



**OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU**

*Développer les compétences pour mieux gérer l'eau*

**ESSAIS DE POMPAGE**





# Essais de Pompage



Support de formation OFFICE INTERNATIONAL DE L'EAU  
Jean-François DADOUN

1

## Généralités et objectifs généraux

2

## Objectifs des essais de pompages

**Un double objectif:**

- **Connaître l'aquifère (essai de nappe)**
- **Connaître l'ouvrage (essai de puits)**



## Objectifs des essais de pompages

1. Établir les caractéristiques de référence de l'ouvrage et de la nappe testés (+ diagnostic)
2. **Déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère**
3. Évaluer les conditions aux limites de l'aquifère
4. **Rechercher les conditions optimales d'exploitation (débit exploitable, type et position de la pompe)**
5. Disposer d'outil permettant une modélisation mathématique de l'exploitation de l'ouvrage

4



## Déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère

- Transmissivité  $T$  ( $m^2/s$ )
- Coefficient d'emmagasinement  $S$
- Rayon fictif (m)

### Comment ?

Par la réalisation de pompages d'essai adaptés au contexte hydrogéologique et aux caractéristiques de l'ouvrage

7

## Évaluer les conditions aux limites de l'aquifère

- Pré-évaluation par la connaissance géologique et hydrogéologique du site
- Recherche des limites imperméables ou de ré-alimentation de l'aquifère ou de ses épontes

8

## Exemple: Cadre géologique et hydrogéologique

Évaluation géologique et hydrogéologique préliminaire  
Anticipation pour la future réalisation des essais de pompage

### Objectif:

- 1 - Visualisation du contexte géologique
- 2 - Visualisation du cadre hydrogéologique:
  - Zone aquifère (1 ou plusieurs niveaux aquifères ?)
  - Limites d'alimentation ou imperméable potentielles
- 3 – Repérage des forages ou puits voisins



## Choix du site d'essai

Si l'on a le choix, l'ouvrage choisi pour les essais:

- doit être représentatif de la zone étudiée (géologie, hydrogéologie, caractéristiques techniques de l'ouvrage)
- Éviter la proximité de voies de circulation (vibration), d'autres forages en cours de pompage
- Être accessible pour la mise en place du matériel
- Permettre un rejet des eaux d'exhaure sans risque de retour à la nappe ni risques environnementaux

## Modalités pratiques de mise en oeuvre



11

## Choix de la pompe

Le type de pompe choisie devra permettre:

- D'atteindre et de maintenir constant durant plusieurs jours voire plusieurs semaines un débit supérieur au débit instantané maximal (dernier paliers et phase de développement)
- De refouler l'eau pompée à une distance suffisante pour ne pas avoir de retour à la nappe

Elle disposera d'un clapet anti-retour (pas de retour d'eau à chaque arrêt de pompage)

12



## De l'intérêt des piézomètres

Ils permettent de disposer d'une information spatiale de l'influence du pompage et ainsi de disposer d'informations sur l'hétérogénéité de l'aquifère (variation de la transmissivité, limite imperméable, coefficient d'emmagasinement, ...).

L'absence de piézomètre réduit la quantité et la qualité des renseignements tirés des essais de pompage.

### Quelle quantité ?

- Fonction du budget disponible
- Au moins 1 piézomètre (coef. d'emmagasinement S, méthode spécifique, perte de charge)
- 3 piézomètres permettent un étude plus fine dans le temps et dans l'espace
- +1 piézomètre en dehors de la zone d'influence du forage (suivi de nappe hors zone d'influence du pompage)

### A quelle distance ?

La distance est fonction **du type de nappe**:

**Captive**: propagation rapide => distance grande

**Libre**: propagation lente => distance réduite

**Semi-captive**: intermédiaire et la distance dépendra de la résistance hydraulique verticale de la couche semi-perméable

Mais aussi:

De la **perméabilité**, du **débit de pompage**, du **% de l'aquifère crépiné**, de la **stratification**

