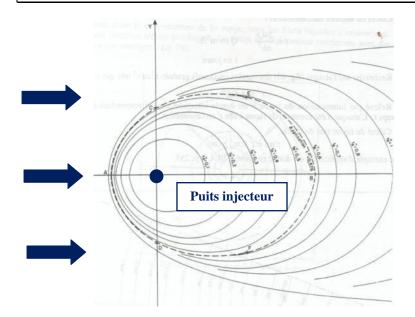
Etudes et Mesures Philippe Berlandier

Environnement - Mesures - Etudes

Siège Social: 7 rue d'AUVOURS - 44 000 NANTES (bureau): 02 51 71 03 27 / (portable) 06 79 78 60 12 Courriel: philippe.berlandier@numericable.fr www.emp-berlandier.fr

GEOTHERMIE SUR AQUIFERE ANALYSE DES IMPACTS DU FONCTIONNEMENT DES PUITS SUR L'AQUIFERE SOUTERRAIN



CENTRE TECHNIQUE DU LIVRE ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

14 avenue GUTEMBERG - Bussy Saint Georges (77 600 MARNE LA VALLÉE)

Préparé pour



2013

SOMMAIRE

I. LA GEOTHERMIE SUR AQUIFERE SOUTERRAIN	3
I.1 Principe de la geothermie sur aquifere souterrain	3
I.2 PRINCIPE DE L'UTILISATION DE L'EAU SOUTERRAINE	4
I.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE LA POMPE A CHALEUR	4
I.4 DEBIT GEOTHERMAL ET PUISSANCE THERMIQUE DISPONIBLE	6
I.5 AVANTAGES DE LA GEOTHERMIE SUR AQUIFERE	9
II. OBJET DE L'ETUDE	10
III. HYDRODYNAMIQUE DES ECOULEMENTS EN AQUIFERE SOUTERRAIN	11
III.1 ECOULEMENTS DANS L'AQUIFERE EN MILIEU POREUX	11
III.2 CHARGES ET VITESSES D'ECOULEMENT NATUREL DE L'AQUIFERE	
III.3 ECOULEMENT RADIAL CIRCULAIRE AUTOUR D'UN PUITS	13
IV. EVOLUTION DU NUAGE HYDRAULIQUE AUTOUR D'UN PUITS	16
IV.1 ECOULEMENT D'UN PUITS DANS UN AQUIFERE EN ECOULEMENT PERMANENT	16
IV.2 EVOLUTION DU FLUX HYDRAULIQUE DU PUITS A CONTRECOURANT	
IV.3 EVOLUTION DU FLUX HYDRAULIQUE DU PUITS DANS LE COURANT	22
IV.4 EVOLUTION DE LA FORME DU NUAGE DU FLUX HYDRAULIQUE DU PUITS	25
V. EVOLUTION DU NUAGE THERMIQUE A L'INJECTEUR	31
V.1 ENERGIE THERMIQUE INJECTEE AU PUITS	31
V.2 RELATION ENTRE VOLUME THERMIQUE ET VOLUME POREUX	
V 3 CALCUL DE L'IMPACT THERMIQUE DE L'EAU DEINIECTEE	33

I. LA GEOTHERMIE SUR AQUIFERE SOUTERRAIN

I.1 Principe de la géothermie sur aquifère souterrain

La réalisation d'un projet de chauffage/rafraichissement de bâtiments publics ou privés par géothermie (eau/eau) sur aquifère souterrain nécessite de disposer sous le site d'un aquifère souterrain puissant, actif et productible par pompage via des forages.

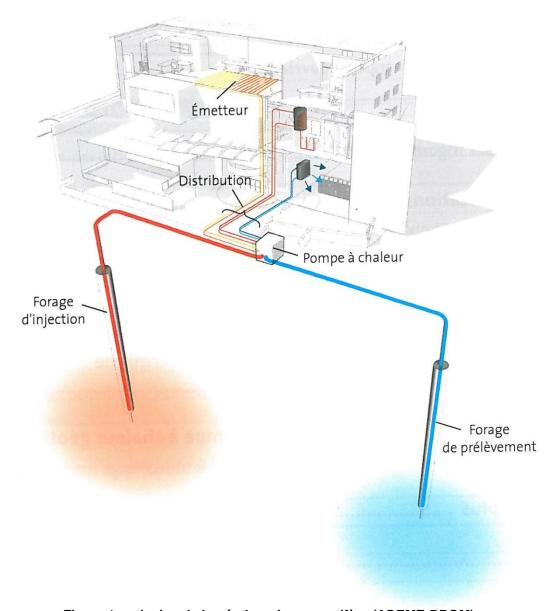


Figure 1 : principe de la géothermie sur aquifère (ADEME-BRGM)

Après passage dans l'échangeur thermique primaire de la pompe à chaleur, l'eau de l'aquifère, refroidie ou réchauffée de quelques degrés (selon la saison) doit être réinjectée dans le même aquifère via un second forage de réinjection.

I.2 Principe de l'utilisation de l'eau souterraine

L'eau souterraine pompée à environ 11°C dans l'aquifère (1 ou plusieurs forages de production) circule en surface dans un échangeur liquide / liquide, dans lequel elle est refroidie de 5°C environ (T = 6°C en sortie d'échangeur). Les calories prélevées sont transférées dans un circuit liquide secondaire (appelé circuit géothermique) alimentant les pompes à chaleur servant pour le chauffage (hiver) et la climatisation (été) des locaux.

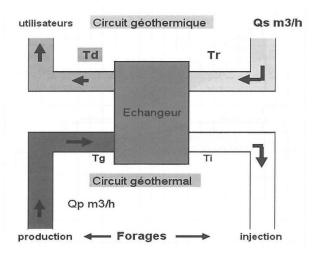


Figure 2 : échange thermique dans l'eau géothermale pompée

Après passage dans l'échangeur, l'eau géothermale est réinjectée dans le même aquifère par un ou plusieurs forages de réinjection.

