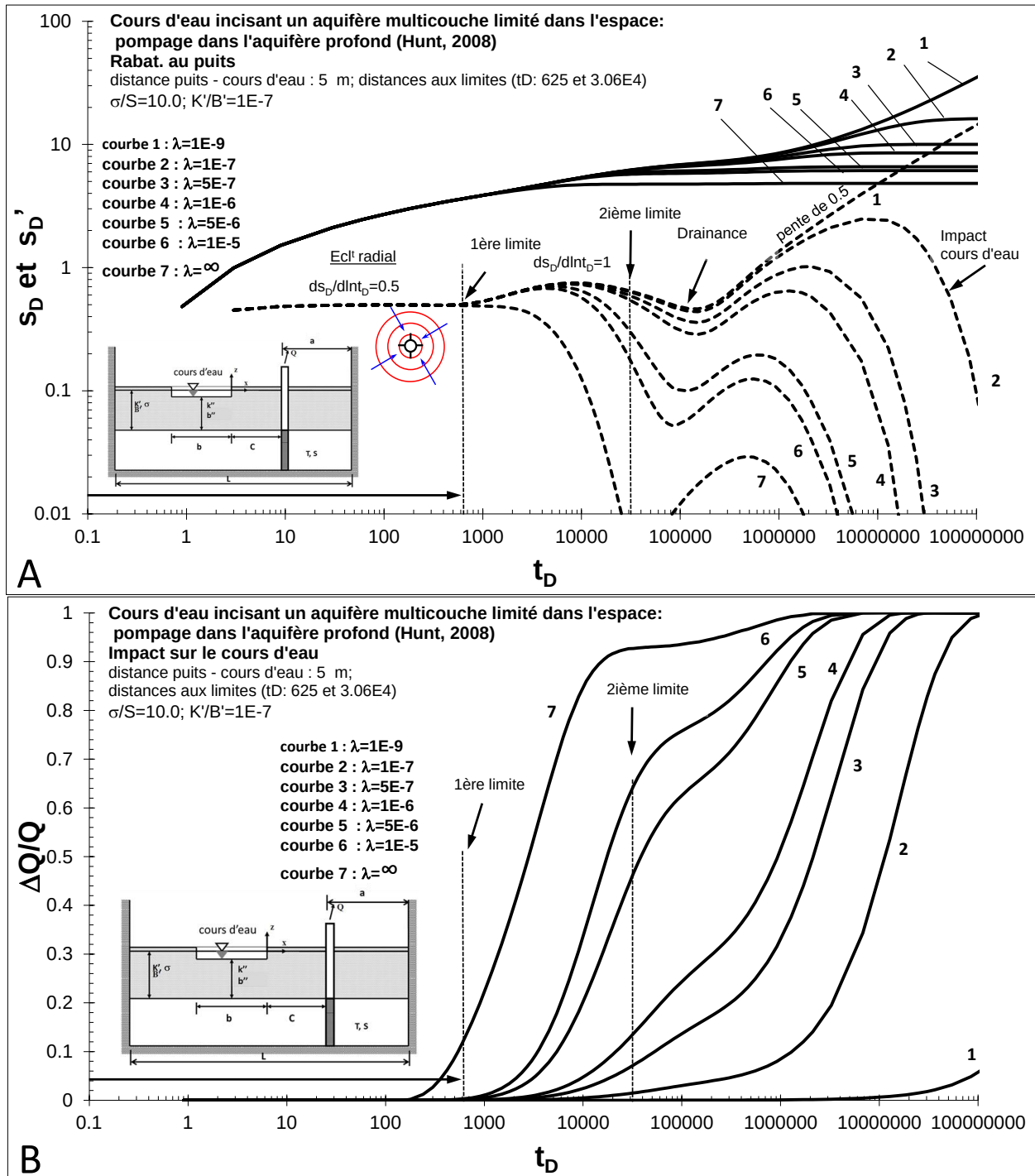


Figure 37 : aquifère multicouche limité dans l'espace par deux limites étanches parallèles, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface (Hunt, 2008). Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (5 m).

s_D , s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

3.2.4. Aquifère multicouche limité par quatre limites étanches, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface

Cette solution fait suite à celle présentée précédemment en considérant un aquifère fermé par quatre limites étanches orthogonales (Figure 38). Elle a été développée par l'auteur de ce rapport en appliquant le principe de superposition (méthode des images) sur la solution de Hunt (2008). L'aquifère, l'aquitard et le cours d'eau ont les mêmes caractéristiques que dans le modèle précédent.

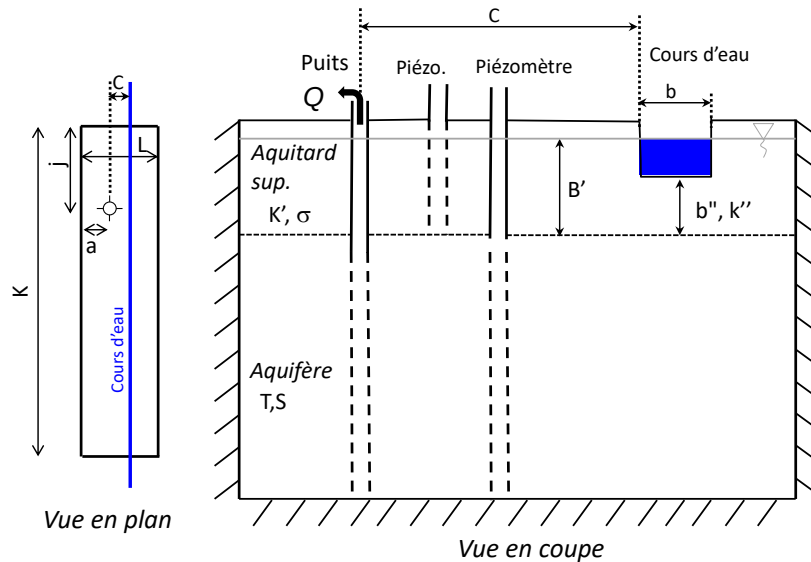


Figure 38 : cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface et aquifère limité dans l'espace par quatre limites étanches orthogonales ($x=y=0$ au puits de pompage).

Les solutions ont été calculées pour le rabattement dans l'aquifère pompé et l'aquitard, et l'impact sur le cours d'eau. Du fait de la complexité des équations à résoudre, les calculs peuvent cependant être assez longs.

Dans ce modèle (Figure 38), K' et B' sont respectivement la perméabilité et l'épaisseur de l'aquitard, σ son coefficient d'emménagement (ou porosité), k'' et b'' respectivement la perméabilité et l'épaisseur de l'aquifère sous le cours d'eau ou celle du lit du cours d'eau, et b sa largeur. C est la distance entre le puits pompé et le cours d'eau, a la distance entre le puits et la limite étanche située sur la même berge, et L la distance entre les deux limites étanches (celles parallèles au cours d'eau). j est la distance à la troisième limite (perpendiculaire au cours d'eau) et K est la distance entre les deux limites perpendiculaires au cours d'eau.

L'impact sur le cours d'eau est toujours fonction du coefficient de drainance :

$$\lambda = \frac{b}{b''} k''.$$

Le calcul de l'évolution de l'impact sur le cours d'eau au cours du temps est obtenu par l'intégrale suivante :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \lambda \int_{-(K-j)}^j s(C, y, t) dy$$

Où ΔQ est le ratio de diminution du débit en fonction du temps, Q , le débit de pompage et $s(C,y,t)$ le rabattement le long du cours d'eau.

Cette solution permet de résoudre le problème pour un schéma aquifère encore plus complexe que la solution précédente, et peut aussi s'appliquer au cas présenté en Figure 13 en posant $K'=0$ et $\sigma=S$ ou à la solution précédente avec $j \rightarrow \infty$ et $K \rightarrow \infty$. Cette solution a aussi les mêmes avantages que celles décrites au § 3.1.4 (Hunt, 2003 ; Figure 15) et au § précédent (Hunt, 2008 ; Figure 36), en ce qui concerne l'aquitard.

Ainsi cette solution offre un panel de situations hydrogéologiques encore plus large que les modèles précédemment décrits. C'est donc aussi une solution à privilégier.

La Figure 39 présente une série de courbes types pour le modèle proposé et pour différents coefficients de drainance du cours d'eau λ (cas 1 à 8). Le cas 1 représente le cas où ce coefficient est très faible. Dans ces modèles le cours d'eau est toujours situé à la même distance (20 m) et les paramètres de l'aquitard sont constants (cf. Figure 39).

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 900$), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent successivement les effets liés à la capacité du puits et l'écoulement radial. Ensuite, pour les temps plus longs et avant que ne soit perçue la drainance en provenance du cours d'eau (faibles valeurs de λ , courbes 1 à 8), les courbes de dérivée forment une sorte de « V » traduisant l'alimentation induite par l'aquitard de surface. Pour les temps encore plus longs et des faibles valeurs de λ (courbes 1 à 6), la dérivée suit une pente de 0,5 caractéristique de l'écoulement chenalisé entre les deux limites étanches parallèles. Puis pour des temps encore plus longs et de très faibles valeurs de λ (courbes 1 et 2), les dérivées suivent une pente de 1, caractéristique de l'écoulement dans un réservoir fermé. Suivant les valeurs de λ , certains types d'écoulement ne sont pas forcément observés à cause de la dominance exercée par l'infiltration de l'eau du cours d'eau. Ce flux est tel qu'il limite l'extension du cône de rabattement, pouvant dans les cas les plus importants (courbe 8) quasiment empêcher l'atteinte des deux dernières limites de l'aquifère.

On notera par ailleurs, par rapport aux autres solutions, que les augmentations et changements de régimes de la part d'eau du cours d'eau s'infiltrant dans l'aquifère sont encore plus rapides à cause du caractère fermé de l'aquifère, augmentant plus rapidement le gradient entre le cours d'eau et l'aquifère, et donc le flux d'infiltration.

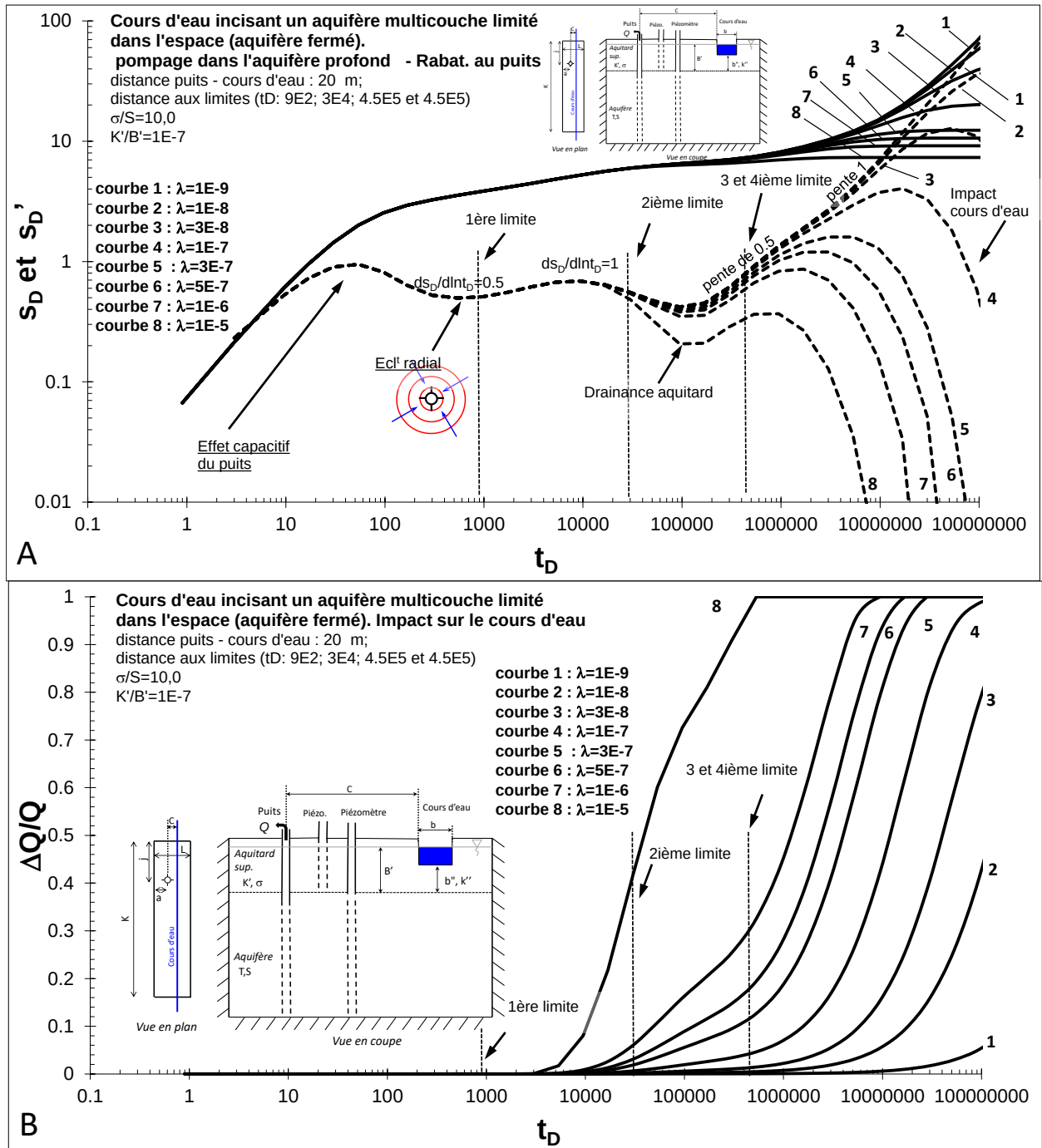


Figure 39 : aquifère multicouche limité dans l'espace par quatre limites étanches orthogonales, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface. Calculs pour différentes valeurs de λ . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (20 m).

s_D , s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel.

