Sûreté des captages d'eau souterraine à proximité des rivières

Abaques pour déterminer l'évolution du débit de réalimentation

*Security of groundwater catchments near rivers
Charts to determine the variation in the replenishment flow*

J.P. Bouchard

Laboratoire national d'hydraulique
EDF, 6 quai Watier, 78400 Chatou, France

La sûreté des captages d'eau souterraine en nappe alluviale vis-à-vis d'une pollution du cours d'eau implique que l'on puisse prévoir l'évolution transitoire des débits et volumes d'eau de rivière appelée vers le forage après l'arrêt du pompage. A l'aide d'un programme de calcul, ces grandeurs ont été déterminées dans différents cas et représentées par des abaques. Les paramètres pris en compte sont les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe, le débit et la géométrie du pompage, l'alimentation latérale de la nappe et le colmatage éventuel du lit du cours d'eau.

The security of catchments of ground water in an alluvial water table as regards the pollution of the river requires being able to predict the transient changes in the flowrates and volumes of river water drawn to the borehole when pumping is stopped. These values were determined by a computer program for different cases and are shown on charts. The parameters taken into account are the hydrodynamic characteristics of the water table, the flowrate and geometry of pumping, the lateral replenishment of the water table and possible obstruction of the riverbed.

Introduction : La sûreté des captages d'eau souterraine en nappe alluviale

L'alimentation en eau potable des collectivités fait largement appel aux prélèvements d'eau souterraine dans les nappes alluviales par forage à proximité des cours d'eau. Cette localisation résulte d'une part de la concentration des populations et donc des besoins dans les vallées, et d'autre part du fait que le pompage à proximité de la rivière entraîne une réalimentation de la nappe par le cours d'eau qui permet d'obtenir des débits bien supérieurs à ceux qu'autorisent les seuls apports latéraux de la nappe.

Au cours de sa traversée du milieu poreux, l'eau de rivière infiltrée dans la nappe subit une épuration naturelle

qui permet de diminuer notablement le traitement nécessaire avant sa distribution, et fait ainsi préférer ce mode de prélèvement à la prise d'eau directe en rivière [9].

Le forage en nappe alluviale apparaît ainsi protégé contre les pollutions chroniques faibles du cours d'eau. Néanmoins, le problème de la sûreté de l'approvisionnement en eau par ce moyen demeure en cas de pollution massive du cours d'eau, non épurable par le milieu poreux.

Alors qu'un prélèvement en berge peut être arrêté le temps du passage du nuage de polluant au droit de la prise, l'arrêt d'un pompage en nappe dès l'annonce de l'arrivée

de la pollution pourra être insuffisant pour éviter la contamination de la nappe car la dépression de la surface piézométrique créée par le pompage ne va se combler qu'après un temps plus ou moins long, dépendant des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère, pendant lequel l'eau de la rivière va continuer à s'infiltrer dans la nappe.

La contamination de l'aquifère est un facteur très aggravant du problème, car bien que la pollution accidentelle d'un fleuve soit en général de courte durée (temps de passage à envisager : de quelques heures à quelques jours) une fois le polluant introduit dans la nappe, la faiblesse des vitesses de filtration, l'importance de la dispersion et les phénomènes de sorption-désorption vont concourir à rendre l'épuration du gîte aquifère très lente et maintiendront le forage inutilisable pendant une durée difficilement prévisible.

La sûreté de l'alimentation en eau potable à partir de prélèvements en nappe alluviale apparaît donc fonction de deux termes : d'une part, les risques effectifs de pollution du cours d'eau en amont du fait des établissements industriels qui le bordent, et d'autre part, la rapidité de réaction du système aquifère.

De ce point de vue un captage dans un aquifère à court temps de réponse, permettant en cas de pollution un arrêt momentané des prélèvements sans contamination de la nappe, apparaîtra comme beaucoup plus sûr qu'un forage dans un aquifère à long temps de réponse qui sera

inévitablement contaminé en cas de pollution de la rivière malgré l'arrêt de tout pompage dès l'annonce de l'accident.

Une fois réalisé l'inventaire des points de pollution potentiels en amont, le problème à résoudre se pose en ces termes : compte tenu du temps de propagation sur le cours d'eau, l'arrêt du pompage est-il susceptible d'éviter une pollution durable de l'aquifère; ou encore : jusqu'à quand peut-on continuer les prélèvements de façon à minimiser la période d'arrêt sans risquer la contamination de la nappe.