En règle générale de 10m à 100m de l'ouvrage testé

13

## Exercices 1: Nombres et localisation des piézomètres

**Situation:** Nappe alluviale de l'Hérault

### Coupe lithologique prévisionnelle:

De	à		
0 m	4.8 m	SUPERF: LIMON	QUATERNAIRE
4.8 m	8 m	ALLUV: GRAVIER-SABLE	QUATERNAIRE
8 m	8.4 m	ALLUV: LIMON	QUATERNAIRE
8.4 m	22.8 m	ALLUV: GRAVIER-SABLE	QUATERNAIRE
22.8 m	23.4 m	SABLE, JAUNE	ASTIEN
23.4 m	23.5 m	GRES	ASTIEN

**Objectif:** Déterminer le nombre et la localisation optimale des piézomètres pour le forage St Martin (en bleu)



## Proposition : Nombre et localisation des piézomètres

De	à		
0 m	4.8 m	SUPERF: LIMON	QUATERNAIRE
4.8 m	8 m	ALLUV: GRAVIER-SABLE	QUATERNAIRE
8 m	8.4 m	ALLUV: LIMON	QUATERNAIRE
8.4 m	22.8 m	ALLUV: GRAVIER-SABLE	QUATERNAIRE
22.8 m	23.4 m	SABLE, JAUNE	ASTIEN
23.4 m	23.5 m	GRES	ASTIEN

### Problématique

De l'existence d'un chenal à forte perméabilité  
 D'une limite d'alimentation (fleuve) susceptible d'être aussi un vecteur de pollution  
 D'éventuelle limite imperméable à l'Ouest

### Nombre de piézomètres:

Il faudra donc au mieux 5 piézomètres (dont 1 en amont hydraulique hors rayon d'influence et 1 sur la rive opposée du fleuve).

Distance au forage: minimum 1 fois l'épaisseur de l'aquifère soit 15 mètres (hors zone de perturbation des écoulements liées aux pertes de charges)

Rayon d'interférence du pompage estimative=  $Rf=1.5\sqrt{Tt/S}$  soit avec  $T=10^{-2}m^2/s$  et  $S=10^{-3} \Rightarrow Rf=201m$  pour  $t=30'$  ( $Rf=2414m$  à 72h)  
 On positionnera donc les piézomètres entre 15 et 200m et 1 piézo au delà de 2500m (hors zone d'influence)

### Pour la détermination de la distance à la limite:

Le régime transitoire devra être observé sur une durée assez longue pour tracer la droite représentative du cas général.



## Connaissances préalables à la réalisation des essais de pompage

### Données techniques et hydrogéologiques de l'ouvrage et des piézomètres:

- Coupe technique (côte des crépines, ...)
- Coupe géologique,
- Niveau et débit des arrivées d'eau observés en cours de foration
- Côte de l'aspiration de la pompe
- Côte du capteur
- Existence de forage parasite à proximité
- Cadre géologique du secteur
- Evolution naturelle de la nappe (hors pompage)
- Données pluviométriques des jours précédents
- Condition d'exploitation prévue pour le captage

## Données à surveiller avant et en cours d'essai de pompage

- Pluviométrie
- Travaux pouvant affecter la nappe (carrière, tranchée drainante, ...)
- Pompage voisin
- Rejets des eaux d'exhaures
- Qualité de l'eau d'exhaure
- Débit d'exhaure
- Niveaux piézométriques

17

## Matériel indispensable

### Minimum:

- 1 forage, 1 piézomètre, 1 pompe !!!
- 1 sonde piézométrique lumineuse et sonore
- 1 débitmètre (dans les cas graves: un seau et un chronomètre !)
- 1 vanne de régulation du débit, 1 clapet anti-retour
- Des canalisations de rejet suffisamment longues