3.2.5. Aquifère multicouche limité par deux limites étanches, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface. Forage incliné.

Cette solution fait suite à la solution présentée au § 3.2.3 (Hunt, 2008) en considérant cette fois que le puits de pompage est incliné (Figure 40). Elle a été développée par l'auteur de ce rapport à partir de la solution de Hunt (2008) et du principe de captage partiel d'un puits issu des travaux de Hantush (1964). L'aquifère, l'aquitard et le cours d'eau ont les mêmes caractéristiques que dans les modèles précédents. La solution développée a aussi été testée et validée par des modèles de forages horizontaux ou inclinés (sans la présence du cours d'eau, Hunt, 2005b). Ce modèle est donc une version plus élaborée du modèle de Tsou et al., 2010 (forage incliné situé à proximité d'un cours d'eau incisant complètement l'aquifère sans limite étanche ; Tableau 1).

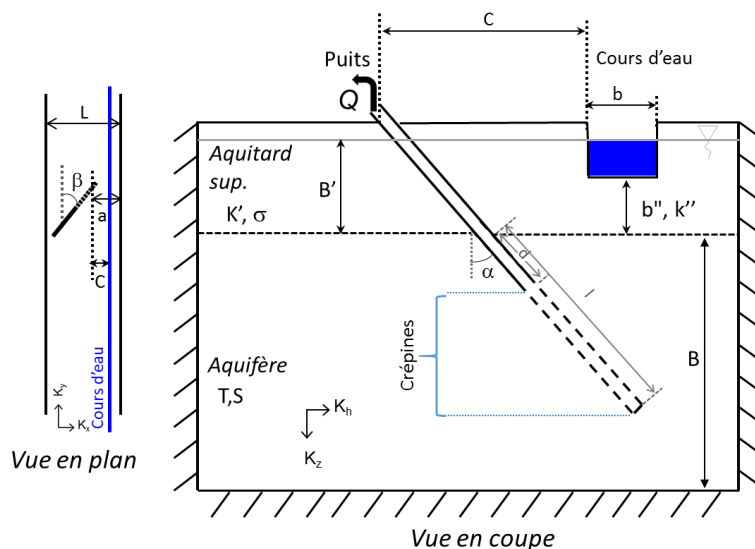


Figure 40 : cas d'un puits incliné, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface et aquifère limité dans l'espace par deux limites étanches parallèles ($x=y=0$ au puits de pompage).

Les solutions ont été calculées pour le rabattement dans l'aquifère pompé et l'impact sur le cours d'eau. Du fait de la complexité des équations à résoudre, les calculs peuvent cependant être assez longs.

Dans ce modèle (Figure 40), K' et B' sont respectivement la perméabilité et l'épaisseur de l'aquitard, σ son coefficient d'emmagasinement (ou porosité), k'' et b'' respectivement la perméabilité et l'épaisseur de l'aquifère sous le cours d'eau ou celle du lit du cours d'eau, et b sa largeur. C est la distance entre le puits pompé et le cours d'eau, a la distance entre le puits et la limite étanche située sur la même berge, et L la distance entre les deux limites étanches (celles-ci sont parallèles au cours d'eau). B est l'épaisseur de l'aquifère, Kh/Kz est l'anisotropie verticale de perméabilité (Kh = perméabilité horizontale et Kz , verticale). d et l sont respectivement, la longueur du forage dans l'aquifère et la distance entre le sommet de la crépine et le toit de l'aquifère. α décrit l'inclinaison du forage par rapport à la verticale ($\alpha=0^\circ$: forage vertical et $\alpha=90^\circ$: horizontal) et β son angle avec l'axe des x (l'axe des x est perpendiculaire au cours d'eau et aux deux limites).

L'impact sur le cours d'eau est toujours fonction du coefficient de drainance :

$$\lambda = \frac{b}{b''} k''.$$

Le calcul de l'évolution de l'impact sur le cours d'eau au cours du temps est obtenu par l'intégrale suivante :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{k''}{b''} \int_{-b}^0 \int_{-\infty}^{+\infty} s(x, y, 0, t) dx dy$$

Où ΔQ est le ratio de diminution du débit en fonction du temps, Q , le débit de pompage et $s(x, y, 0, t)$ le rabattement le long et sous le cours d'eau.

Cette solution permet de résoudre le problème pour un schéma aquifère complexe. Elle peut aussi s'appliquer au cas présenté en Figure 13 en posant $K'=0$ et $\sigma=S$. Cette solution a aussi les mêmes avantages que celles décrites au § 3.1.4 (Hunt, 2003 ; Figure 15) et au § 3.2.3 (Hunt, 2008 ; Figure 36) en ce qui concerne l'aquitard.

Ainsi cette solution offre un panel de situations hydrogéologiques avec la possibilité de jouer sur l'orientation du forage suivant la verticale et l'horizontale. C'est donc aussi une solution à privilégier, notamment dans le cas de forages avec des drains horizontaux. Dans ce cas, l'emploi du principe de superposition permettra de prendre en compte dans le calcul plusieurs drains de position et d'orientation différentes au sein de l'aquifère.

La Figure 41 présente une série de courbes types pour le modèle proposé et pour différentes inclinaisons du puits de pompage par rapport à la verticale ($\alpha=0^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ et 90° ; cas 1 à 4). Sa longueur crépinée est de 100 m et il est situé à 50 m du cours d'eau. Dans le dernier cas ($\alpha=90^\circ$), la profondeur du forage est située à 50 m, soit au milieu de l'aquifère ($B=100$ m). Dans cet exemple, l'aquifère est caractérisé par une anisotropie de perméabilité $Kh/Kz=10.0$. Pour toutes ces courbes, le contraste d'emménagement et le coefficient de drainance du cours d'eau λ sont maintenus constants ($\sigma/S=100.0$, $\lambda=10^{-5}$ m/s). La figure présente également les calculs à l'aide de la solution décrite au § 3.2.3 (Hunt, 2008) qui représente un cas particulier de cette solution (cas1, $\alpha=0^\circ$; Figure 41).

Durant les premiers temps du pompage ($t_D < 3^{E5}$; cas 2 [$\alpha=45^\circ$] et 3 [$\alpha=75^\circ$]), les courbes de dérivée du rabattement (s_D') décrivent successivement les effets liés à la capacité du puits et un premier écoulement radial correspondant au flux perpendiculaire à l'axe du forage. Ensuite, pour les temps plus longs et avant que ne soient perçues les deux limites (amorce d'une pente de 0,5 caractéristique d'un écoulement chenalisé ; $t_D < 6^{E6}$) un écoulement de type sphérique (pente de la dérivée : -0,5) caractérise la propagation de la pression sur l'ensemble de l'épaisseur aquifère. Le cas du forage horizontal (cas 4 [$\alpha=90^\circ$]) décrit un comportement un peu différent, notamment par l'arrivée rapide d'un écoulement de type sphérique et l'absence du premier écoulement radial, masqué par les effets de capacité de puits. Pour des temps encore plus longs ($3^{E7} < t_D < 1^{E10}$), toutes les courbes de dérivée (cas 1 à 4) forment une sorte de « V » traduisant l'alimentation induite par l'aquitard de surface, puis pour les temps très longs ($t_D > 1^{E10}$), l'effet du cours d'eau.

Concernant l'impact sur le cours d'eau, ce dernier est d'autant plus rapide que l'ouvrage se trouve, finalement, proche du cours d'eau ; le centre du puits dans les cas 2 et 3 ($\alpha=45^\circ$ et 75°) se trouvant plus proche que dans le cas 1 ($\alpha=0^\circ$). Cependant, on notera que dans le cas où le forage est horizontal (cas 4 ; $\alpha=90^\circ$), la position plus profonde de l'ouvrage et l'anisotropie de perméabilité du système ($Kh=10Kz$) limitent les échanges avec la surface et donc ralentissent l'impact sur le cours d'eau. Dans la configuration testée, c'est ce dernier cas qui induit la réaction la plus retardée du cours d'eau.

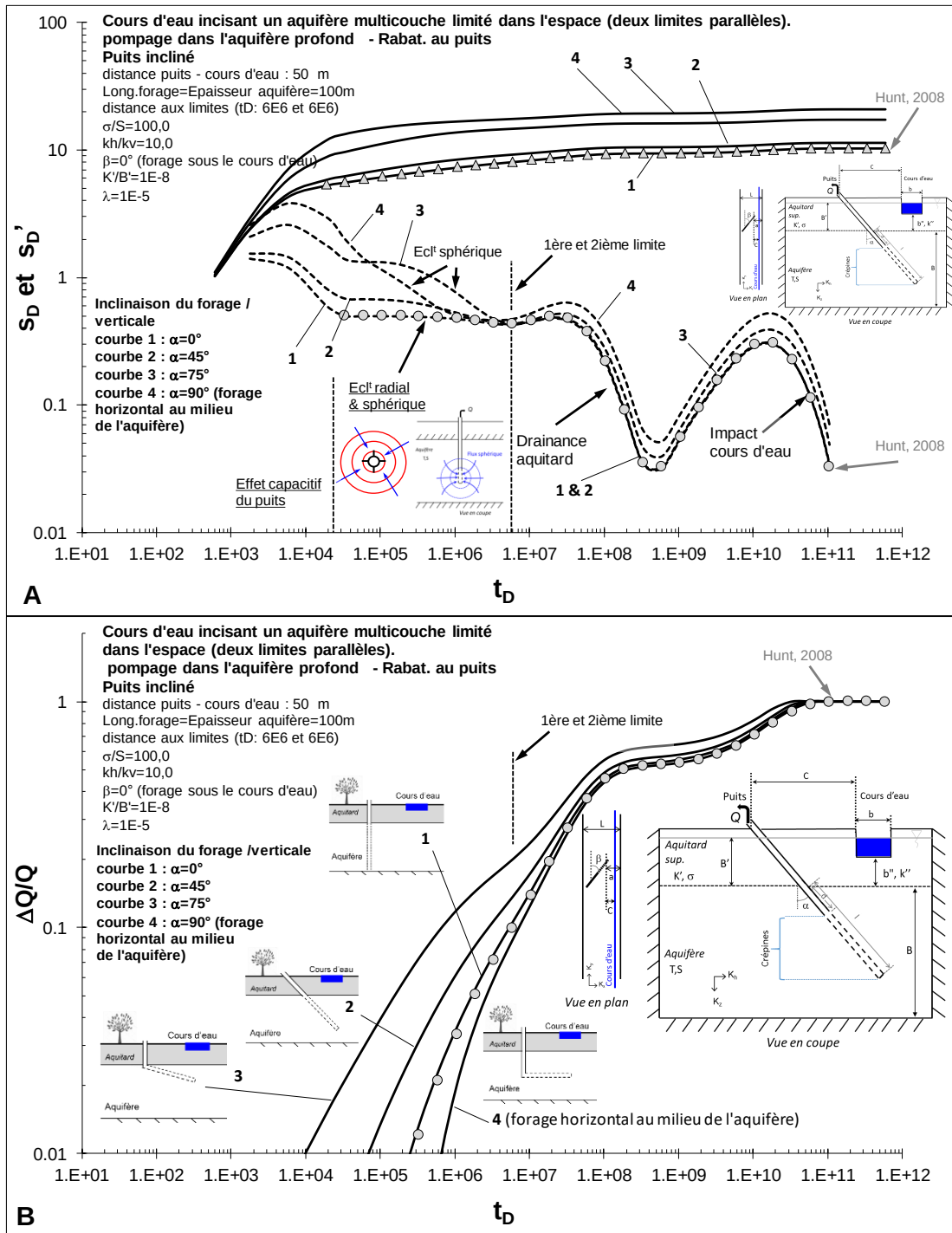


Figure 41 : cas d'un puits incliné, aquifère multicouche limité dans l'espace par deux limites étanches parallèles, cours d'eau avec lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface. Calculs pour différentes valeurs de α . A : évolution du rabattement (s_D) au puits de pompage et de sa dérivée (s_D'), B : impact du pompage sur le débit du cours d'eau. Le cours d'eau est toujours situé à la même distance (50 m).

s_D, s_D' : rabattement et dérivée adimensionnels ; t_D : temps adimensionnel. Le cas du forage vertical ($\alpha=0^\circ$; symboles 'rond' et 'triangle') est identique à celui de la solution de Hunt (2008).

