UE Géoressources – Licence 2

Eaux souterraines : de l'aquifère au captage

Corrigé – Piézométrie, Darcy, pompage, qualité et protection

Point de vigilance

Les calculs sont des modèles pédagogiques. Dans un aquifère réel, l'hétérogénéité, l'anisotropie, les échanges nappe–rivière, les pompages, la dispersion et les réactions chimiques modifient les écoulements et les temps de transfert. Les critères de qualité donnés dans l'exercice 5 sont fournis uniquement pour l'application numérique et ne remplacent pas une analyse réglementaire complète.

1. Nappe libre, nappe captive et artésianisme

Éléments de correction

a) À gauche, l'aquifère superficiel est en contact hydraulique avec l'atmosphère par sa zone non saturée : sa limite supérieure est la **surface libre**. Plus à droite, l'aquifère profond est recouvert par un niveau peu perméable : il fonctionne comme une **nappe captive**.

b) Dans A, le niveau d'eau du puits matérialise approximativement la surface libre. Dans B et C, il matérialise la **surface piézométrique** de la nappe captive, qui peut se situer bien au-dessus du toit de l'aquifère.

c) Au droit de C, la charge hydraulique de la nappe captive est supérieure à l'altitude du sol. L'eau peut donc remonter spontanément jusqu'à la surface : le puits est **artésien jaillissant**.

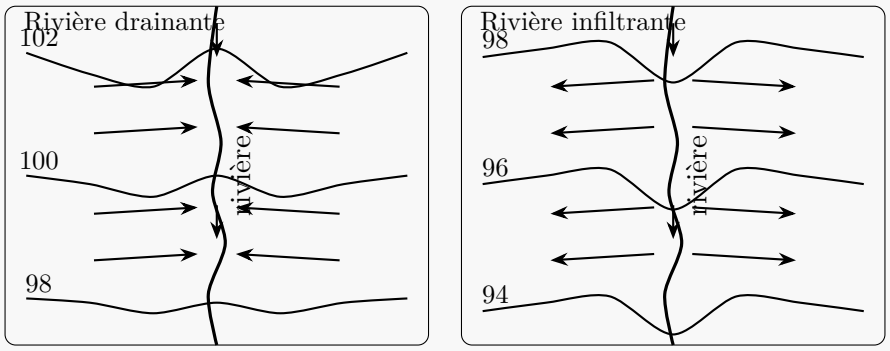
d) La recharge principale du niveau profond se fait là où l'aquifère affleure ou devient libre, en amont, avant son recouvrement par l'aquitard.

e) Une pollution peut entrer dans l'aquifère loin du forage, dans sa zone de recharge, puis circuler sous la couverture jusqu'au captage. Protéger uniquement quelques mètres autour du puits ne protège donc pas toute la ressource.

2. Cartographie piézométrique d'une vallée alluviale

Éléments de correction

Les isopièzes sont obtenues par interpolation entre les charges mesurées. Les lignes de courant sont orthogonales aux isopièzes et orientées vers les charges décroissantes.



Situation A : rivière drainante. À une même latitude, la charge de la nappe est plus élevée sur les deux versants que dans la rivière. Les lignes de courant convergent donc vers le cours d'eau : la nappe alimente la rivière. Les isopièzes dessinent un V dont la pointe est orientée vers l'amont.
Situation B : rivière infiltrante. La charge imposée par la rivière est supérieure à celle de la nappe voisine. Les lignes de courant divergent depuis le lit vers l'aquifère : la rivière réalimente la nappe. La courbure des isopièzes est inversée, avec un V orienté vers l'aval.
En période sèche, c'est le cas **drainant** qui permet à la nappe de soutenir le débit de base de la rivière. Le tracé proposé est schématique : plusieurs interpolations graphiques légèrement différentes sont acceptables si elles respectent les valeurs mesurées, l'orthogonalité isopièzes–lignes de courant et le sens des gradients.

3. Loi de Darcy, transmissivité et vitesse d'écoulement

Éléments de correction

Données : $b = 12\,\text{m}$, $W = 450\,\text{m}$, $L = 800\,\text{m}$, $h_1 = 112{,}4\,\text{m}$, $h_2 = 110{,}1\,\text{m}$, $K = 3 \times 10^{-4}\,\text{m/s}$, $n_e = 0{,}25$.

a) Gradient hydraulique

$$i = \frac{112.4 - 110.1}{800} = \boxed{2.88 \times 10^{-3}}.$$

b) Section d'écoulement

$$A = bW = 12 \times 450 = \boxed{5\,400\,\text{m}^2}.$$

c) Débit de Darcy

$$Q = KiA = (3 \times 10^{-4})(2.875 \times 10^{-3})(5400) = \boxed{4.66 \times 10^{-3}\ \text{m}^3\,\text{s}^{-1}}.$$