### Pour faire bien :

- 1 capteur de pression avec enregistreur (datalogger)
- 1 débitmètre volumétrique avec enregistrement
- 1 variateur de fréquence (régulation du débit avec le rabattement piézométrique)
- Des sondes de pH, conductivité ou autres avec enregistrement
- Du matériel d'analyse de la qualité de l'eau
- Pluviomètre à auget avec enregistreur

18

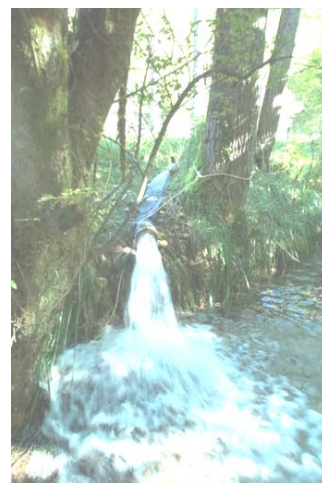
## Essai de pompage sur forage AEP (vallée de l'Hérault)



19

## Refoulement de l'eau pompée

- Pas de retour à la nappe !
- Hors de la zone des piézomètres
- En aval hydrogéologique du forage pompée
- Hors de la zone d'influence du pompage



20

## Opérations de développement et tests préalables aux essais de pompage

### Pourquoi ?:

- Contrôle du matériel de pompage et de suivi (débitmètre, capteur, pompe, ...)
- Vérification du développement correct du captage et de son environnement
- Premier aperçu du débit et rabattement spécifique, du débit maximum, de la durée de pompage pour l'obtention d'un régime permanent (essai par palier)

21

## **Opérations de tests et de contrôle de développement préalables aux essais**

- Contrôle du sens de rotation de la pompe
- Augmentation progressive du débit, par paliers enchaînés, avec suivi du rabattement dans le forage et les piézomètres (surveillance de la qualité de l'eau, turbidité)
- Surpompage alterné (interruption momentanée du pompage pour inversion du sens de circulation de l'eau)  
*→ attention aux risques de colmatage mécanique ou d'ensablement*
- Contrôle de validité des débitmètres, sondes et capteurs, groupe électrogène
- Validation du point de rejet et contrôle des risques liés aux rejets

22

## Essai de puits / Essai par paliers



23

## Essai de puits / Essai par paliers

### Objectifs

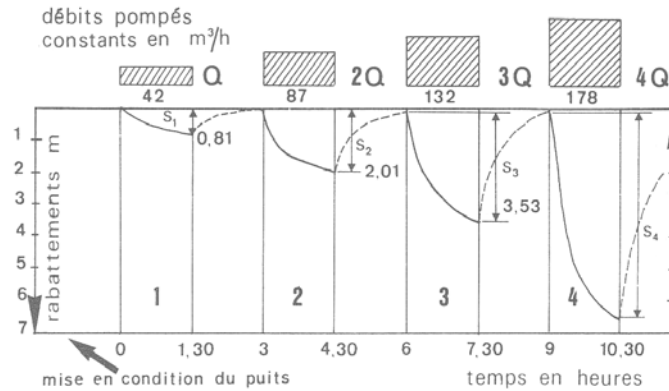
- Évaluer les caractéristiques du complexe aquifère / ouvrage de captage:
  - Pertes de charges dans l'ouvrages et son environnement direct
  - Débit spécifique  $(\text{m}^3/\text{h})/\text{m}$  et rabattement spécifique  $\text{m}/(\text{m}^3/\text{h})$
  - Débit critique  $(\text{m}^3/\text{h})$
  - Productivité, Rendement
- Déterminer la courbe caractéristique de l'ouvrage:  $s=f(Q)$  au temps  $t$