1.3 Principe de fonctionnement de la pompe à chaleur

Descriptif de la pompe à chaleur :

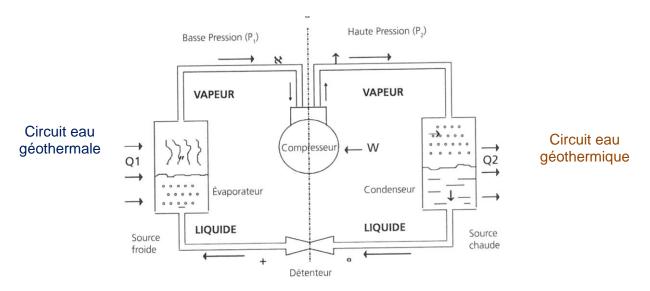


Figure 3 : principe de fonctionnement de la pompe à chaleur

Fonctionnement en mode chauffage (hiver) :

La pompe à chaleur (PAC) fonctionne comme un « frigo » d'appartement. De l'énergie thermique est prélevée à la source froide (eau géothermale). Par la « magie » de la thermodynamique, elle est multipliée par 3 ou 4 à l'aide du compresseur électrique et elle est renvoyée dans un échangeur amont pour réchauffer (de 35°C à 45°C) l'eau de la source chaude (fluide de chauffage caloporteur). Cette eau circule ensuite dans les bâtiments.

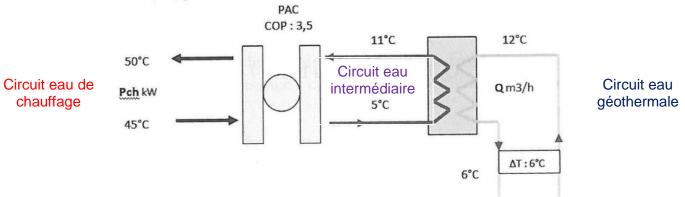


Figure 4: fonctionnement PAC en mode chauffage

Le coefficient de performance de la pompe à chaleur (COP) mesure l'effet multiplicateur entre l'énergie électrique dépensée au compresseur (W) et l'énergie thermique fournie au fluide caloporteur de chauffage des locaux :

En conditions normales d'hiver, les COP moyens des pompes à chaleur liquide / liquide modernes avoisinent maintenant les valeurs de 5. L'énergie de chauffe disponible en sortie de la pompe à chaleur est donc environ 5 fois plus importante que l'énergie électrique dépensée au compresseur de la pompe à chaleur.

Cela veut dire que les 4/5 environ de l'énergie de chauffe en exploitation d'hiver est fournie « gratuitement » par la nature sous forme de soutirage de calories à l'eau de l'aquifère.

Fonctionnement en mode rafraichissement (été) :

Ce mode de fonctionnement d'été est facultatif. La pompe à chaleur fonctionne en mode réversible. De l'énergie thermique est soutirée à la source froide (appartements). Elle est restituée à l'aquifère après réchauffement (de 11°C à 16°C environ).

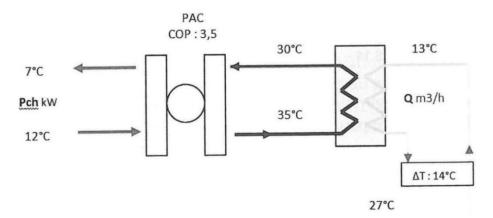


Figure 5 : fonctionnement PAC en mode rafraichissement d'été

1.4 Débit géothermal et puissance thermique disponible

En mode de chauffage d'hiver :

Pour fournir la puissance de chauffe (Pchaud) avec une pompe à chaleur (COP), pour un refroidissement de l'eau géothermale de 5°C, le débit de pompage d'eau géothermale est :

$$Q_{pompé} = P_{chaud} * (1 - 1/COP) / 5,8$$

 $P_{chaud} = 200 \text{ kW}$

COP = 4.5

 $Q_{pompé} = 27 \text{ m}^3/\text{heure}$

En mode de rafraichissement d'été :

Pour fournir la puissance de rafraichissement (Pfroid) avec une pompe à chaleur (CFR), pour un réchauffement de l'eau géothermale de 5°C, le débit d'eau géothermale est :

$$Qp_{ompé} = P_{froid}^* (1 + 1/EEF) / 5,8$$

 $P_{froid} = 200 \text{ kW}$

EEF = 3.2

 $Q_{pompé} = 45 \text{ m}^3/\text{heure}$

Réversibilité:

Les pompes à chaleur modernes sont réversibles (thermofrigopompe) et peuvent passer en un instant d'une mode chauffage à un mode climatisation.

Les schémas de fonctionnement sont présentés en pages suivantes.

SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE INSTALLATION DE POMPE A CHALEUR fonctionnant en mode THERMOFRIGOPOMPE (Chaud seulement)

Mode Hiver : régulé sur température d'eau chaude à 50°C et régulation sur V2

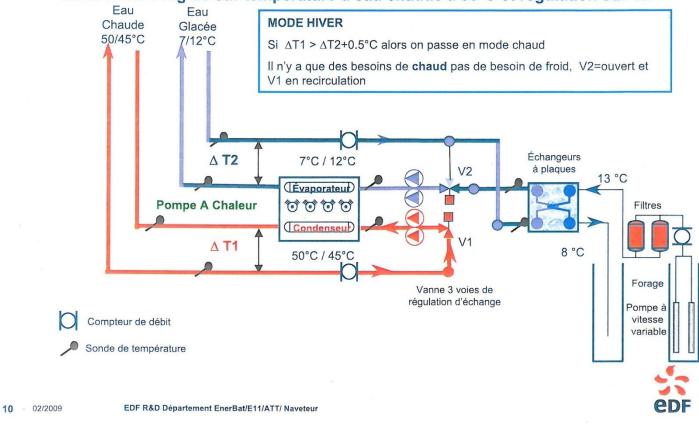


Figure 6 : schéma de fonctionnement en mode chauffage

fonctionnant en mode THERMOFRIGOPOMPE (froid seulement) Mode Été : régulé sur température d'eau glacée à 7°C et régulation sur V1 Eau Eau On reste en MODE ÉTÉ Chaude Glacée 25/31°C 7/11°C On a toujours $\Delta T1 > \Delta T2$ Il n'y a que des besoins de froid Pompes Échangeurs 7C /12°C $\Delta T2$ primaires à plaques 13 °C Évaporateur 80000 Pompe A Chaleur Filtres Condenseur V1 Δ T1 25°C / 30°C 18 °C Forage Vanne 3 voies de régulation d'échange Pompe à Compteur de débit vitesse variable Sonde de température

SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE INSTALLATION DE POMPE A CHALEUR

Figure 7 : schéma de fonctionnement en mode climatisation

EDF R&D Département EnerBat/E11/ATT/ Naveteur

02/2009

I.5 Avantages de la géothermie sur aquifère

Les avantages de cette technologie, lorsqu'elle est accessible, sont très nombreux :

- Puissance de chauffe / rafraichissement importante et compacité des matériels,
- Disponibilité immédiate,
- Maintenance faible,
- Cout d'exploitation faible,
- Indépendance par rapport à la fourniture et au prix du gaz,

II. OBJET DE L'ETUDE

Cette étude technique, développée spécialement pour le projet de doublet de forages géothermiques de BUSSY SAINT GEORGES permet de caractériser, dans le cadre de la demande du permis de recherche géothermique basse température, les interférences des panaches hydrauliques et thermiques des 2 puits (1 producteur - 1 injecteur), et les impacts éventuellement induits par l'exploitation des 2 forages sur les ouvrages en exploitation voisins du projet géothermique dans l'aquifère du Lutétien-Yprésien.

Les calculs de panaches hydrauliques et thermiques induits par le fonctionnement des forages géothermiques en exploitation dans l'aquifère sont effectués dans des conditions de fonctionnement relativement simples :

- puits de production fonctionnant à débit maximum (65 m³/heure),
- puits de réinjection situé à 315 m de distance selon positions prévues dans l'étude,
- aquifère infini, en charge, épaisseur et vitesse d'écoulement naturel constantes,





Sens écoulement naturel régional des eaux souterraines

Carte 1 : position du doublet de forages géothermiques

Nul modèle numérique onéreux et complexe n'a été utilisé. Nous avons montré qu'il existe des solutions analytiques simples aux problèmes de panaches des puits. Ces calculs et leurs applications au cas de BUSSY SAINT GEORGES sont exposés dans la suite de l'annexe.

III. HYDRODYNAMIQUE DES ECOULEMENTS EN AQUIFERE SOUTERRAIN

III.1 Ecoulements dans l'aquifère en milieu poreux

En coordonnées cylindriques, l'équation de l'hydrodynamique souterraine de l'aquifère en milieu poreux s'exprime par

$$\frac{\partial^2 h}{\partial n^2} + \frac{1}{n} \cdot \frac{\partial h}{\partial n} = \frac{5}{T} \cdot \frac{\partial h}{\partial k}$$

h(r,t): charge hydraulique dans l'aquifère au point M,

T: transmissivité de l'aquifère (m2/sec),

S: coefficient d'emmagasinement de l'aquifère ()

Cette équation est linéaire en h et en t. Cela permet donc d'exposer le théorème de superposition des écoulements hydrauliques dans l'aquifère en milieu poreux :

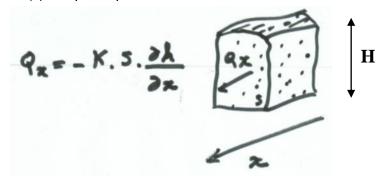
Si l'écoulement (forces motrices) n°1 génère la charge h1(M,t) dans l'aquifère, Si l'écoulement (forces motrices) n°2 génère la charge h2(M,t) dans l'aquifère,

Alors, les actions cumulée et simultanées des forces motrices 1 et 2 génèrent dans l'aquifère la charge hydraulique superposée :

$$h(n,k) = h_1(n,k) + h_2(n,k)$$

III.2 Charges et vitesses d'écoulement naturel de l'aquifère

Dans l'aquifère captif (en charge) en écoulement, la relation entre la charge hydraulique et le débit dans une direction (x) s'exprime par :



h(x,t): charge hydraulique dans l'aquifère au point M, K: perméabilité de l'aquifère (m/sec) – rapport T / H

S: surface interceptée par l'écoulement

La perméabilité horizontale (x) du réservoir aquifère s'exprime en m/s. c'est le rapport entre la transmissivité et la hauteur de la veine aquifère. Les ordres de grandeur sont les suivants :

k en m/s	10	1	10-1	10-2	10-3	10-4	10-5	10-6	10-7	10-8	10-9	10-10	10-11
Granulométrie homogène		gravi	er pur		sable	e pur	sat	ole très	fin	lim	ons	arg	gile
Granulométrie variée	-	vier &moy	grav	gravier et sable sab			sable	sable et limons argileux					
degrés de perméabilité	TF	TRES BONNE - BONNE MAUVAISE					NU	LLE					
type de formation		PE	PERMEABLE SEMI-PERMEABLE							ER-			

Tableau 1 : échelles de perméabilité des milieux poreux aquifères

Du fait de la stratification des couches géologiques, la perméabilité horizontale d'un réservoir aquifère est 5 à 10 plus forte que la perméabilité verticale.

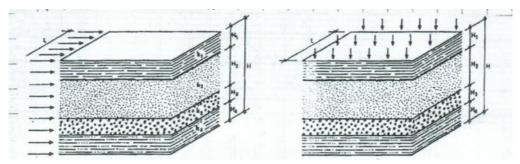
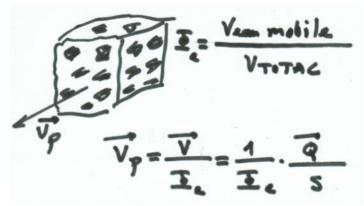


Figure 8 : écoulement en milieu stratifié

La porosité efficace (ϕ_e) du milieu poreux est le rapport entre le volume d'eau mobile disponible entre les grains et le volume total du milieu.

V = Q/S (m/s) est la vitesse de Darcy de l'écoulement souterrain dans l'aquifère.

 $V_p = V / \varphi_e$ (m/s) est la vitesse de pore de l'écoulement souterrain en milieu poreux.