La réponse à ces types de questions devrait permettre de dégager les points de prélèvement les plus vulnérables et ainsi d'y concentrer les moyens de prévention. De plus, la connaissance préalable du temps disponible pour réagir lors de l'annonce d'une pollution peut être un élément conditionnant le choix des dispositions de protection.

La présente note a pour objet de présenter un outil permettant de répondre à ces questions. Il se compose d'abaques donnant l'évolution des débits et des volumes d'eau de rivière infiltrée dans la nappe après l'arrêt du pompage en fonction des divers paramètres caractérisant l'aquifère. Les paramètres intervenant ont été choisis de façon à englober au mieux la diversité des situations réelles.

Cet outil a été élaboré dans le cadre d'une convention avec la Sous-Direction des eaux continentales du Ministère de l'Environnement.

Schématisation du problème

Grandeurs recherchées

Supposons qu'un captage soit interrompu au moment de l'annonce d'une pollution du cours d'eau en amont soit au temps $t = 0$, on aimerait alors connaître le débit d'infiltration dans la nappe : $Q_i(t)$ subsistant au temps ultérieur t , lors de l'arrivée du nuage de polluant au droit du forage.

D'une façon plus générale on souhaiterait connaître pour tout captage le temps t_0 nécessaire pour que le débit d'infiltration d'eau de rivière s'annule, qui est encore le temps d'alerte minimal avant l'arrivée du nuage de polluant pour que l'arrêt du pompage évite une contamination durable de l'aquifère.

Enfin si cette contamination devait avoir lieu, il serait intéressant d'estimer le volume d'eau polluée ayant pénétré dans l'aquifère, ce qui revient à établir l'évolution $V(t)$ du volume d'eau infiltré intégré depuis l'instant $t = 0$.

Ce sont ces trois grandeurs $Q_i(t)$, t_0 et $V(t)$, dont l'évolution a été représentée par des abaques; les paramètres intervenant sont les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe, la géométrie et le débit de pompage, l'alimentation latérale de la nappe par les coteaux et le colmatage du lit du cours d'eau.

Établissement des abaques

Nous exposons ici les traits généraux de la méthode qui a permis d'établir les abaques, et, dans le paragraphe

suivant, les hypothèses que l'utilisation de cette méthode suppose vérifiées*.

Le problème de la détermination de l'influence d'un pompage en nappe sur la rivière qui la borde a déjà fait l'objet, par le passé, de nombreuses études ayant amené l'élaboration d'abaques; une liste bibliographique sur ce sujet est fournie à la fin de cette note.

L'objectif de ces études était cependant différent puisqu'il s'agissait en général de déterminer le préjudice causé à la rivière par le pompage (**). Le débit calculé ici s'en distingue donc, sauf dans le cas particulier où l'alimentation latérale de la nappe est nulle.

En outre, aucun des calculs présentés ne prenait en compte simultanément la totalité des paramètres retenus ici.

Les abaques ont été élaborés à partir d'un calcul de M.S. HANTUSH [6] qui a déterminé la solution analytique exacte du champ de potentiel pour un pompage à proximité d'une rivière colmatée en l'absence d'alimentation

(*) Le détail du calcul fait l'objet d'une note qui n'est pas publiée, et que *La Houille Blanche* communiquera sur leur demande aux personnes intéressées.

(**) Le préjudice se définit comme la somme du débit infiltré et du déficit d'alimentation (ou écart entre le débit parvenant au cours d'eau et celui qui y serait parvenu en l'absence de pompage) [1 à 4].

latérale par les coteaux, ainsi que les expressions des débits et volumes d'eau infiltrée.

La prise en compte de l'alimentation latérale de la nappe est essentielle pour le problème posé; son introduction dans l'expression du champ piézométrique donnée par HANTUSH est sans difficultés mais elle rend alors impossible la détermination d'une expression analytique du débit infiltré. Les abaques ont donc dû être dressés point par point par voie numérique.

Hypothèses de calcul

La méthode de calcul des abaques suppose que soient vérifiées les hypothèses suivantes :

- le domaine s'étend à l'infini dans la direction opposée à la rivière : pratiquement il suffit que le rayon d'action du puits n'atteigne pas les limites de la nappe;
- préalablement à l'arrêt du pompage, le système a atteint un état permanent;
- la rivière et le forage recoupent totalement l'aquifère;
- les conditions d'application de l'approximation de DUPUIS sont respectées, à savoir : l'écoulement est horizontal et il existe une transmissivité homogène sur tout le domaine.