3.2.6. Autres modèles faisant intervenir des limites d'aquifères et/ou des géométries de cours d'eau

Dans la littérature, on trouve d'autres types de configurations cours d'eau aquifère et limites étanches. Comme pour les autres modèles de types aquifères (§ 3.1.10), leurs courbes types n'ont pas été reprises car ces modèles sont assujettis à des configurations très particulières. Ces solutions, développées à partir de la théorie des images, considèrent un puits de pompage situé à proximité d'un cours d'eau formant un coude à 90° , ou un cours d'eau et une limite étanche formant un angle (un angle θ multiple de $\pi/2$) ; Figure 42. Dans ces modèles, les échanges entre l'aquifère et le cours d'eau sont parfaits (cours d'eau incisant totalement l'aquifère et pas de colmatage de berges). Pour les rabattements, les solutions sont disponibles ou peuvent être retrouvées à partir de la théorie des images dans van Poolen (1965), Strelsova (1988) et Kruseman et Ridder (1994). Pour les solutions de l'impact sur le cours d'eau, on se référera à Lelièvre (1969) et, Forkasiewicz et Peaudecerf (1976). Néanmoins, des abaques d'impact sur le cours d'eau ont été mis en annexe pour quelques cas.

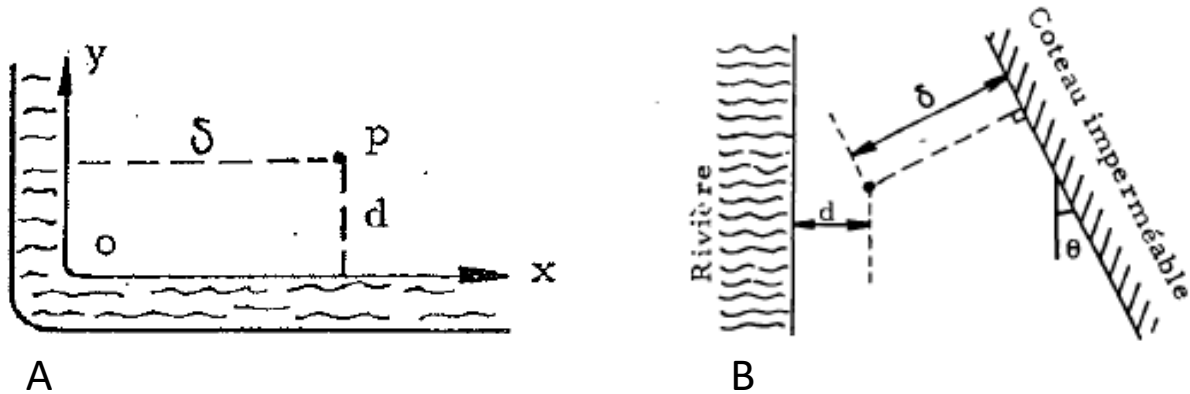


Figure 42 : autres modèles faisant intervenir des limites d'aquifères et/ou des géométries de cours d'eau (Lelièvre, 1969) : A- cours d'eau formant un coude, B- cours d'eau et limites étanches formant un angle.

4. Quelques remarques importantes

Le débit de pompage est-il systématiquement identique à celui prélevé sur le cours d'eau ?

Non, ce n'est que lorsque le régime permanent hydrodynamique est établi (rapport $\Delta Q/Q$ constant) que le débit au puits de pompage est égal au débit d'infiltration du cours d'eau (voir la Figure 6).

Ceci a toute son importance lorsque l'on s'intéresse au transfert des polluants. En effet, cette évaluation est nécessaire dans le cas d'un risque de pollution chimique de la nappe par un cours d'eau. Si l'ouvrage est déjà implanté et exploité la connaissance du rapport permettra de déterminer à quel débit il peut être exploité pour une concentration en polluants dans l'eau pompée acceptable pour l'usage que l'on veut en faire. Dans le cas où l'ouvrage est au stade de projet d'implantation toute connaissance sur ce rapport permettra d'optimiser le positionnement idéal de l'ouvrage en fonction du débit que l'on souhaite pomper. On notera que la même réflexion peut être faite dans le cas où c'est l'aquifère qui subirait une contamination.

Et si la surface piézométrique n'est pas horizontale ?

Les solutions présentées ici pour le rapport $\Delta Q/Q$ et les rabattements ont été établies dans le cas de surface piézométrique horizontale, mais s'applique par effet du théorème de superposition à tout autre cas (Forkasiewicz et Peaudecerf, 1976 ; Hunt, 2014). Ces solutions peuvent donc être utilisées même si la nappe n'est pas horizontale.

Il y a donc indépendance entre l'infiltration du cours d'eau vers la nappe (ou son 'manque à gagner' si la nappe alimente le cours d'eau) et la direction de l'écoulement des eaux souterraines. De façon pratique et quelle que soit la direction de l'écoulement, soit l'eau prélevée ne participera plus à l'alimentation du cours d'eau, soit l'eau du cours d'eau s'infiltrera directement dans l'aquifère par inversion locale de la direction du flux, soit les deux (voir Figure 3).

L'arrêt du pompage stoppe-t-il le flux d'infiltration du cours d'eau vers la nappe ?

Le théorème de superposition s'applique aussi pour les variations de débit du pompage, et ce que l'on soit en régime de pompage ou en injection d'eau dans le forage. Dans ce dernier cas, le cours d'eau verra son débit augmenter proportionnellement au ratio $\Delta Q/Q$. De part ce théorème, on peut calculer l'évolution du flux d'infiltration lorsque le pompage s'arrête (Figure 43). Ainsi, ce n'est pas parce que le pompage s'est arrêté que le flux d'infiltration s'arrête. Lors de l'arrêt, le flux d'infiltration diminue progressivement, pendant plusieurs jours, semaines ou mois suivant le type d'aquifère et les modalités d'échanges entre le cours d'eau et l'aquifère. L'arrêt de l'infiltration peut donc, dans certains cas être très long d'autant plus long que le système est inertiel. Dans l'exemple donné (Figure 43), il faut attendre plus de deux fois la durée du pompage pour considérer ce flux négligeable.

Par ailleurs, notons que ce même théorème s'applique aussi pour simuler des variations du débit de pompage, ou l'impact induit par plusieurs pompes (champ captant) sur un cours d'eau.

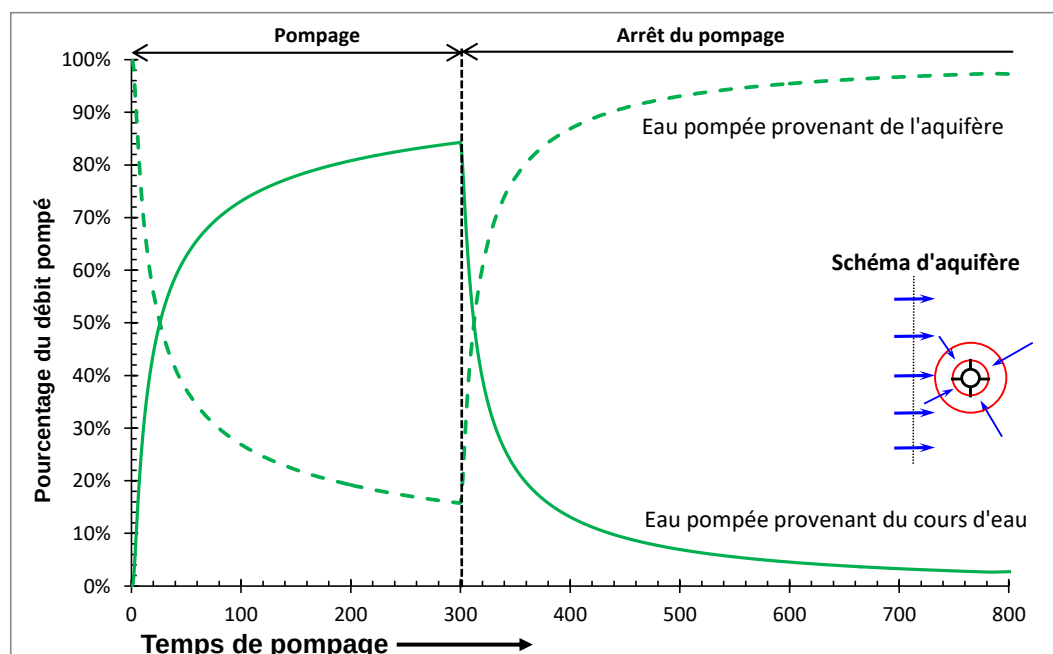


Figure 43 : évolution du débit d'infiltration en provenance du cours d'eau lors de l'arrêt du pompage. Modèle : Theis (1941).

Exploiter des eaux souterraines situées sous des niveaux peu perméables évite-t-il l'infiltration du cours d'eau vers les aquifères ?

Comme il a été démontré dans les cas présentés, l'effet d'un semi-perméable situé entre le cours d'eau est l'aquifère pompé – ou une berge colmatée - limite, ou plutôt ralenti le flux d'infiltration, mais en aucun cas ne l'annule. L'exemple ci-dessous (Figure 44) montre l'impact sur un cours d'eau de 10 m de large d'un pompage situé dans un aquifère multicouche. Dans ce cas, seul l'aquifère profond est pompé ($T_2=10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; $S_2=10^{-4}$), il est séparé de l'aquifère de surface ($T_1=10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$; $\sigma=0,05$) -et donc du cours d'eau- par un niveau épais de 10 m d'une très faible perméabilité, K' . Dans cet exemple, K' varie de 10^{-9} à 10^{-7} m/s . Cette modélisation montre que la faible perméabilité de l'interface limite les échanges entre aquifère et les systèmes de surface mais que tôt ou tard le pompage finit par impacter les eaux de surface. Par exemple, dans le cas où la perméabilité de l'aquitard vaut 10^{-8} m/s , l'impact sur le cours d'eau est de 7% du débit pompé au bout de 5 ans, de 12% au bout de 15 ans, de 17% au bout de 30 ans et d'environ 19% au bout de 40 ans.

Ceci montre que ce n'est pas parce que l'on exploite un aquifère profond, séparé de la surface par une ou des formations argileuses peu perméables, qu'il n'y aura pas ou peu d'impacts à terme sur les aquifères de surface, et donc sur le débit du cours d'eau. Par contre, moins ces niveaux seront perméables et plus ils seront épais, plus l'impact sur le cours d'eau sera long à se faire ressentir. Parfois, il faudra des années pour s'en apercevoir.