Application numérique au réservoir de la craie (Lutétien) :

 $T = 5. 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$

H = 40 m

 $K = 1.25 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

i=dh / dX=0.2% (variation longitudinale de la pression hydraulique dans l'aquifère)

 $\phi_e = 5\%$ (craie)

Vitesse de Darcy de l'écoulement naturel de l'aquifère : V = 0.02 m/jour Vitesse de pores de l'écoulement naturel de l'aquifère : $V_p = 0.4$ m/jour

III.3 Ecoulement radial circulaire autour d'un puits

On considère un puits en fonctionnement (débit Q) dans une veine aquifère au repos de hauteur H :

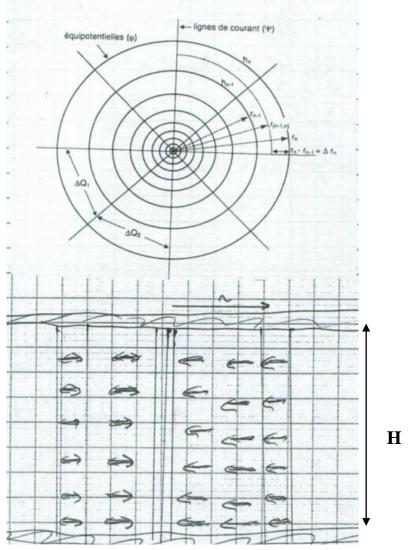


Figure 9 : puits en fonctionnement dans un aquifère en charge

Le volume (Ω) d'eau mobile dans le cylindre de rayon r et de hauteur H autour du puits est :

$$Ω = φe . π . r2 . H$$

$$d\Omega$$
 = φ_e . 2 . π . r . H . dr = Q . dt

Pour un puits fonctionnant dans un aquifère au repos, la vitesse de pore radiale dans un cylindre autour du puits est donnée par :

Application numérique (exemple) :

H = 40 m

Q = 65 m3/heure

 $\phi_e = 5\%$ (craie)

r (m)	V _p (m/heure)
0,5	2,76
1,0	1,38
1,5	0,92
3,0	0,46
5,0	0,28
10,0	0,14
25,0	0,06
50,0	0,03
75,0	0,02
100,0	0,01

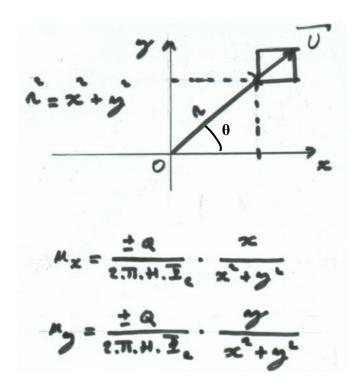
Tableau 2 : vitesse radiale d'un écoulement au puits

L'expression des équations de l'écoulement peut s'exprime également en coordonnées cartésiennes (x,y,z) :

- x représente la direction longitudinale de l'écoulement,
- y représente la direction transverse de l'écoulement,
- z représente la direction dans l'épaisseur de l'aquifère.

En utilisant les fonctions trigonométriques :

On obtient finalement l'expression des composantes de vitesses au puits : (le signe (+ -) différencie puits injecteur ou puits producteur)



IV. EVOLUTION DU NUAGE HYDRAULIQUE AUTOUR D'UN PUITS

IV.1 Ecoulement d'un puits dans un aquifère en écoulement permanent

On considère maintenant la superposition de l'écoulement d'un puits dans un aquifère en mouvement permanent (vitesse aquifère constante de la droite vers la gauche) :

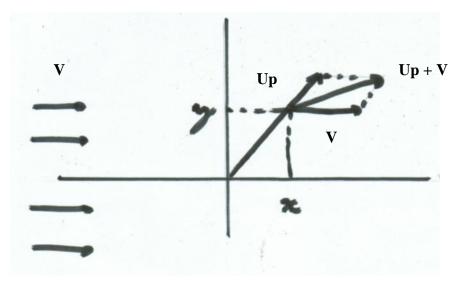
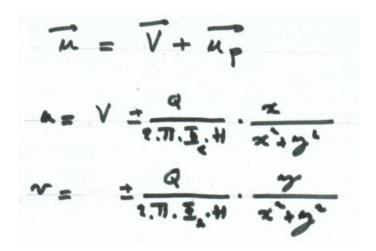


Figure 10 : vitesses autour d'un puits dans un aquifère en écoulement

D'après le théorème de superposition, la vitesse résultante est la somme de la vitesse du flux du puits et de la vitesse d'entrainement de l'aquifère.



IV.2 Evolution du flux hydraulique du puits à contrecourant

On cherche d'abord à calculer l'évolution du flux d'eau du puits suivant l'axe Ox en écoulement à contre-courant, c'est-à-dire dans la direction pour laquelle les vitesses d'eau du puits et de l'aquifère ont des sens opposés (puits injecteur vers l'amont du courant général de l'aquifère ou puits producteur vers l'aval du courant):

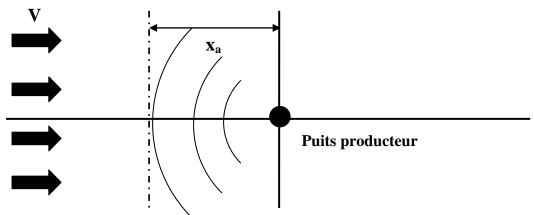
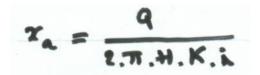


Figure 11 : évolution du flux hydraulique du puits à contre-courant

La composante de vitesse de l'écoulement (Ox) à contrecourant s'exprime par :

La vitesse est donc nulle sur Ox pour la distance au puits de :



Application numérique (exemple) :

H = 40 m

Q = 65 m3/heure

 $K = 1.25 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

i = dh / dx = 0.2% (variation longitudinale de la pression hydraulique dans l'aquifère)

Q (m3/h)	xa (m)
65	287
50	221
45	199
30	133
15	66

Tableau 3 : distance au puits du point à vitesse nulle vers l'amont

Sur l'axe Ox, l'écoulement (du puits producteur vers l'aval ou du puits injecteur vers l'amont) ne va pas plus loin dans l'aquifère en écoulement permanent - temps de pompage infini - que la distance x_a .