24

## Essai de puits / Pompage par paliers

### méthode 1

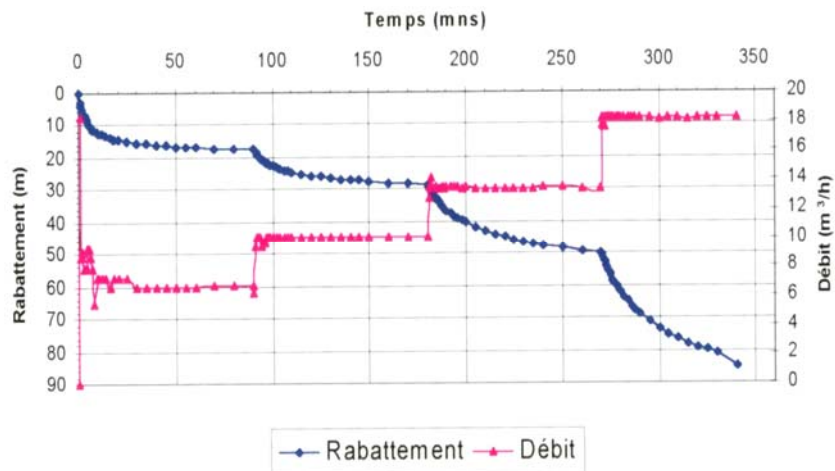
- Par paliers de débit constant et durée égale (1h à 2h).  
Interruption de pompage d'une même durée entre chaque palier (exemple nappe libre dans la craie)



## Essai de puits / Pompage par paliers

### méthode 2

- Par paliers enchaînés de débit constant



## Durée et nombre de paliers (essai de puits)

### Durée des paliers ?

En général, de 1h à 3h, jusqu'à obtention d'une stabilisation (régime permanent) ou pseudo-stabilisation (Évaluation de durée à faire au cours des tests préliminaires)

### Nombre de paliers ?

- En nappe captive: minimum 3
- En nappe libre ou semi captive: 4 ou plus
- Le derniers paliers sera effectué à un débit égal au  $Q_{max}$  estimé ( $>Q_{critique}$ ) si possible

### Conseils:

- ✓ Commencez l'essai tôt le matin ! (7h minimum d'acquisition pour 4 paliers d'1heure)
- ✓ Prévenez tout risques de coupure de courant (carburant, surtension, ...) pour éviter un arrêt en cours d'essai
- ✓ Éloignez la foule et les curieux (déconcentration assurée !)
- ✓ Pensez au chapeau, au casse-croûte et à prendre de quoi boire !

27

## Débit des paliers

On aura déterminé le  $Q_{max}$  au cours des opérations préliminaires de développement ou de tests. A défaut on prendra le  $Q$  instantané maximum observé en cours de foration (MFT).

### **Avec 4 paliers**

Palier 1:  $Q_{max}/4$   
Palier 2:  $Q_{max}/3$   
Palier 3:  $Q_{max}/2$   
Palier 4:  $Q_{max}$

### **Avec 3 paliers**

Palier 1:  $Q_{max}/3$   
Palier 2:  $2.Q_{max}/3$   
Palier 3:  $Q_{max}$

28



## Essai de puits / Essai par paliers

### Intervalle de temps entre 2 mesures

<i>Durée depuis le début de la descente ou de la remontée</i>	<i>Mesures des niveaux ou des rabattements</i>	<i>Mesures de débit</i>
0 à 5 mn	toutes les 30 secondes	toutes les minutes
5 à 10 mn	toutes les minutes	toutes les 2 minutes
10 à 20 mn	toutes les 2 mn	toutes les 5 mn
20 à 40 mn	toutes les 5 mn	toutes les 5 mn
40 mn à 1h30	toutes les 10 mn	toutes les 10 mn
1h30 à 3 h	toutes les 15 mn	toutes les 15 mn
3h à 5h	toutes les 30 mn	toutes les 30 mn
5h à 8 h	toutes les heures	toutes les heures
au delà de 8h	toutes les heures	toutes les heures