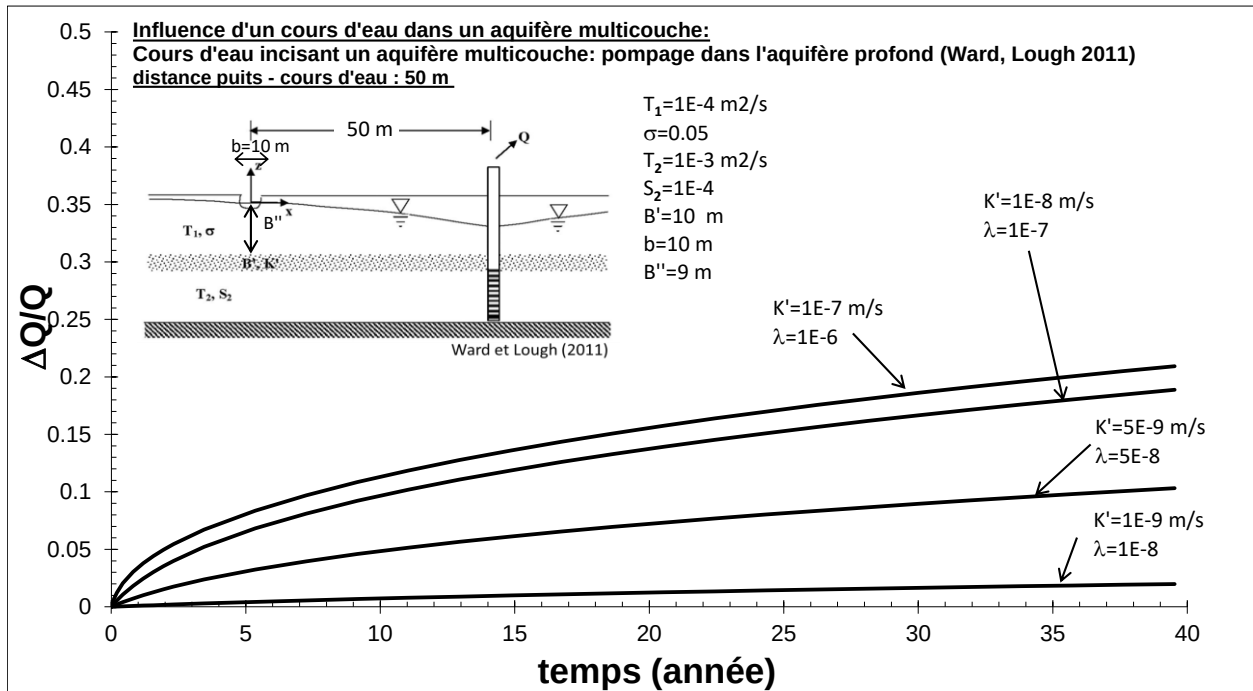


Figure 44 : impact sur un cours d'eau d'un pompage dans un aquifère multicouche ; pompage dans un aquifère profond séparé de la surface par un niveau peu perméable ($K' = 10^{-9}$, 5×10^{-9} , 10^{-8} et 10^{-7} m/s). Modèle de Ward et Lough (2011).

5. Types de suivis de l'impact d'un pompage sur les systèmes de surface

Cette partie n'a pas vocation à être exhaustive, plus de détails sont données dans tout ouvrage traitant du suivi des essais par pompage et des échanges nappe-rivière (Kruseman et de Ridder, 1994 ; Widory et al., 2003 ; Mouhri, et al., 2011 ; Paran et al., 2015). Ici ne sont rappelés que les principaux points.

5.1. SUIVI DANS LE(S) AQUIFERE(S)

Lors du pompage, il est conseillé de suivre les niveaux piézométriques aussi bien sur l'ouvrage pompé que sur les piézomètres d'observation lorsque ceux-ci existent. Le débit pompé doit aussi être suivi, et ce avec la même précision. Le pas d'acquisition de la mesure doit être suffisamment fin pour pouvoir permettre un diagnostic fiable suivant la méthode des dérivées, en général, un pas de temps à la minute est suffisant. La durée de l'essai est difficile à définir car suivant le type d'aquifères, l'éloignement au cours d'eau, la mise en évidence de l'impact sur le cours d'eau est très variable. Néanmoins, il est conseillé a minima des essais de 72 heures dans le cas d'aquifères monocouches, et d'au moins une semaine sinon 10 jours dans le cas d'aquifères multicouches, en particulier si c'est l'aquifère profond qui est pompé. Rappelons aussi que le suivi de la remontée, doit être réalisé sur la durée la plus longue possible, jusqu'à récupération complète des niveaux; celle-ci apportant autant d'information que la phase de pompage.

L'eau d'exhaure doit aussi être suivie. Des mesures physico-chimiques telles que conductivité électrique, température, pH, oxygène dissous, etc., pourront donner des informations sur la provenance de l'eau, et éventuellement mettra en évidence un part d'eau de surface. D'autres suivis chimiques : éléments majeurs, isotopiques, etc., pourront aussi être utilisés pour mettre en évidence la présence d'eaux de surface dans les eaux d'exhaure.

Des analyses bactériologiques, mais aussi de pesticides, ou toutes autres molécules récentes (gaz CFC, phytosanitaires, pharmaceutiques) susceptibles de marquer les eaux de surface peuvent aussi être utilisées comme traceurs de ces eaux.

5.2. SUIVI SUR LE SYSTEME DE SURFACE

Le suivi des systèmes de surface est plus complexe, en particulier lorsque le débit d'impact est faible devant celui du cours d'eau. On veillera donc à avoir un dispositif de suivi adapté aux variations de débit susceptibles d'être mesurées. L'idéal est de pouvoir disposer de mesures à l'amont et à l'aval de la zone d'infiltration du cours d'eau vers la nappe. Donc, plus le puits pompé sera situé loin du cours d'eau, plus la distance entre les stations de mesures de débit du cours d'eau devra être grande. Ceci permettra d'évaluer l'impact global du pompage. La Figure 45 présente un exemple théorique de la variation de l'impact en fonction de la longueur de tronçon du cours d'eau. Dans le cas présenté et pour les temps de pompage considérés, elle montre que lorsque la longueur du tronçon est plus de 8 fois celle de la distance entre le cours d'eau et le puits (cas où $L=100$ m), l'impact sur le tronçon est peu différent de l'impact total sur le cours d'eau (cas où $L=\infty$). Par contre, si la distance entre les stations aval et amont de mesures de débit du cours d'eau sont proches par rapport à la distance puits – cours d'eau, les mesures devront être comparées à un calcul réalisé sur le tronçon, et non à l'impact global. Ensuite, l'impact global du pompage sur le cours d'eau pourra être réalisé. Voir aussi l'encadré suivant pour les modalités de calcul de l'impact sur un tronçon de cours d'eau.

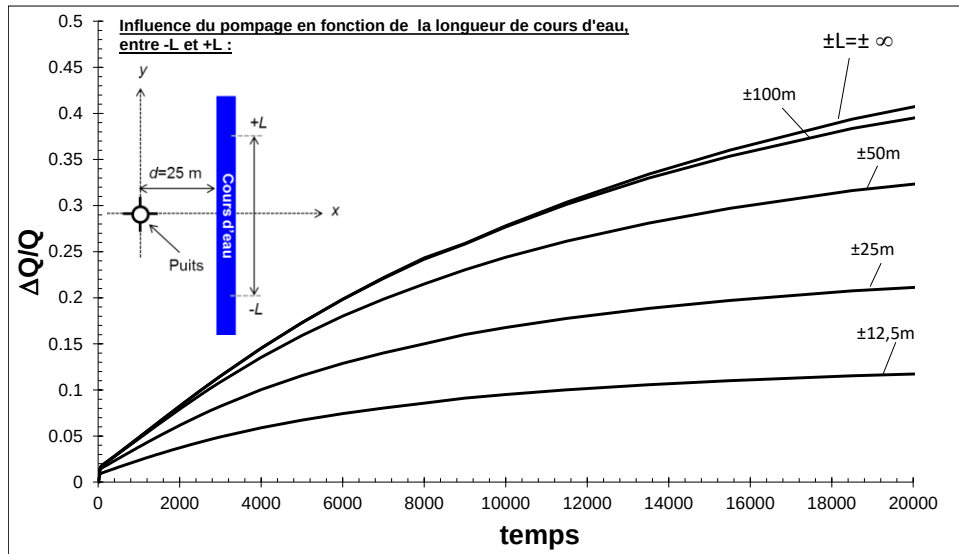


Figure 45 : calcul de l'impact sur un tronçon de cours d'eau, défini entre $-L$ et $+L$, pour un puits de pompage situé à 25 m du cours d'eau. Modèle : Hunt (2003).

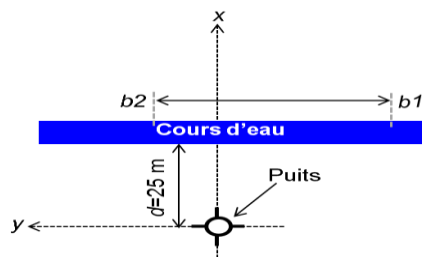
Il est aussi conseillé de réaliser des mesures de débit du cours d'eau avant le pompage, ceci permettant d'établir les zones et les débits où la nappe alimente le cours d'eau en régime naturel, voire où elle se perd, et donc d'adapter le dispositif en conséquence. Ces mesures peuvent soit être réalisées en continu par le biais de seuils de jaugeage, soit au moyen de jaugeage ponctuel (jaugeage différentiel) durant le déroulement des essais. Le cas échéant et durant les essais, on peut utiliser des traceurs artificiels (fluorescéine) pour mettre en évidence les connexions entre le cours d'eau et la nappe.

D'autres types de mesures au sein du cours d'eau, telles que conductivité électrique, pH, température, analyses chimiques, isotopiques, pesticides, et même hydrobiologiques (indicateurs biologiques) peuvent aussi être utilisées pour préciser les relations locales entre la nappe et le cours d'eau (Mouhri, et al., 2011 ; Paran et al., 2015).

Calcul de l'impact en termes de débit sur un tronçon de cours d'eau

La Figure 45 été réalisé avec un modèle de type Hunt (2003) ; cf. § 3.1.4 où le calcul de l'évolution de l'impact sur le cours d'eau au cours du temps est obtenu par l'intégrale suivante :

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \lambda \int_{b1}^{b2} s(0, y, t) dy \quad \text{avec} \quad \lambda = \frac{b}{b''} k''$$



Où $b1$ et $b2$ sont les limites du tronçon. Dans l'exemple de la Figure 45, $|b1| = |b2| = |L|$.

6. Conclusions et recommandations

De façon générale, le pompage des eaux souterraines à proximité de cours d'eau constitue un manque à gagner pour le cours d'eau, soit en réduisant la quantité d'eau souterraine qui s'écoule vers les cours d'eau, soit directement en infiltrant l'eau du cours d'eau vers l'aquifère. Dans certains cas, il peut même entraîner un assèchement total du cours d'eau. Ainsi tout prélèvement dans un aquifère connecté à un système d'eaux de surface constitue, la plupart du temps, un préjudice pour ce dernier qu'il convient d'estimer le plus précisément possible.

Comme il a été démontré, la configuration géologique, les propriétés hydrodynamiques des aquifères, la position du forage, le degré d'incision du cours d'eau ou la présence de berges colmatées, jouent un rôle important sur la façon dont le cours d'eau est impacté par le pompage. Même dans le cas d'aquifères multicouches où des niveaux aquifères confinés sont pompés sous d'épaisses formations géologiques peu perméables sur lesquelles les cours d'eau serpentent, l'impact sur le cours d'eau existe bien, même s'il est fortement ralenti. Il n'est donc pas raisonnable de croire que des niveaux peu perméables séparent les aquifères pompés des systèmes d'eau de surface qu'il n'y aura aucune conséquence sur ces derniers.

Ce document regroupe et détaille les courbes types de rabattement et d'impact sur le cours d'eau de vingt solutions analytiques établies pour des configurations géologiques, de géométrie du puits et de géométrie du cours d'eau différentes. Quatre de ces solutions sont nouvelles et proposées par l'auteur de ce rapport. Elles vont du cas simple où le cours d'eau incise complètement l'aquifère, aux cas complexes où un cours d'eau, situé dans un aquitard de surface, passe au-dessus d'un aquifère rectangulaire (aquifère fermé), ou au cas d'un forage incliné passant sous le lit du cours d'eau. La solution qui apparaît la plus avantageuse en terme de nombre de configurations qu'elle peut décrire est vraisemblablement celle de Hunt (2003) –Aquifère multicouche avec un cours d'eau au lit colmaté incisant partiellement un aquitard de surface, §3.1.4. L'intérêt de cette solution réside dans le fait qu'elle présente une configuration souvent rencontrée dans le milieu naturel mais aussi parce qu'elle peut résoudre d'autres configurations : cours d'eau incisant partiellement ou complètement l'aquifère pompé, berges colmatées. De plus, ce même schéma d'aquifère offre la possibilité de prendre en compte la géométrie de l'aquifère, 2 limites étanches parallèles (§ 3.2.4 ; Hunt, 2008) à 4 limites étanches orthogonales (§ 3.2.6).