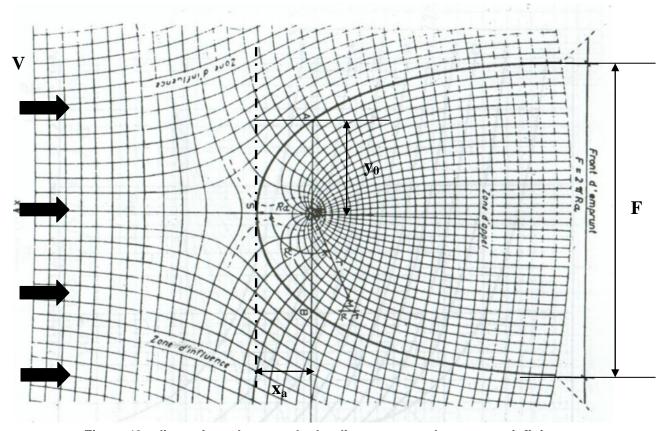


Figure 12 : dimensions du nuage hydraulique – temps de pompage infini

Pour le temps de pompage infini, les autres dimensions du panache hydraulique autour du puits se calculent par :

$$x_{A} = \frac{Q}{2.\pi.H.K.i}$$

$$y_{A} = \frac{Q}{4.K.H.i}$$

$$F = \frac{Q}{K.H.i}$$

Application numérique (exemple) :

H = 40 m

Q = 65 m3/heure

 $K = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

i = dh / dx = 0.2% (variation longitudinale de la pression hydraulique dans l'aquifère)

$$x_a = 310 \text{ m}$$

$$y_0 = 488 \text{ m}$$

$$F = 1.950 \text{ m}$$

$$F/2 = 975 \text{ m}$$

Sur Ox, à contrecourant, si on compte la vitesse du flux du puits positivement (donc la vitesse de l'aquifère négativement), l'équation de vitesse de superposition est :

C'est une équation différentielle qui peut s'écrire aussi sois la forme :

Le temps t s'exprime donc en fonction de l'abscisse x par l'intégrale simple :

$$t = \int_{0}^{\infty} \frac{x \cdot dx}{B - Ax}$$

$$B = \frac{Q}{2\pi \cdot H \cdot \overline{I}_{e}} A = \frac{K \cdot \lambda}{\overline{I}_{e}}$$

Cette intégrale très simple possède une solution exacte, qui permet d'exprimer le temps t_a mis par le fluide d'eau issu du puits (contre-courant) pour atteindre l'abscisse x_a :

$$t_A = -\frac{\alpha_A}{A} + \frac{B}{A^L} \cdot \ln \left(\frac{1}{1 - \frac{A}{B} \cdot \alpha_A} \right)$$

Application numérique (exemple) :

H = 40 m

Q = 65 m3/heure

 $K = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

i = dh / dx = 0.2% (variation longitudinale de la pression hydraulique dans l'aquifère)

 $\phi_e = 5\%$ (craie)

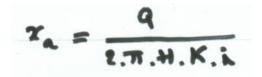
350 xa = 310,35 m D s t а n С е С 0 200 n t е 150 С 0 u 100 а n t 50 m 365 1825 2 190 2 5 5 5 3 650 4015

Les résultats du calcul sont présentés en page suivante ; le graphe est ci-dessous :

Figure 13 : évolution de l'abscisse contre-courant en fonction du temps

Temps de pompage (jours)

Le flux d'eau du puits ne peut remonter à contre-courant (puits injecteur ou puits producteur) plus loin que l'abscisse maximum



	T	
TAMONT	XAMONT	
(jours)	(m)	
0,1	5,000	
0,4	10,000	
0,9	15,000	
1,7	20,000	
3,9	30,000	
7,1	40,000	
11,3	50,000	
16,7	60,000	
23,3	70,000	
31,3	80,000	
40,7	90,000	
51,8	100,000	
64,5	110,000	
79,3	120,000	
96,1	130,000	
115,4	140,000	
137,3	150,000	
162,3	160,000	
190,7	170,000	
223,1	180,000	
260,0	190,000	
302,3	200,000	
351,0	210,000	
407,4	220,000	
473,4	230,000	
551,6	240,000	
645,5	250,000	
761,1	260,000	
907,8	270,000	
1 103,8	280,000	
1 388,9	<u> </u>	
1 888,4	300,000	
2 387,7	305,000	
2 745,8	307,000	
3 018,1	308,000	
3 445,2	309,000	
4 486,4	310,000	
·	,	

Tableau 4 : évolution de l'abscisse contre-courant en fonction du temps

IV.3 Evolution du flux hydraulique du puits dans le courant

On cherche ensuite à calculer l'évolution du flux d'injection suivant l'axe Ox en écoulement à co-courant, c'est-à-dire dans la direction pour laquelle les vitesses d'eau du puits et de l'aquifère s'ajoutent (puits injecteur vers l'aval du courant ou puits producteur vers l'amont) :

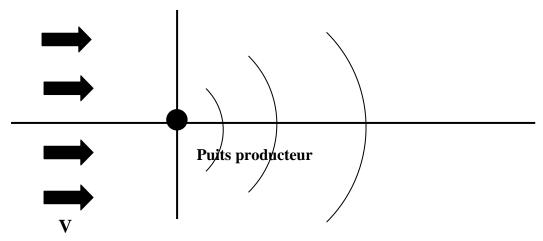


Figure 14 : évolution du flux hydraulique du puits à contre-courant

Sur Ox, à cocourant, si on compte la vitesse du flux du puits positivement (donc la vitesse de l'aquifère positivement également), l'équation de vitesse de superposition est :

C'est une équation différentielle qui peut s'écrire aussi sois la forme :

Le temps t s'exprime donc en fonction de l'abscisse x par l'intégrale simple :

$$t = \int \frac{x \cdot dx}{B + A \cdot x}$$

$$B = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot H \cdot \Xi_{e}} \quad A = \frac{K \cdot \lambda}{\Xi_{e}}$$

Cette intégrale très simple possède une solution exacte, qui permet d'exprimer le temps t_b mis par le fluide issu du puits pour atteindre l'abscisse x_b du flux du puits en cocourant :

$$\star_{A} = \frac{\kappa_{A}}{A} - \frac{B}{A^{2}} \cdot \ln\left(1 + \frac{A}{B} \cdot \kappa_{A}\right)$$

Application numérique (exemple) :

H = 40 m

Q = 65 m3/heure

 $K = 1,25 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

i = dh / dx = 0.2% (variation longitudinale de la pression hydraulique dans l'aquifère)

 $\phi_e = 5\%$ (craie)

Les résultats du calcul sont présentés en page suivante ; le graphe est ci-dessous :