En une journée :

$$Q \simeq 4.66 \times 10^{-3} \times 86400 = \boxed{402\,\text{m}^3/\text{d}}.$$

d) Transmissivité

$$T = Kb = (3 \times 10^{-4}) \times 12 = \boxed{3.6 \times 10^{-3}\ \text{m}^2\,\text{s}^{-1}}.$$

$$T = 3.6 \times 10^{-3} \times 86400 \simeq \boxed{311\ \text{m}^2\,\text{j}^{-1}}.$$

e) Débit spécifique et vitesse moyenne de pore

$$q = Ki = (3 \times 10^{-4})(2.875 \times 10^{-3}) = 8.63 \times 10^{-7}\ \text{m}\,\text{s}^{-1}.$$

Soit :

$$q \simeq \boxed{0.0745\ \text{m}\,\text{j}^{-1}}.$$

La vitesse moyenne dans les pores est :

$$v = \frac{q}{n_e} = \frac{0.0745}{0.25} = \boxed{0.298\ \text{m}\,\text{j}^{-1}}.$$

f) Temps de parcours sur $500\,\text{m}$

$$t = \frac{500}{0.298} \simeq 1678\ \text{j} \simeq \boxed{4.6\ \text{ans}}.$$

g) Limites de l'estimation Le transfert réel peut être différent en raison de l'hétérogénéité et de l'anisotropie de K, des chemins préférentiels, de la dispersion, de la sorption, de la dégradation chimique ou biologique, de la variation temporelle du gradient et des pompages. La vitesse de l'eau n'est donc pas nécessairement la vitesse d'un contaminant.

4. Essai de pompage : transmissivité et coefficient d'emmagasinement

Éléments de correction

a) Conversions

$$Q = \frac{40}{3600} = \boxed{1.11 \times 10^{-2}\ \text{m}^3\,\text{s}^{-1}}, \qquad t_0 = 0.50 \times 60 = \boxed{30\,\text{s}}.$$

b) Transmissivité

$$T = \frac{2.3Q}{4\pi\Delta s} = \frac{2.3 \times 1.11 \times 10^{-2}}{4\pi \times 1.10} \simeq \boxed{1.85 \times 10^{-3}\ \text{m}^2\,\text{s}^{-1}}.$$

En unités journalières :

$$T \simeq 1.85 \times 10^{-3} \times 86400 \simeq \boxed{160\ \text{m}^2\,\text{j}^{-1}}.$$

c) Coefficient d'emmagasinement

$$S = \frac{2.25 T t_0}{r^2} = \frac{2.25 \times 1.85 \times 10^{-3} \times 30}{50^2} \simeq \boxed{5.0 \times 10^{-5}}.$$

S est sans dimension.

d) Emmagasinement spécifique

$$S_s = \frac{S}{b} = \frac{5.0 \times 10^{-5}}{20} = \boxed{2.5 \times 10^{-6}\ \mathrm{m}^{-1}}.$$

e) Interprétation Une valeur de S de l'ordre de 10^{-5} est typique d'un comportement **captif** : l'eau libérée provient essentiellement de la compressibilité de l'eau et du squelette de l'aquifère. Dans une nappe libre, le stockage est généralement beaucoup plus grand car il implique aussi le drainage gravitaire des pores.

f) Volume investigué Le pompage crée une perturbation de charge qui se propage radialement dans l'aquifère. L'essai intègre donc les propriétés hydrauliques d'un volume de terrain beaucoup plus vaste qu'un échantillon ponctuel, ce qui le rend particulièrement utile pour caractériser l'aquifère à l'échelle du captage.

5. Eau douce, eau dure et potabilité

Éléments de correction

On utilise :

$$TH\,(^\circ\mathrm{f}) = 0.250[Ca] + 0.412[Mg].$$

Captage A

$$TH_A = 0.250 \times 92 + 0.412 \times 18 = 23.0 + 7.42 \simeq \boxed{30.4\,^\circ\mathrm{f}}.$$

L'eau A est donc **dure** selon la classification proposée.

Captage B

$$TH_B = 0.250 \times 28 + 0.412 \times 6 = 7.0 + 2.47 \simeq \boxed{9.5\,^\circ\mathrm{f}}.$$

L'eau B est **douce**.

En revanche, le captage B présente $[NO_3^-] = 58\,\mathrm{mg/L}$, supérieur à la valeur de $50\,\mathrm{mg/L}$ fournie dans l'énoncé. Dans ce jeu de critères, c'est donc **B qui pose un problème de potabilité**, malgré sa faible dureté.