Les réponses en terme d'impact étant très différentes d'un modèle à l'autre, le choix du modèle est donc primordial afin d'évaluer correctement l'impact sur les systèmes de surface. Jusqu'à présent seules les solutions destinées à quantifier l'impact du pompage sur le système des eaux de surface étaient utilisées, sans qu'il n'y ait réellement d'analyse de comportement hydrodynamique et donc du type d'aquifère en présence. Or, les techniques modernes de diagnostic des essais par pompage, basées sur la dérivée des rabattements sont susceptibles de renseigner non seulement sur la structure et les propriétés hydrodynamiques de l'aquifère pompé (homogène, anisotropie de perméabilité, multicouche, effet de limites, etc.), mais aussi, de mettre en évidence les modalités d'échange « nappe-rivière » (colmatage des berges, cours d'eau de faible incision ou non, etc.). Les courbes types proposées dans ce document présentent les modalités de comportements hydrodynamiques de chacun des modèles qui comparées aux données expérimentales de terrain permettront de réaliser un diagnostic aussi précis que possible visant à identifier la solution mathématique la plus appropriée pour modéliser les rabattements et donc l'impact sur le cours d'eau.

Si dans l'absolu il est préférable de modéliser conjointement les observations de rabattement et les mesures de flux des eaux de surface, bien souvent ces dernières sont absentes ou difficiles à réaliser. Cependant, le diagnostic de l'essai et le choix de la solution mathématique adéquate,

eu égard à sa validation par d'autres données de terrain (géologie, géométrie de cours d'eau, etc.), permettra d'une part la modélisation des rabattements mais aussi, toujours par modélisation, d'évaluer a minima les ordres de grandeur de l'impact du pompage sur le cours d'eau avec un modèle réaliste.

Au niveau de grands bassins versants où sont présents de nombreux forages d'exploitation, l'utilisation de modèles numériques maillés s'avère souvent plus avantageuse car ils permettent de prendre en compte des aspects plus complexes de la réalité que ne le peuvent les solutions analytiques : géométrie des cours d'eau, géométrie des aquifères, occupation des sols, modalités de recharge des aquifères, etc., et d'évaluer les phénomènes de transport de polluants. Toutefois, l'utilisation de solutions analytiques sur ces secteurs reste primordiale car d'une part elle permet de caractériser les propriétés des aquifères et les modalités des échanges nappe-rivière qui alimenteront par la suite la modélisation numérique, et d'autre part, car ces solutions peuvent servir à réaliser une première estimation de ces impacts (cartes d'incidence des pompages sur un cours d'eau par exemple ; BRGM, 1996 ; Vernoux et al., 2001). A plus petite échelle, au niveau d'un captage ou d'un champ captant, les données sont la plupart du temps insuffisantes pour permettre l'élaboration d'un modèle numérique maillé, laissant alors place aux solutions analytiques tant pour l'estimation des débits d'exploitation des ouvrages que des éventuels impacts sur les eaux de surface. Ainsi, que ce soit à l'échelle d'un ouvrage ou à l'échelle d'un grand bassin versant, l'utilisation de ces solutions est largement répandue.

7. Références bibliographiques

Arnaud L., Dewandel B. (2016). Avis technique relatif à l'exploitabilité de la nappe alluviale de la Goutte du Chat, commune de Gérardmer (88). Rapport BRGM/RP-65786-FR, 32 pages, 18 figures, 2 tableaux, 1 annexe.

Avias, J. (1995). Gestion active de l'exsurgence karstique de la source du Lez (Hérault, France) 1957–1994. *Hydrogéologie* 1, 113–127.

Barlow, B.M., Leake, S.A. (2012). Streamflow depletion by wells—understanding and managing the effects of groundwater pumping on streamflow. USGS, Groundwater Resources Program, Circular 1376, ISBN 978-1-4113-3443-4, 95 p.

Bonnet, M., Margat, J. (1976). Aide mémoire sur l'évaluation des ressources en eau des aquifères subordonnés au cours d'eau. Rapp. BRGM, 76SGN060 AME. 10 p.

Boulton, N.S. (1973). The influence of delayed drainage on data from pumping tests in unconfined aquifers. *J. Hydro.* 19, no.2: 157-169.

Bourdarot, G. (1996). Essais de puits - Méthodes d'interprétation. Ed. : Technip Paris, France, 350 p.

Bourdet, Whittle T.M., Dougals, A.A., Pirard V.M. (1983). A new set of type curves simplifies well test analysis, *World Oil*.

Bourdet D., Ayoud J.A. and Pirard Y.M. (1989). Use of pressure derivative in well-test interpretation. *SPE*, 293-302.

Bourdet, D. (2002). Well testing analysis: the use of advanced interpretation modes. Elsevier, Amersdam, The Netherlands, 426 p.

Bredehoeft, J.D., Papadopoulos, S.S., and Cooper, H.H., Jr. (1982). Groundwater—The water-budget myth, in *Scientific basis of water-resource management*: Washington, D.C., National Academy Press, p. 51–57.

BRGM (1996). Impact sur le débit des cours d'eau des prélèvements d'eau souterraine des nappes connexes aux rivières. Rapp. BRGM R-38930. 63 p.

Brunner, Philip, Cook, P.G., and Simmons, C.T. (2011). Disconnected surface water and groundwater—From theory to practice: *Ground Water*, v. 49, no. 4, p. 460–467.

Butler, J. J., Zlotnik, V. A., and Tsou, M. S. (2001). "Drawdown and stream depletion produced by pumping in the vicinity of a partially penetrating stream." *Ground Water*, 39(5), 651–659.

Butler, J.J., Zhan, X., Zlotnik, V.A. (2007). Pumping-induced drawdown and stream depletion in a leaky aquifer system. *Ground Water* 45 (2), 178–186. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-6584.2006.00272.x>.

Collins, R.E. (1959). Fluid migration across fixed boundaries in reservoirs producing by fluid expansion". *Transaction of the American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers (AIME)*, vol. 216, 1953, p. 78-84.

Deruyck B., Ehlig-Economides C. and Joseph J. (1992). Testing design and analysis. Oilfield and analysis. 28-45.

Dewandel B., Petelet-Giraud E., Lucassou F. avec la collaboration de Koch F., Vergnaud V. (2015). Etudes complémentaires sur les forages de la vallée de l'Aff : réinterprétation des essais de pompage, analyses physico-chimiques et isotopiques. Rapport final. BRGM/RP-64225-FR, 71 p., 35 ill., 13 tabl., 3 ann.

Dewandel, B., Lanini, S., Lachassagne, P., Maréchal, J.-C., 2018. A generic analytical solution for modelling pumping tests in wells intersecting fractures. J. Hydrol., 559, 89–99, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.02.013>.

Forkasiewicz, J., Peaudecerf, P. (1976). Evaluation des débits soustraits à une rivière par un pompage dans un puits riverain. Rapp. BRGM, 76SGN032 AME. 45 p.

Ferris, J.G., Knowles, D.B., Brown, R.H., Stallman R.W. (1962). Theory of aquifer tests. U.S.G.S. Water-Supply Paper. 1536-E, 69-174.

Glover, R. E., and Balmer, C. G. (1954). "River depletion from pumping a well near a river." Trans. Am. Geophys. Union, 35(3), 468–470.

Gringarten, A.C., Ramey, H.J. Raghavan R. (1974). Unsteady-state pressure created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture. SPE, August 1974, 347-360.

Hantush, M. S. (1962). "Flow of groundwater in sands of uniform thickness; 3 flow to wells." J. Geophys. Res., 67, 1527–1534.

Hantush, M. S. (1964). "Hydraulics of wells. In: V.T. Chow (editor). Advances in hydrosciences Vol.1, 281-432. Academic Press, New York and London.

Hantush, M. S. (1965). "Wells near streams with semipervious beds." J. Geophys. Res., 70(12), 2829–2838.

Huang, C.S., Lin, W.S., Yeh, H.D. (2014). Stream filtration induced by pumping in a confined, unconfined or leaky aquifer bounded by two parallel streams or by a stream and an impervious stratum. Jour. of Hydrol. 513, 28–44. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.039>

Hunt, B. (1999). "Unsteady stream depletion from ground water pumping." Ground Water, 37(1), 98–102.

Hunt, B. (2003). "Unsteady stream depletion when pumping from semiconfined aquifer." J. Hydrol. Eng., 10.1061/(ASCE)1084-0699(2003)8:1(12), 12–19.

Hunt, B. (2004). "A spring-depletion solution". ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol.9, No.2: 144-149.

Hunt, B. (2005a). "Visual basic programs for spreadsheet analysis." Ground Water, 43(1), 138–141.

Hunt, B. (2005b). Flow to vertical and nonvertical wells in leaky aquifers. J. Hydrol. Eng., [doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2005\)](http://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)), vol.10, 477-484.

- Hunt, B. (2008). "Stream depletion for streams and aquifers with finite widths." J. Hydrol. Eng., 10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(80), 80–89.
- Hunt, B. (2009). "Stream depletion in a two-layer leaky aquifer system." J. Hydrol. Eng., 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000063, 895–903.
- Hunt, B. (2014). "Review of Stream Depletion Solutions, Behavior, and Calculations". J. Hydrol. Eng., 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000768, 167-178.
- Hunt, B., and Scott, D. (2005). "Extension of Hantush and Boulton Solutions." J. Hydrol. Eng., 10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:3(223), 223–236.
- Hunt, B., and Scott, D. (2007). "Flow to a well in a two-aquifer system." J. Hydrol. Eng., 10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:2(146), 146–155.
- Hunt, B. and M. Smith (2008). Improved spring depletion solution and analysis. ASCE Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 13, No.. 2, 80-89.
- Hunt, B., Weir, J. J., and Clausen, B. (2001). "A stream depletion field experiment." Ground Water, 39(2), 283–289.
- Jenkins, C.T. (1968). Computation of rate and volume of stream depletion by wells: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 4, chap. D1, 17 p.
- Kruseman, G.P., de Ridder, N.A. (1994). "Analysis and evaluation of pumping test data". ILRI publication 47. Wageningen, The Netherlands.
- Ladouche B., Marechal J.-C., Dorfliger N. (2014). Semi-distributed lumped model of a karst system under active management, Journal of Hydrology 509, 215–230.
- Lelièvre, R.F. (1969). Etude de l'influence de pompages en nappes alluviales sur le régime d'étiage du réseau superficiel. Rapp. BRGM 69 SGL 073 HYD., 95 p.
- Lough, H. K. (2004). "The evaluation of hydrological parameters for stream depletion assessments." M.E. thesis. Dept. of Civil Engineering, Univ. of Canterbury, Christchurch, New Zealand.
- Lough, H. K., and Hunt, B. (2006). "Pumping test evaluation of stream depletion parameters." Ground Water, 44(4), 540–546.
- Moulin M., Dewandel B., Ladouche B., Bailly-Comte V. (2015). Amélioration de la compréhension du fonctionnement hydrogéologique du secteur de la source d'Entraigues (83). Rapport final. BRGM/RP-65200-FR, 185 p., 119 ill., 11 ann., 1 CD ROM.
- Mouhri A., Flipo N., Saleh F. (2011). État de l'art sur les méthodes de caractérisation et de quantification des échanges nappe-rivière. Programme PIREN-Seine, 31p., 5 ill.
- Paran F, Arthaud F, Novel M, Graillot D., Bornette G., Piscart C., Marmonier P., Lavastre V., Travi Y., Cadilhac L. (2015). Caractérisation des échanges nappes-rivières en milieu alluvionnaire. Guide méthodologique. Agence de l'Eau Rhône, Méditerranée, Corse, 180 p.
- Renard Ph., Glenz D. and M. Mejias (2009). Understanding diagnostic plots for well-test interpretation. Hydrogeology Journal. 17: 589–600.

Theis, C.V. (1935). The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. Trans. Am. Geoph. Union, 16, 519-524.

Theis, C. V. (1941). "The effect of a well on the flow of a nearby stream." Trans. Am. Geophys. Union, 22(3), 734–738.

Thiéry D. (2012). Logiciel TIGRE - Théorie des Images dans une Géométrie Rectangulaire. Rapp. BRGM/RP-61429-FR, 43 p., 18 fig. (Site web : <http://marthe.brgm.fr/> , à la page « TIGRE »).

Tsou, P. R., Feng, Z. Y., Yeh, H. D., and Huang, C. S. (2010). "Stream depletion rate with horizontal or slanted wells in confined aquifers near a stream." Hydrol. Earth Syst. Sci., 14(8), 1477–1485.

Spane F.A. and Wurstner S.K. (1993). DERIV: a computer program for calculating pressures derivatives for use in hydraulic test analysis.

Shlumberger (2002). Well test interpretation. SCHLUMBERGER. Rap., 122 p.