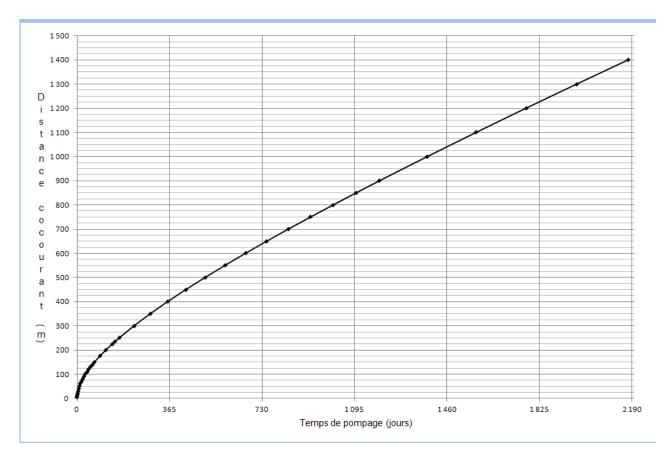


Figure 15 : évolution de l'abscisse contre-courant en fonction du temps

Dans le cas du flux co-courant, contrairement au cas contre-courant, l'expansion du nuage hydrodynamique du flux du puits suivant Ox n'est pas limitée. Plus on injecte, plus le nuage se développe vers l'aval de l'écoulement de l'aquifère.

TAVAL	XAVAL	
(jours)	(m)	
0,1	5,00	
0,4	10,00	
0,9	15,00	
1,5	20,00	
3,4	30,00	
5,9	40,00	
9,1	50,00	
12,9	60,00	
17,2	70,00	
22,1	80,00	
27,4	90,00	
33,3	100,00	
39,6	110,00	
46,4	120,00	
53,5	130,00	
61,1	140,00	
69,1	150,00	
90,6	175,00	
114,1	200,00	
139,5	225,00	
150,1	235,00	
166,6	250,00	
225,2	300,00	
289,2	350,00	
357,5	400,00	
429,8	450,00	
505,3	500,00	
583,9	550,00	
665,1	600,00	
748,6	650,00	
834,2	700,00	
921,7	750,00	
1 011,0	800,00	
1 101,8	850,00	
1 194,1	900,00	
1 382,5	1000,00	
1 575,4	1100,00	
1 772,3	1200,00	
1 972,5	1300,00	
2 175,8	1400,00	

Tableau 5 : évolution de l'abscisse contre-courant en fonction du temps

IV.4 Evolution de la forme du nuage du flux hydraulique du puits

Pour représenter suivant l'axe Ox l'évolution simultanée des dimensions co-courant et contrecourant du nuage du flux hydraulique du puits, il suffit de tracer les couples de valeurs (Xaval, Xamont) calculés chacun pour les mêmes temps de référence.

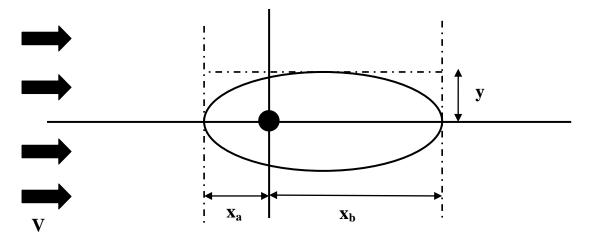


Figure 16 : forme du nuage du flux hydraulique au temps t

Pour avoir une idée au temps t de la dimension transversale du nuage hydraulique d'interaction du flux du puits avec l'écoulement lointain de l'aquifère, on peut simplement procéder par bilan matière en exprimant la conservation du flux hydraulique du puits :

La surface de l'ellipse (x_a, x_b, y) est :

$$S = \Pi \cdot \frac{\chi_{a} + \chi_{b}}{2} \cdot \gamma$$

Le volume d'eau mobile contenu dans le cylindre ellipse (x_a, x_b, y, H) est :

Comme le puits émet en permanence dans l'aquifère au débit Q :

Soit:

La relation entre les dimensions transversales y_2 et y_1 du nuage aux temps de pompage t_2 et t_1 s'exprime donc simplement par :

Dans la pratique, le calcul e l'évolution de la forme du nuage hydraulique au puits s'effectue sous Excel, temps par temps, en partant de la date de début du fonctionnement du puits.

Application numérique (exemple) :

H = 40 m

Q = 65 m3/heure

 $K = 1.25 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

i = dh / dx = 0.2% (variation longitudinale de la pression hydraulique dans l'aquifère)

 $\Phi_e = 5\%$ (craie)

Les résultats du calcul de la forme du nuage hydraulique autour du puits en fonction du temps (tableau et graphe) sont présentés en pages suivantes.

Le comparatif entre les formes des panaches hydrauliques à différents instants et la forme définitive du panache hydraulique pour un temps de pompage infini (nuage stabilisé) est également présenté en page suivante.

On voit sur ce résultat qu'il faut de longues années pour atteindre la taille finale du nuage hydraulique er régime de pompage infini.

XAVAL	Т	XAMONT	Y
(m)	(jours)	(m)	(m)
1,0	0,0	1,0	1,0
2,0	0,0	2,0	2,0
3,0	0,0	3,0	3,0
4,0	0,1	4,0	4,0
5,0	0,1	4,9	5,0
6,0	0,1	5,9	6,0
8,0	0,3	7,9	7,9
10,0	0,4	9,7	10,0
12,5	0,6	12,2	12,3
15,0	0,9	14,5	14,8
20,0	1,5	19,2	19,6
25,0	2,4	23,7	24,4
30,0	3,4	28,2	29,1
40,0	5,9	36,8	38,4
50,0	9,1	45,1	47,5
60,0	12,9	53,1	56,5
70,0	17,2	60,9	65,2
80,0	22,1	68,2	73,9
90,0	27,4	75,4	82,4
100,0	33,3	82,3	90,7
110,0	39,6	88,9	98,9
120,0	46,4	95,3	106,9
130,0	53,5	101,5	114,9
140,0	61,1	107,5	122,7
150,0	69,1	113,2	130,3
160,0	77,4	118,8	137,9
170,0	86,1	124,2	145,3
180,0	95,1	129,4	152,6
190,0	104,4	134,5	159,8
200,0	114,1	139,4	166,9
220,0	134,3	148,7	180,8
240,0	155,5	157,4	194,3
260,0	177,8	165,6	207,5
280,0	201,1	173,4	220,3
300,0	225,2	180,6	232,7
320,0	250,2	187,5	244,8
340,0	276,0	194,0	256,7
360,0	302,5	200,1	268,2
380,0	329,7	205,8	279,5
405,0	364,6	212,6	293,2