Ces dernières conditions ne sont strictement vérifiées que pour une nappe captive, néanmoins la méthode s'applique aussi pour les nappes libres dans tous les cas où les rabattements sont modérés (de l'ordre de 50 % de la hauteur mouillée au niveau du puits).

Utilisation des abaques

Définition des variables utilisées

Le tableau et la figure ci-après regroupent l'ensemble des symboles apparaissant dans les abaques.

Données	Q_p	Débit de pompage initial au puits	m^3/s
	D	Distance du puits à la berge	m
	T	Transmissivité de la nappe	m^2/s
	S	Coefficient d'emmaganement	—
	Q_x	Alimentation naturelle de la nappe par unité de longueur Q_x : composante suivant la perpendiculaire à la rivière, Q_y : composante parallèle	m^3/s
	A	Coefficient de colmatage exprimé en épaisseur de terrain environnant, si ε et K_c sont l'épaisseur et la perméabilité de la frange colmatée, et K la perméabilité de l'aquifère, A est défini par $A = K \cdot \varepsilon / K_c$	m
	t	Temps compté depuis l'arrêt du pompage	s
Grandeurs recherchées	Q_r	Débit d'infiltration d'eau de rivière dans la nappe	m^3/s
	t_0	Temps d'annulation du débit d'infiltration tel que $Q_r(t_0) = 0$	s
	V	Volume d'eau infiltrée intégré depuis l'instant $t = 0$	m^3/s

L'introduction de variables adimensionnelles a permis de réduire le nombre d'abaques à établir et facilite leur utilisation pratique. On construira donc les nombres adimensionnels suivants :

$\frac{Q_x \cdot D}{Q_p}$ paramètre exprimant l'alimentation latérale

$\frac{A}{D}$ paramètre de colmatage

$t_r = \frac{4 t T}{D^2 S}$ est un temps réduit classiquement utilisé en hydraulique souterraine

$\frac{Q_x}{Q_p}$ exprime le débit de réalimentation de la nappe relativement au débit du puits

$V_r = \frac{4 T V}{Q_p D^2 S}$ exprime le volume d'eau infiltrée ramené à un volume représentatif du cône de rabattement initial.

Données nécessaires

L'utilisation des abaques nécessite de connaître les caractéristiques hydrodynamiques de la nappe T et S . Souvent, la réalisation du captage a donné lieu à des essais de pompage et ces paramètres ont été estimés. Par contre, le débit d'alimentation latéral de la nappe et le colmatage sont moins couramment déterminés.

Si l'on dispose d'une carte piézométrique, le premier paramètre pourra être obtenu en se rappelant que le rapport Q_v/T est égal à la pente de la surface piézométrique dans la direction du cours d'eau. En l'absence de cette donnée, l'alimentation latérale peut être estimée avec plus d'imprécision à partir du bassin versant alimentant la nappe et de la pluie efficace.

Le colmatage peut être connu par des essais de pompage où il se traduit par une distance fictive de la rivière, ou bien si l'on dispose de quelques mesures piézométriques à proximité de la berge, en mesurant la pente i de la nappe et son décrochement Δh avec la cote du plan d'eau.

On a alors

$$A = \frac{\Delta h}{i}$$

Pour de nombreuses rivières, le colmatage du lit peut être négligé.

Présentation des abaques

Quatre type d'abaques ont été tracées (voir ci-après p. 58 à 71).

- Les diagrammes 1 à 6 présentent la fonction :

$$\frac{Q_v}{Q_p} = f \left(\frac{Q_v D}{Q_p}, \frac{A}{D}, \frac{4 T t}{D^2 S} \right)$$

Pour obtenir le débit d'infiltration à un temps donné après l'arrêt du pompage, il suffit donc de construire les paramètres adimensionnels $Q_v D/Q_p$, A/D et le temps réduit correspondant, et ensuite d'interpoler entre les différentes courbes la valeur de Q_v/Q_p d'où l'on tire Q_v .

Ces courbes décroissent en fonction du paramètre d'alimentation latérale de la nappe $Q_v D/Q_p$; il existe donc une valeur de ce paramètre au-delà de laquelle le débit d'infiltration est nul dans l'état permanent du pompage ($t = 0$). Cette valeur limite peut-être déterminée précisément sur l'axe des abscisses du diagramme 14.