La dureté traduit principalement la présence de Ca^{2+} et Mg^{2+} dissous. Elle n'est pas, en elle-même, un indicateur de pollution. Une eau dure peut être naturellement minéralisée et de bonne qualité sanitaire ; inversement, une eau douce peut contenir des nitrates, pesticides, microorganismes ou autres contaminants.

Une eau calco-magnésienne riche en bicarbonates est classiquement favorisée par la circulation dans des terrains carbonatés, notamment calcaires et dolomitiques. Une teneur élevée en nitrates peut être liée aux apports agricoles azotés, aux effluents d'élevage ou à certains rejets d'assainissement.

6. Protection d'un point de captage

Éléments de correction

Données locales : $K = 8 \times 10^{-4}\,\mathrm{m/s}$, $i = 0.004$, $n_e = 0.25$.

a) Vitesse moyenne de pore

$$q = Ki = (8 \times 10^{-4})(0.004) = 3.2 \times 10^{-6}\ \mathrm{m\,s^{-1}}.$$

$$v = \frac{q}{n_e} = 1.28 \times 10^{-5}\ \mathrm{m\,s^{-1}}.$$

En une journée :

$$v = 1.28 \times 10^{-5} \times 86400 \simeq \boxed{1.11\ \mathrm{m\,j^{-1}}}.$$

b) Temps de transfert depuis la parcelle agricole

$$t = \frac{300}{1.11} \simeq \boxed{271 \text{ j}},$$

soit environ neuf mois dans ce modèle purement advectif.

c) Activités préoccupantes La parcelle agricole constitue un risque chronique potentiel pour les nitrates et produits phytosanitaires. La cuve d'hydrocarbures, plus proche et située en amont hydraulique, constitue un risque accidentel important. La route proche peut également être une source de pollution accidentelle ou diffuse.

L'habitation située en aval hydraulique est, dans les conditions naturelles décrites, moins directement connectée au captage. Mais cette conclusion doit rester prudente : un pompage peut déformer la piézométrie et modifier la zone d'appel du puits.

Le **sens d'écoulement** est donc au moins aussi important que la distance géométrique.

d) Forme du périmètre rapproché Le captage attire préférentiellement l'eau provenant de l'amont hydraulique. Sa zone d'appel est donc généralement allongée dans le sens des lignes de courant et n'a aucune raison d'être circulaire dans un aquifère réel.

e) Trois niveaux conceptuels de protection

— **Protection immédiate :** sécuriser physiquement l'ouvrage et empêcher toute introduction directe ; clôture, dalle étanche, absence de stockage de produits polluants.

— **Protection rapprochée :** réduire les risques pouvant atteindre rapidement le captage ; restrictions sur épandages, stockages d'hydrocarbures, forages, terrassements ou certaines activités industrielles.

— **Protection éloignée :** préserver à plus long terme la zone d'alimentation ; gestion de l'occupation des sols, surveillance des activités et réduction des pressions diffuses.

f) Rôle de la piézométrie Les isopièzes fournissent le gradient et les lignes de courant indiquent l'origine hydraulique de l'eau captée. Elles permettent donc de localiser la zone d'alimentation et de placer les protections là où une pollution peut réellement migrer vers le puits.

7. QCM de synthèse

Éléments de correction

a) **Faux.** Dans un milieu isotrope, les lignes de courant sont perpendiculaires aux isopièzes.

b) **Vrai.** Une nappe libre libère notamment de l'eau par drainage gravitaire, alors qu'une nappe captive stocke surtout par compressibilité.

c) **Vrai.** Pour un aquifère homogène : $T = Kb$.

d) **Vrai.** Une rivière drainante reçoit un flux d'eau souterraine.

e) **Faux.** La dureté ne renseigne ni sur les nitrates, ni sur les microorganismes, ni sur l'ensemble des contaminants possibles.

f) **Vrai.** Une source de pollution éloignée mais située dans la zone d'alimentation peut constituer une menace réelle pour le captage.

8. Exemple de conclusion de synthèse

Éléments de correction

Avant d'autoriser un captage, il faut d'abord définir la géométrie de l'aquifère, la position de la nappe, les isopièzes, les lignes de courant et les relations avec la rivière afin d'identifier la zone d'alimentation. Des essais hydrauliques doivent fournir K, T, S, les débits exploitables et l'ampleur du rabattement. Il faut ensuite établir le bilan recharge–prélèvements pour éviter une surexploitation. La qualité doit être caractérisée par des analyses chimiques et microbiologiques, en distinguant minéralisation naturelle et contamination. Enfin, l'inventaire des sources potentielles de pollution doit être croisé avec les directions et temps de transfert des eaux souterraines afin de définir des périmètres de protection adaptés. Un bon captage est donc à la fois productif, durable, de qualité acceptable et protégeable dans son contexte hydrogéologique.