Tableau 6 : calcul de l'évolution de la forme du nuage hydraulique au puits

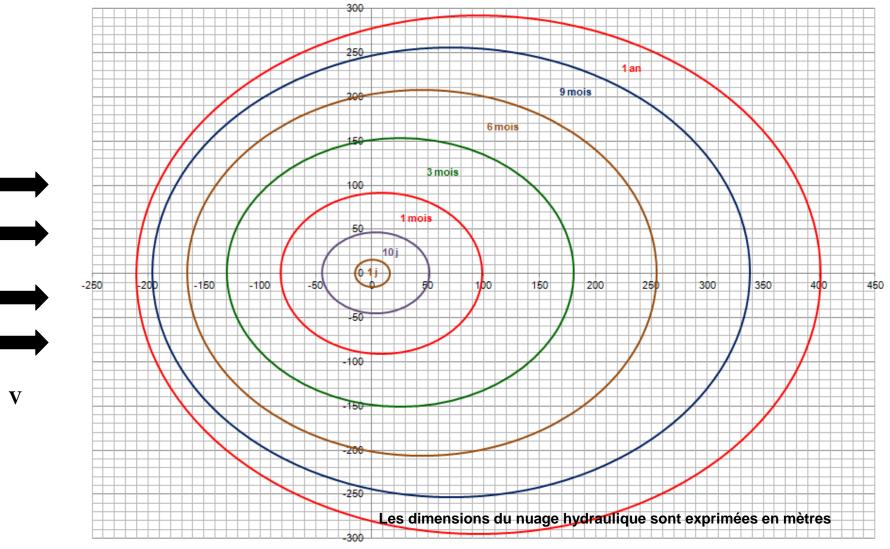


Figure 17 : évolution avec t du panache hydraulique au puits en écoulement permanent

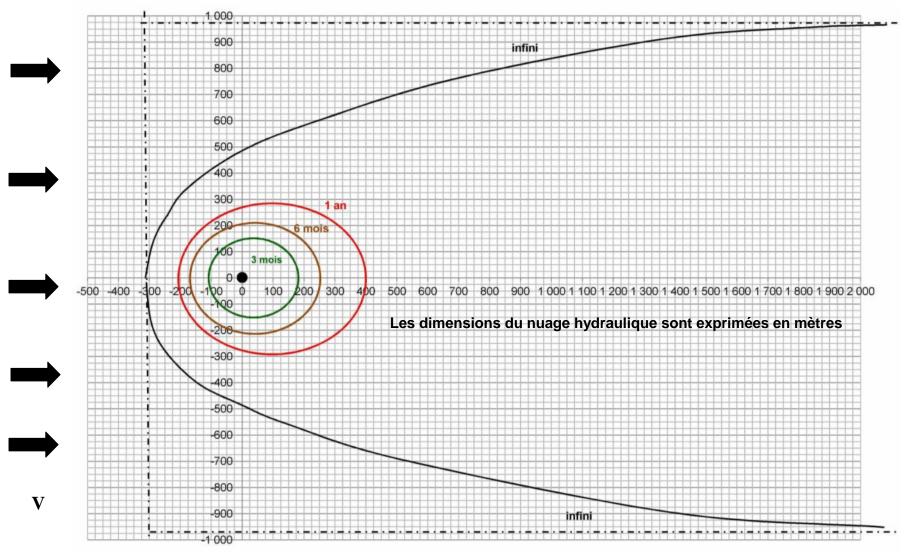
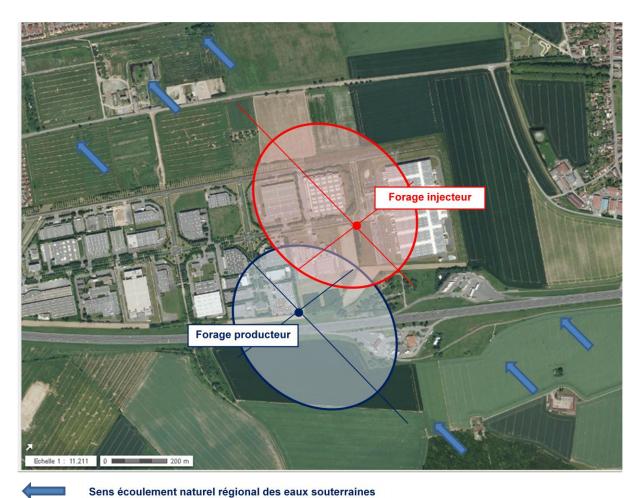


Figure 18 : panache hydraulique au puits de zéro au temps de pompage infini

L'état de développement des panaches hydrauliques aux puits injecteur et producteur au bout de 1 an de pompage continu à $Q = 65 \text{ m}^3/\text{heure}$ est présenté ci-dessous :



Carte 2 : développement des panaches hydrauliques après 1 an de pompage

V. EVOLUTION DU NUAGE THERMIQUE A L'INJECTEUR

V.1 Energie thermique injectée au puits

Il n'y a pas d'effet thermique au puits producteur.

On considère au puits injecteur (débit constant Q) que toute l'eau est réinjectée à une température plus froide de (DT = -5°C) que celle de l'eau pompée dans l'aquifère

Soit pour l'eau géothermique de l'aquifère :

 $\rho_{\rm w} = 1~000~{\rm Kg/m^3}$ (masse volumique eau géothermique)

C_w = 4 186 J/°C/Kg (capacité calorifique eau

 $\rho_{\rm w}$ C_w = 4,2 J/m³/°C

La puissance et l'énergie calorifiques (négatives) injectées dans l'aquifère par le puits injecteur sont donc égales à :

Pour la roche (craie seule) constitutive de l'aquifère :

 ρ_c = 2 500 Kg/m³ (masse volumique craie)

C_c = 1 000 J/°C/Kg (capacité calorifique eau

 ρ_{c} $C_{c} = 2.5 \text{ J/m}^{3} / {}^{\circ}\text{C}$

Pour l'ensemble de l'aquifère (eau + roche) :