- Les courbes 7 à 12 présentent la fonction :

$$V_a = \frac{4 T V}{Q_p D^2 S} = g \left(\frac{Q_v D}{Q_p}, \frac{A}{D}, \frac{4 T t}{D^2 S} \right)$$

donnant le volume d'eau infiltré cumulé depuis l'instant initial jusqu'au temps t .

Si le nuage de polluant passe au droit du captage entre le temps t_1 et t_2 , le volume d'eau polluée infiltré sera simplement obtenu par la différence $V(t_2) - V(t_1)$ des valeurs déterminées à partir des abaques.

- Le diagramme 13 donne le temps nécessaire pour que l'infiltration de la rivière cesse. Par définition c'est le temps t_0 tel que :

$$\frac{Q_v}{Q_p} = f \left(\frac{Q_v D}{Q_p}, \frac{A}{D}, \frac{4 T t_0}{D^2 S} \right) = 0$$

On a donc tracé la fonction de deux variables :

$$\frac{4 t_0 T}{D^2 S} = h \left(\frac{Q_v D}{Q_p}, \frac{A}{D} \right)$$

- Le dernier diagramme (14) donne le rapport Q_v/Q_p à l'instant initial soit la fonction :

$$\frac{Q_v}{Q_p} = f \left(\frac{Q_v D}{Q_p}, \frac{A}{D}, 0 \right)$$

Ces courbes donnent donc directement la proportion d'eau de rivière infiltrée dans l'état permanent d'un pompage au débit Q_p . Ce rapport est, dans la plupart des cas, confondu ou peu différent de la proportion d'eau de la rivière pompée au forage, d'où son intérêt dans la connaissance de la qualité générale des eaux prélevées.

Notons que ces deux derniers diagrammes donnent en fait les points d'intersection des courbes Q_v/Q_p des diagrammes 1 à 6 avec les axes de coordonnées; elles sont donc très utiles pour placer les courbes intermédiaires aux valeurs tracées des paramètres.

A la vue de ces différentes courbes, on constate que le colmatage du lit du fleuve joue un rôle sensible dans les phénomènes étudiés. C'est ainsi qu'entre un colmatage nul et un colmatage modéré de l'ordre de $0,5 D$ (soit dans la pratique offrant un obstacle à l'écoulement, équivalent à quelques dizaines de mètres du terrain environnant), le temps nécessaire pour que l'infiltration cesse est augmenté d'environ 50 %.

Exemple d'application

Données caractérisant le système :

$$T = 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$S = 0,15$$

$$Q_p = 80 \text{ m}^3/\text{h} = 2,22 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D = 40 \text{ m}$$

$$Q_v = 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$A = 20 \text{ m}$$

Construisons les 2 paramètres adimensionnels :

$$\frac{Q_v D}{Q_p} = \frac{6 \cdot 10^{-6} \times 40}{2,22 \cdot 10^{-2}} = 1,08 \cdot 10^{-2}$$

$$\frac{A}{D} = \frac{20}{40} = 0,5$$

Débit d'eau de rivière s'infiltrant dans l'état permanent du pompage :

Sur l'abaque 14, pour les valeurs des paramètres :

$$Q_r/Q_p = 0,715 \quad \text{soit} \quad Q_r = 57 \text{ m}^3/\text{h}$$

Temps nécessaire après l'arrêt du pompage pour que l'infiltration cesse :

$$\frac{4 t_0 T}{D^2 S} = 42 \quad \text{soit} \quad t_0 = \frac{42 \times (40)^2 \times 0,15}{4 \times 0,01} = 2,52 \cdot 10^5$$

$$= 70 \text{ h}$$

Si une pollution du cours d'eau n'était pas annoncée suffisamment tôt pour éviter l'infiltration d'eau polluée, la gravité de la contamination pourrait être appréciée par les calculs ci-dessous.

Exemple : une pollution parvenant 20 h après l'arrêt du pompage et durant 12 h.