Strelsova, T.D.(1988). Well Testing in Heterogeneous Formations. Exxon Monograph, Ed. John Wiley & Sons, Inc., 413 p.

Su, G.W., Jasperse, James, Seymour, Donald, Constantz, James, and Zhou, Quanlin (2007). Analysis of pumping-induced unsaturated regions beneath a perennial river: Water Resources Research, v. 43, W08421, 14 p. <http://dx.doi.org/10.1029/2006WR005389>.

van Poolen, H.K. (1965). Drawdown curves give angle between intersecting faults. Oil and Gas J., 63, 71-75.

Vernoux, J.-F., Lenindre Y.-M., Martin, J.-C. (2001). Relations nappe-rivière et impact des prélèvements d'eau souterraine sur les cours d'eau dans le bassin de la Juine et de l'Essonne. Rap. BRGM RP-50637-FR. 155 p.

Ward, N.D. and H. Lough. (2011). "Stream depletion from pumping a semiconfined aquifer in a two-layer leaky aquifer system." Journal of Hydrologic Engineering, Vol. 16, No. 11, 955-959.

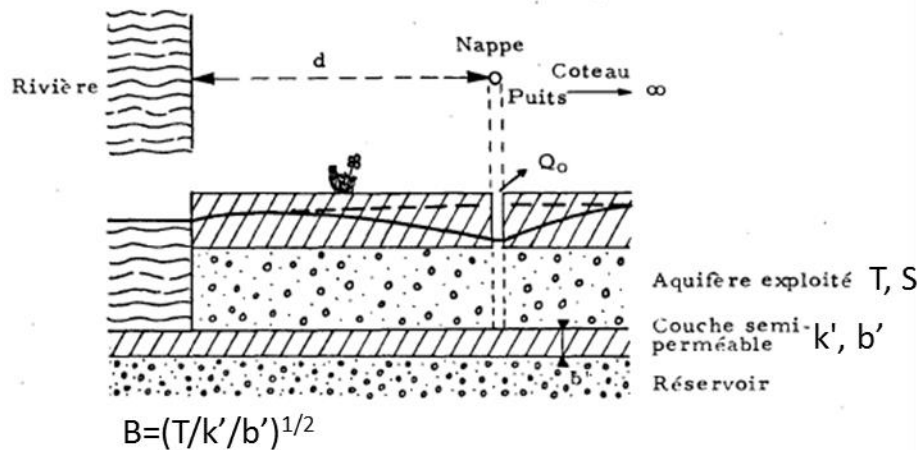
Widory, D., Petelet-Giraud, E., Négrel, Ph., Grau, S. (2003). Etude isotopique de la nappe alluviale du champ captant de l'île de Chambon (Allier) : mise en évidence des circulations et identifications des sources de pollution. BRGM/RP-52536-FR, 61 p.

Winter, T.C., Harvey, J.W., Franke, O.L., and Alley, W.M. (1998). Ground water and surface water—A single resource: U.S. Geological Survey Circular 1139, 79 p.

Zhang, Yingqi, Hubbard, Susan, and Finsterle, Stefan (2011). Factors governing sustainable groundwater pumping near a river: Ground Water, v. 49, no. 3, p. 432–444.

Annexe 1

Solutions supplémentaires et abaques



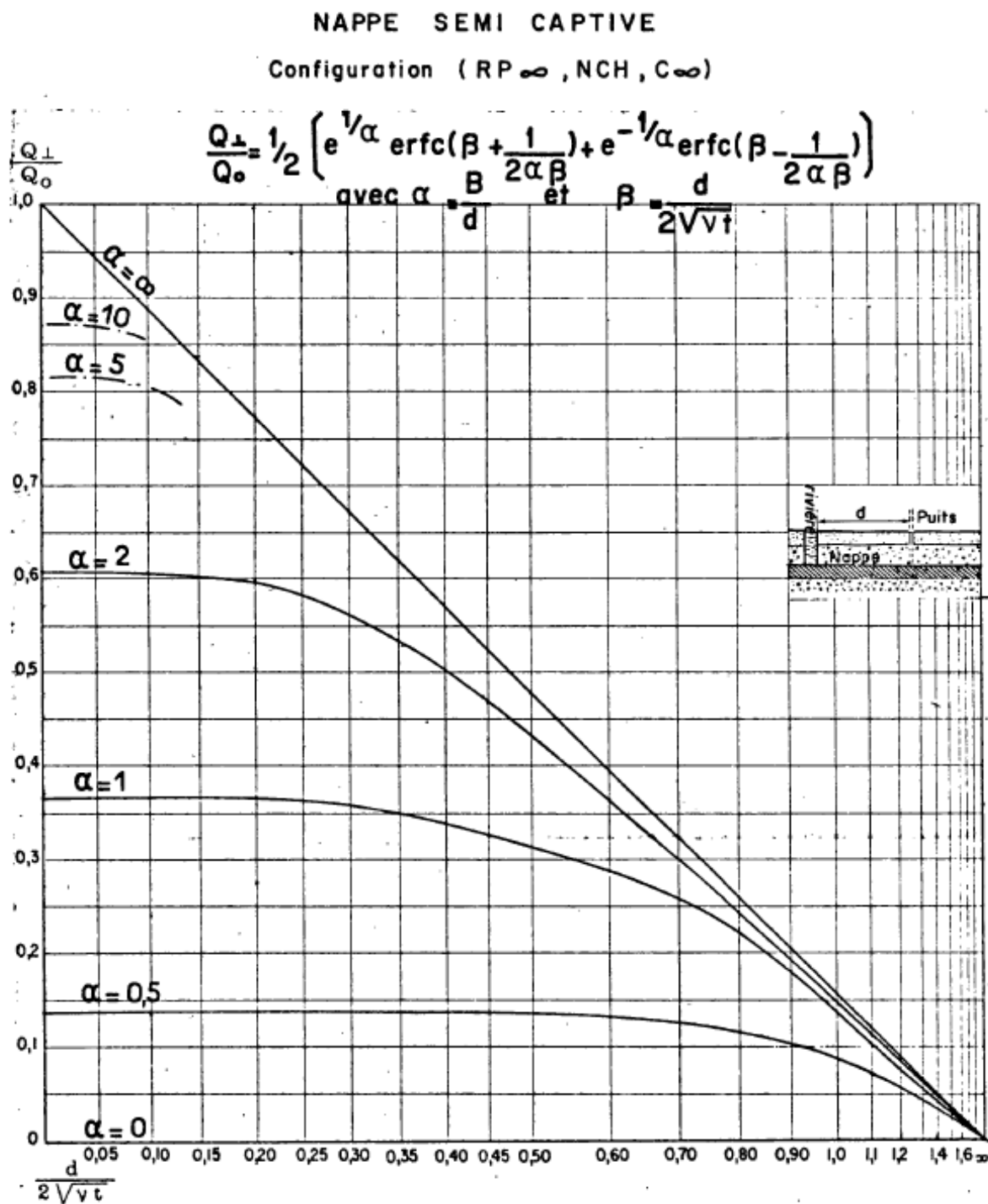
Nappe semi-captive, schéma (Lelièvre, 1969).

$$\frac{Q_L}{Q_0} = \frac{1}{2} \left[e^{\frac{1}{\alpha}} \operatorname{erfc} \left(\beta + \frac{1}{2\alpha\beta} \right) + e^{-\frac{1}{\alpha}} \operatorname{erfc} \left(\beta - \frac{1}{2\alpha\beta} \right) \right]$$

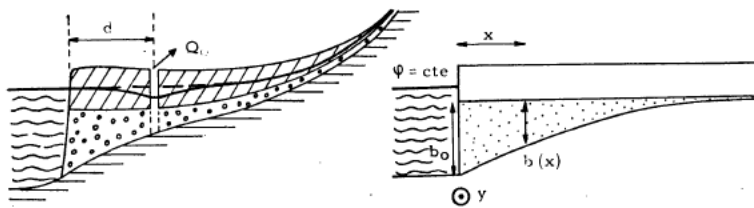
Solution analytique de l'impact sur le cours d'eau (Lelièvre, 1969).

$$\alpha=B/d ; \beta=d/(tT/S)^{1/2} ; B=(T/k'/b')^{1/2}$$

abaque 9



Nappe semi-captive (Lelièvre, 1969) ; impact sur le cours d'eau, abaque.



Configuration schématique

Schématisation analytique

- géométrie : a indice de variation de l'épaisseur de la couche

$$a = \frac{x}{\log \frac{b(x)}{b(x=0)}}$$

Nappe à épaisseur uniformément variable (variation exponentielle), schéma (Lelièvre, 1969).

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{1}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\beta + \frac{1}{2\alpha\beta} \right) + e^{-\frac{2}{\alpha}} \operatorname{erfc} \left(\beta - \frac{1}{2\alpha\beta} \right) \right]$$

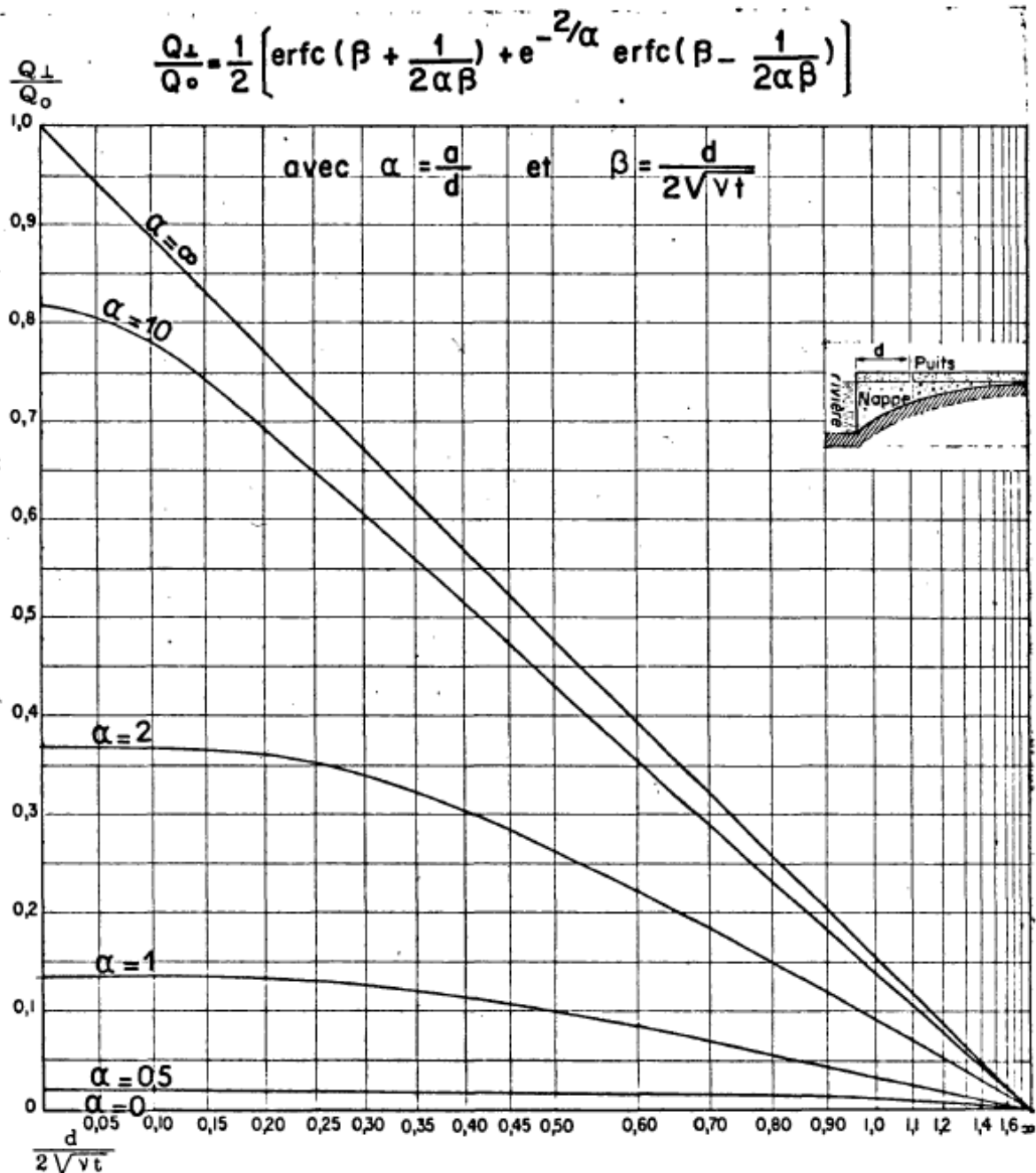
$$\text{avec } \alpha = \frac{a}{b} \quad \text{et} \quad \beta = \frac{d}{2\sqrt{\nu t}}$$

Solution analytique de l'impact sur le cours d'eau (Lelièvre, 1969) ; $\nu = T/S$.