 $\rho_a = 1 \ 200 \ \text{Kg/m}^3$

C_a = 1 350 J/°C/Kg (capacité calorifique eau

 ρ_a C_a = 2,7 J/m³/°C

La capacité calorifique de l'eau injectée au puits l'aquifère (eau + roche) est donc plus forte que celle de l'aquifère :

V.2 Relation entre volume thermique et volume poreux

Le volume d'aquifère impacté thermiquement par l'eau froide réinjectée autour du puits est :

Le volume d'aquifère impacté hydrauliquement par l'eau réinjectée autour du puits est :

Le rapport des 2 volumes est donc :

Application numérique :

$$\rho_{w}$$
. $C_{w} = 4.2 \text{ J/m}^{3} / {}^{\circ}\text{C}$

$$\rho_a$$
, $C_a = 2.7 \text{ J/m}^3 / {}^{\circ}\text{C}$

 $\phi_e = 5\%$ (craie)

$$V_c/V_p = 0.05 * 4.2 / 2.7 = 0.08$$

Le volume de l'aquifère impactée par le refroidissement thermique est donc beaucoup moins important que le volume de l'aquifère impactée par l'injection hydraulique.

D'autre part, les formes de ces volume (hydraulique / thermique) sont proches (hors échelles de grandeur) car l'équation du transfert thermique de température dans l'aquifère est dominée également par le phénomène de convection forcée. En flux monodimensionnel, l'équation de transfert de l'énergie thermique dans l'aquifère s'écrit :

Estimation des ordres de grandeur des termes :

$$\frac{\lambda}{R^{(A)}} \cdot \frac{\Delta T}{(\Delta x)^{1}} = \frac{1.5 \cdot 5}{1.210^{6} \times (100)^{1}} = 3.10^{10}$$

$$\frac{P_{a}(w)}{P_{a}(w)} \cdot U \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{4}{1.2} \times 5.10 \times \frac{5}{100} = 3.10$$

Le terme de transport de la température dans le milieu à l'aide du mouvement hydraulique du fluide aquifère (convection forcée) est donc environ 1000 fois plus grand que le terme de diffusion de la température.

Les effets de diffusion et de conduction thermique de la température dans le milieu sont totalement négligeables. C'est bien le modèle de transport de la température par advection forcée (entrainement de la température par le mouvement du fluide) qu'il faut retenir

$$\frac{\partial T}{\partial k} = -\frac{\rho_{\omega}.c_{\omega}}{\rho_{\alpha}.c_{\alpha}}.U.\frac{\partial T}{\partial x}$$

C'est le mouvement général du fluide dans l'aquifère qui créé l'essentiel du transport de la température dans le même sens de circulation.

V.3 Calcul de l'impact thermique de l'eau réinjectée

Il est donc très facile de représenter de manière simplifiée l'évolution du volume de l'aquifère impacté par le refroidissement de température autour du puits. C'est un simple rapport d'échelle par rapport au nuage hydraulique calculé précédemment (page suivante).

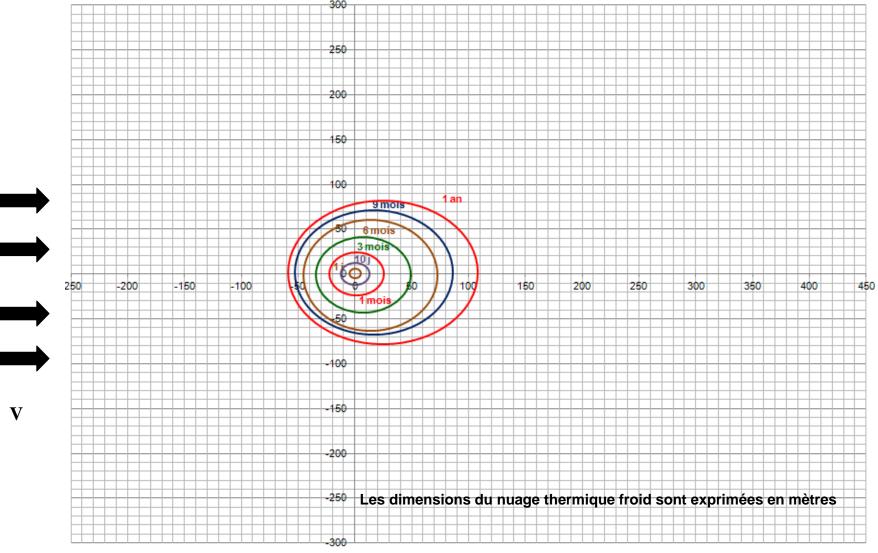
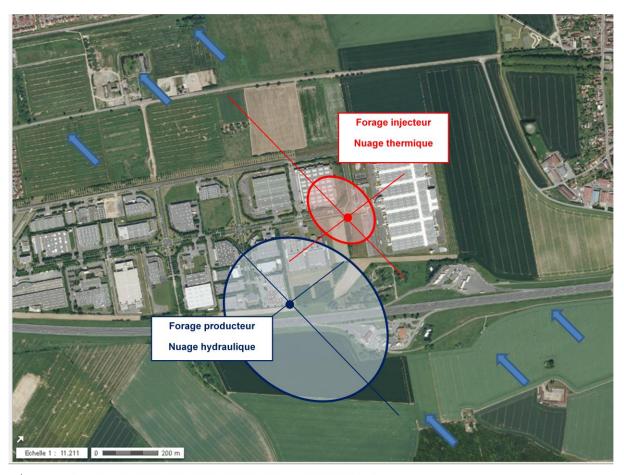


Figure 19 : évolution du panache thermique d'eau froide au puits injecteur

L'état de développement du panache thermique « froid » au puits injecteur et du panache hydraulique au puits producteur au bout de 1 an de pompage continu à $Q = 65 \text{ m}^3/\text{heure}$ est présenté ci-dessous :



Sens écoulement naturel régional des eaux souterraines

Carte 3 : nuage hydraulique et nuage thermique après 1 an de pompage

LISTE DES ILLUSTRATIONS

Liste des figures : FIGURE 15: EVOLUTION DE L'ABSCISSE CONTRE-COURANT EN FONCTION DU TEMPS.......23 Liste des cartes : Liste des tableaux :