On calcule les temps réduits correspondant à $t_1 = 20 \text{ h}$ et $t_2 = 32 \text{ h}$ selon la formule :

$$t_r = \frac{4 t T}{D^2 S}$$

$$t_1 = 20 \text{ h} \rightarrow t_{r1} = 12$$

$$t_2 = 32 \text{ h} \rightarrow t_{r2} = 19,2$$

Le débit d'infiltration résiduel lors de l'arrivée du nuage d'eau pollué est obtenu en interpolant sur le diagramme 2 pour la valeur $1,08 \cdot 10^{-2}$ du paramètre $Q_r D/Q_p$ et pour $t_r = 12$:

$$Q_r/Q_p = 0,165 \quad Q_r = 13,2 \text{ m}^3/\text{h}$$

Le volume d'eau pollué infiltré est obtenu en déterminant sur le diagramme 8 les 2 valeurs de V_a correspondant aux deux temps réduits calculés :

$$t_{r1} = 12 \rightarrow V_{a1} = 4,25$$

$$t_{r2} = 19,2 \rightarrow V_{a2} = 5,1$$

d'où le volume infiltré :

$$\Delta V = (V_{a2} - V_{a1}) \cdot \frac{S Q_p D^2}{4 T} = 113 \text{ m}^3$$

Conclusion

L'outil développé ici permet de quantifier les conséquences d'un arrêt des pompes sur un captage d'eau potable en nappe alluviale lors d'une pollution du cours d'eau.

Plus que les valeurs numériques qu'il permet de déterminer (flux d'eau polluée pénétrant dans l'aquifère, temps nécessaire pour éviter cette infiltration, volume

infiltré) et qui pourront dans quelques cas être imprécises du fait de la difficulté d'estimer certaines données, il devrait apporter les premiers éléments, même qualitatifs, d'une réflexion sur la sûreté des prélèvements d'eau souterraine, en permettant d'apprécier les risques encourus et d'orienter la recherche des dispositions à prendre, adaptées aux cas pratiques rencontrés.

Bibliographie

Sur la notion de préjudice au cours d'eau et de réalimentation induite :

- [1] BURGEAP. — Influence des pompes en nappe alluviale sur le régime d'étiage de la Loire (1969).
- [2] A. HOUDAILLE, G. DE MARSILY — Débit soustrait à une rivière par un pompage dans une nappe alluviale (l'Eau, janvier 1969).
- [3] LEBARRE — Part du débit d'un puits provenant d'un cours d'eau voisin (BRGM = 75 SGN 159 AME, 1975).
- [4] R.F. LELIÈVRE, P. PEAUDECKER, P. PRUDHOMME — Influence des pompes en nappe alluviale sur le régime d'étiage des cours d'eau. (Bul. du BRGM, sect. III n° 3/4, 1976).

Sur l'hydrodynamique des puits à proximité d'une rivière :

- [5] M.S. HANTUSH — Analysis of Data from pumping wells near a river (Journal of Geophysical research. Vol. 64, n° 11, 1959).

- [6] M.S. HANTUSH — Wells near streams with semipervious bed (Journal of Geophysical research, Vol. 70, n° 12, 1965 et traduction de M. BONNET dans Bul. du BRGM sect. III, n° 3/4, 1976).

- [7] F.M. BOCHEVER, N.N. LAPSIN, E.M. KHOKHLATOV — Calculs hydrogéologiques des puits situés à proximité des rivières (Bul. BRGM sect. III, n° 3/4, 1976).

Sur le colmatage :

[6] et [7]

- [8] J.F. BERAUD, M. CLOUET D'ORVAL — Détermination de colmatage du lit d'une rivière en relation avec une nappe souterraine (Bul. du BRGM sect. III, n° 3/4, 1976).

Sur l'évolution qualitative de l'eau infiltrée :

- [9] J. BIZE, B. GRENET, H. MANEGLIER — Le pouvoir épurateur du complexe alluvial en bordure de rivière. (C.R. du congrès de l'AGHTM dans TSM — L'eau, juillet 1981).

1. — Évolution du débit infiltré

$$Qr/Qp = f \left(\frac{Qx D}{Qp}, \frac{A}{D}, \frac{4.1 T}{D^2 S} \right)$$

2. — Évolution du débit infiltré

3. — Évolution du débit infiltré

4. — Évolution du débit infiltré

$$\frac{Q_r}{Q_D} = f\left(\frac{Q_x D}{Q_D}, \frac{A}{D}, \frac{4IT}{D^2 S}\right)$$

6. — Évolution du débit infiltré

7. — Évolution du volume d'eau infiltré

8. — Évolution du volume d'eau infiltré

9. — Évolution du volume d'eau infiltré

10. — Évolution du volume d'eau infiltré

11. — Évolution du volume d'eau infiltré

12. — Évolution du volume d'eau infiltré

13. — Temps de comblement du cône de rabattement

14. — Débit d'infiltration dans l'état permanent du pompage