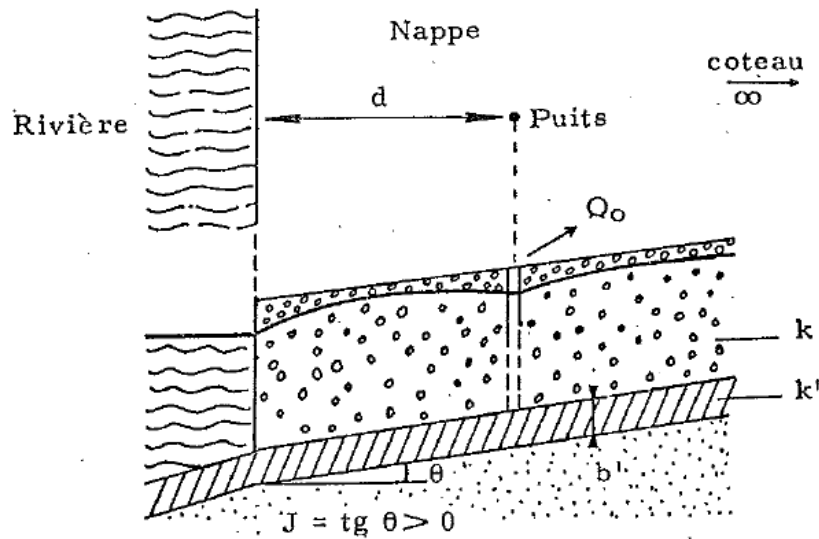
abaque II

NAPPE D'ÉPAISSEUR UNIFORMEMENT VARIABLE

Configuration (R P ∞ , NCV)



Nappe à épaisseur uniformément variable, variation exponentielle (Lelièvre, 1969) ; impact sur le cours d'eau, abaque.



Configuration schématique

Paramètres du problème

- géométrie : h_m , hauteur mouillée moyenne
 J , pente du substratum semi-perméable ;
- propriétés hydrodynamiques : - de l'aquifère exploité $\nu = \frac{K}{S_s}$
 - de la couche semi-perméable

$$B = \sqrt{\frac{K h_m}{K'/b'}}$$
- position du puits : d

Nappe avec substratum incliné ($J \leq 2\%$), schéma (Lelièvre, 1969).

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{1}{2} e^{-\frac{dJ}{2\bar{h}m}} \left[e^{d\sqrt{\frac{1}{B^2} + \frac{J^2}{4\bar{h}m^2}}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{d}{2\sqrt{vt}} + \sqrt{vt} \sqrt{\frac{1}{B^2} + \frac{J^2}{4\bar{h}m^2}} \right) \right. \\ \left. + e^{-d\sqrt{\frac{1}{B^2} + \frac{J^2}{4\bar{h}m^2}}} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{d}{2\sqrt{vt}} - \sqrt{vt} \sqrt{\frac{1}{B^2} + \frac{J^2}{4\bar{h}m^2}} \right) \right]$$

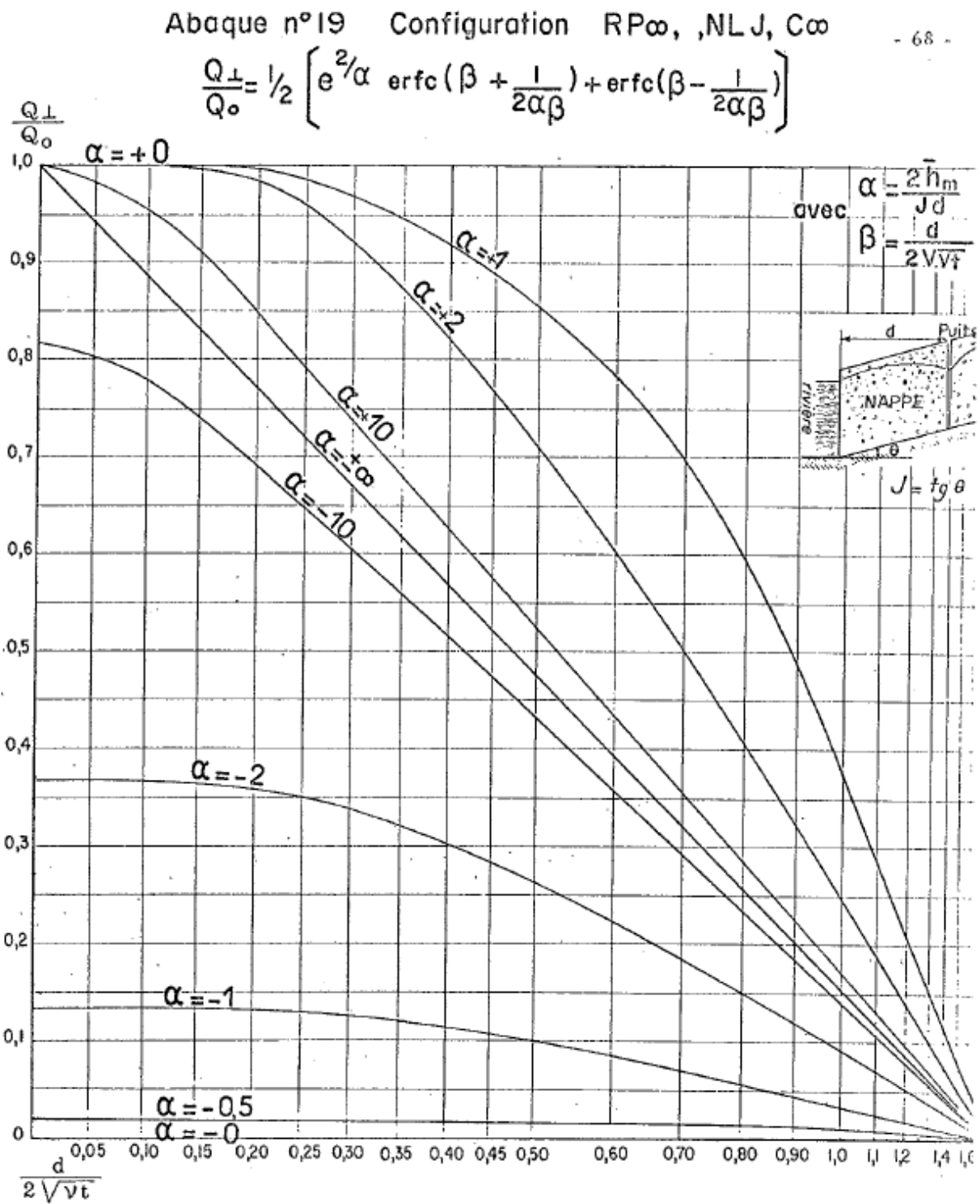
$$\text{et } \frac{v_1}{v_0} = \frac{e^{-\frac{dJ}{2\bar{h}m}}}{2\sqrt{vt} \sqrt{\frac{1}{B^2} + \frac{J^2}{4\bar{h}m^2}}} \left[\left[\frac{d}{2\sqrt{vt}} + \sqrt{vt} \sqrt{\frac{1}{B^2} + \frac{J^2}{4\bar{h}m^2}} \right] e^{d\sqrt{\frac{1}{B^2} + \frac{J^2}{4\bar{h}m^2}}} \operatorname{erfc} \left(\frac{d}{2\sqrt{vt}} + \sqrt{vt} \sqrt{\frac{1}{B^2} + \frac{J^2}{4\bar{h}m^2}} \right) \right. \\ \left. - \left[\frac{d}{2\sqrt{vt}} - \sqrt{vt} \sqrt{\frac{1}{B^2} + \frac{J^2}{4\bar{h}m^2}} \right] e^{-d\sqrt{\frac{1}{B^2} + \frac{J^2}{4\bar{h}m^2}}} \operatorname{erfc} \left(\frac{d}{2\sqrt{vt}} - \sqrt{vt} \sqrt{\frac{1}{B^2} + \frac{J^2}{4\bar{h}m^2}} \right) \right]$$

Solution analytique de l'impact sur le cours d'eau (Lelièvre, 1969) ; cas général ($J \leq 2\%$).

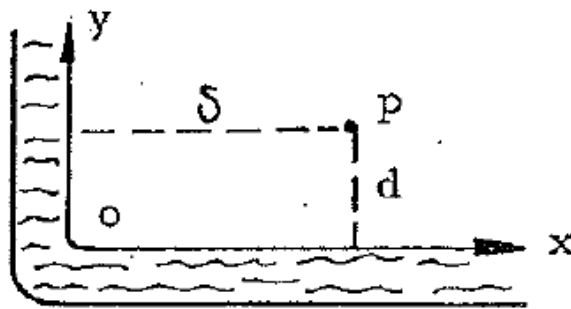
$$\text{D'où } \frac{Q_1}{Q_0} = \frac{1}{2} \left[e^{\frac{2}{\alpha}} \operatorname{erfc} \left(\beta + \frac{1}{2\alpha\beta} \right) + \operatorname{erfc} \left(\beta - \frac{1}{2\alpha\beta} \right) \right]$$

avec $\alpha = \frac{2\bar{h}m}{Jd}$ et $\beta = \frac{d}{2\sqrt{vt}}$

Solution analytique de l'impact sur le cours d'eau (Lelièvre, 1969) ; cas particulier avec $k'=0$ ($J \leq 2\%$).



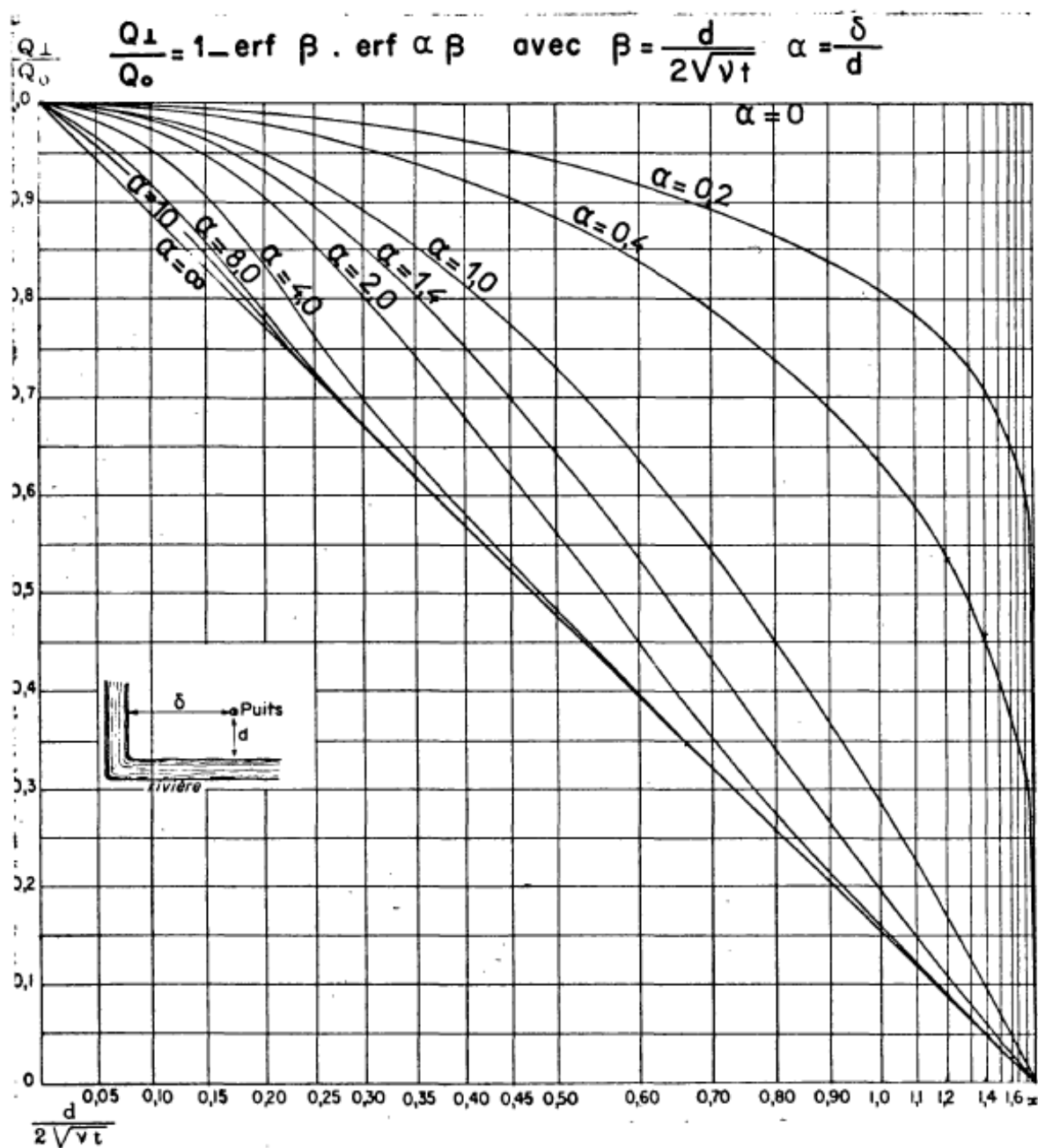
Solution analytique de l'impact sur le cours d'eau (Lelièvre, 1969) ; cas particulier avec $k'=0$ ($J \leq 2\%$) ; impact sur le cours d'eau, abaque.



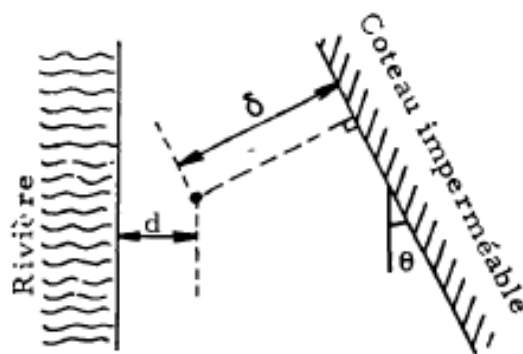
Pompage situé à proximité d'un cours d'eau formant un coude, schéma (Lelièvre, 1969).

$$\frac{Q_1}{Q_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{d}{2\sqrt{\nu t}}\right) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{\delta}{d} \cdot \frac{d}{2\sqrt{\nu t}}\right)$$

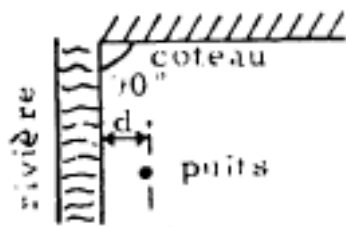
Solution analytique de l'impact sur le cours d'eau (Lelièvre, 1969) ; $\nu = T/S$.



Pompage situé à proximité d'un cours d'eau formant un coude (Lelièvre, 1969) ; impact sur le cours d'eau, abaque.

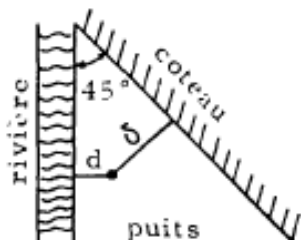


Pompage situé à proximité d'un cours d'eau et limites étanches formant un angle, schéma (Lelièvre, 1969).



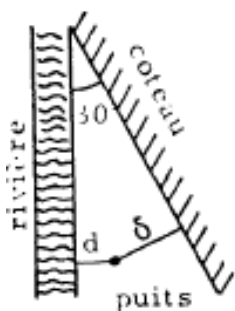
$$\frac{Q_1}{Q_0} = \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{vt}}$$

Pour $\theta = \pi/2$; solution analytique de l'impact sur le cours d'eau (Lelièvre, 1969) ; $v = T/S$.



$$\frac{Q_1}{Q_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{2}{\sqrt{2}} \frac{\delta}{d} + 1 \right) \frac{d}{2\sqrt{vt}} \cdot \operatorname{erf} \frac{d}{2\sqrt{vt}}$$

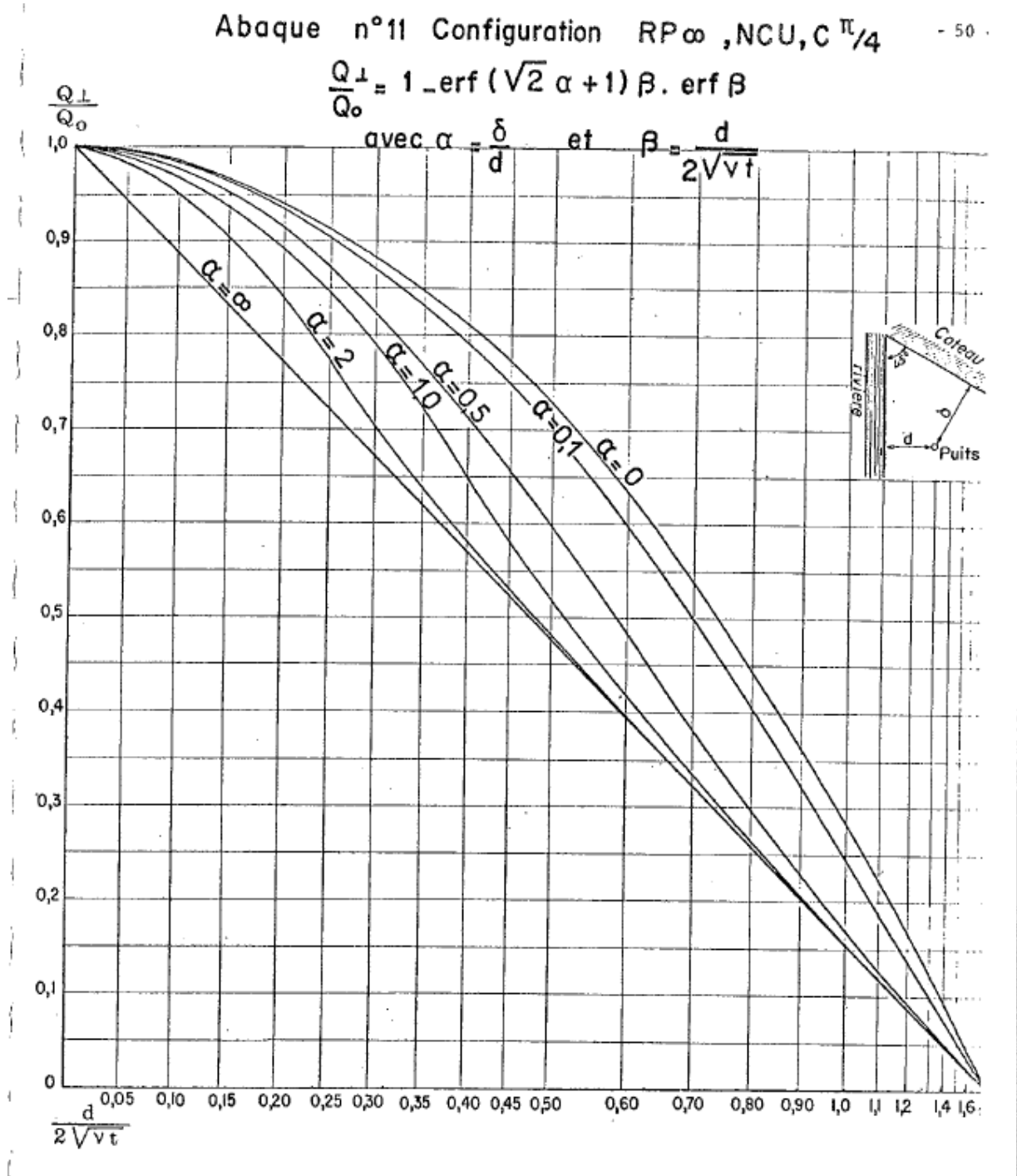
Pour $\theta = \pi/4$; solution analytique de l'impact sur le cours d'eau (Lelièvre, 1969) ; $v = T/S$.



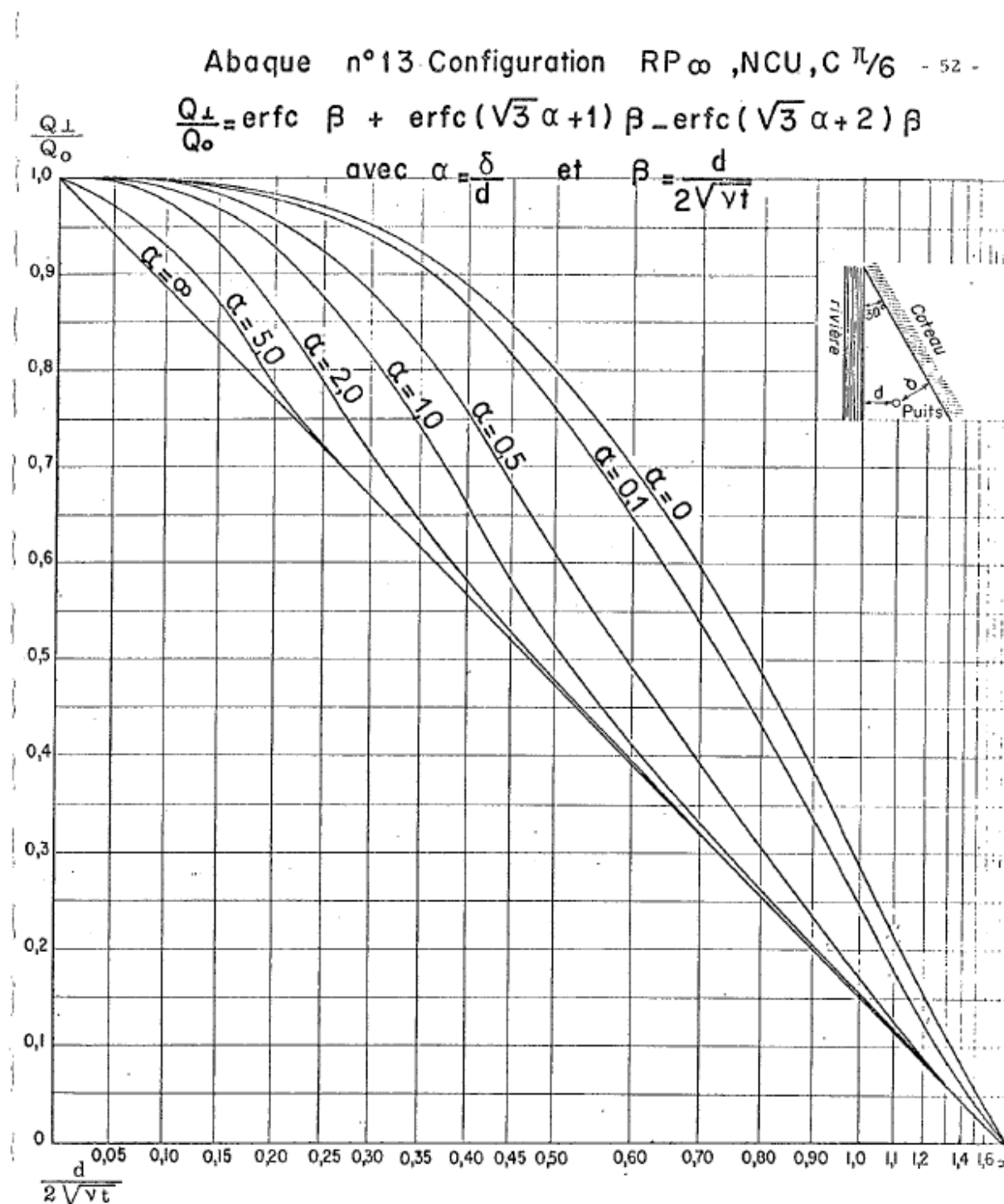
$$\frac{Q_1}{Q_0} = \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{vt}} + \operatorname{erfc} \left(\sqrt{3} \frac{\delta}{d} + 1 \right) \frac{d}{2\sqrt{vt}} - \operatorname{erfc} \left(\sqrt{3} \frac{\delta}{d} + 2 \right) \frac{d}{2\sqrt{vt}}$$

Pour $\theta = \pi/6$; solution analytique de l'impact sur le cours d'eau (Lelièvre, 1969) ; $v = T/S$.

La solution générale, valable pour θ un multiple de $\pi/2$ ($\theta = p\pi/2$) et disponible dans Lelièvre (1969).



Pompage situé à proximité d'un cours d'eau et limites étanches formant un angle $\theta=\pi/4$ (Lelièvre, 1969) ; impact sur le cours d'eau, abaque.



Pompage situé à proximité d'un cours d'eau et limites étanches formant un angle $\theta = \pi/6$ (Lelièvre, 1969) ; impact sur le cours d'eau, abaque.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction Eau, Environnement et Ecotechnologies
Unité Nouvelles Ressources en eau et Economie
1039, rue de Pinville
34000 - Montpellier – France
Tél. : 04 67 15 79 8