29

## Essai de puits / Essai par paliers

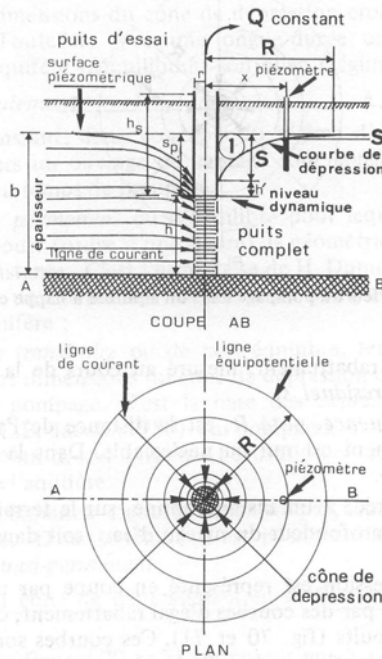
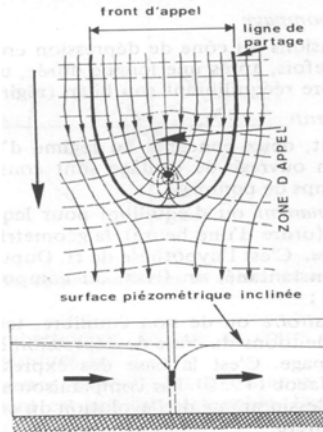
### Réalisation de l'essai par palier

- Noter l'heure de démarrage du 1<sup>er</sup> palier
- En cours de pompage, noter tout événements particuliers (pluie, problème de pompe, ...)
- En fin de palier et avant arrêt de pompage:  
 Contrôle à la sonde manuelle du niveau dynamique P  
 Prélèvement d'eau pour analyse (T°, pH, Conductivité au minimum, éléments particuliers (Chlorure) dans certains cas)

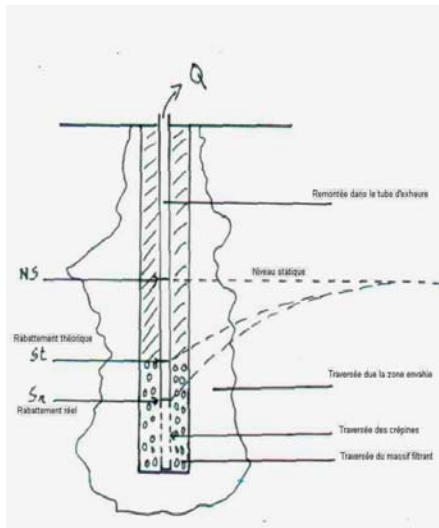
30

## Les rabattements

- Le rabattement de l'eau mesuré dans l'ouvrage est la résultante de la somme des différentes pertes de charges



## Les pertes de charges



Pertes d'énergie potentielle liées aux difficultés de circulation de l'eau de l'aquifère et le forage

En cause:

- la nature de la formation aquifère,
- les perturbations de l'écoulement au voisinage et dans l'ouvrage (zone envahie, massif filtrant, crépines, tube d'exhaure)

2 types de pertes de charge:

Linéaire (BQ)

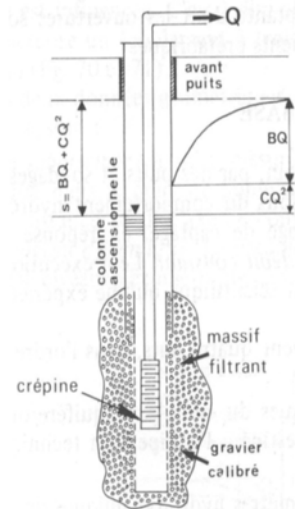
Quadratique (CQ<sup>2</sup>)

## Pertes de charge linéaire BQ

Elles sont provoquées par l'écoulement laminaire dans l'aquifère au voisinage de l'ouvrage et sont imposées par les paramètres hydrodynamiques de l'aquifères. Elles augmentent avec le temps de pompage.

## Pertes de charge quadratique CQ<sup>2</sup>

Elles sont provoquées par l'écoulement turbulent dans l'ouvrage (crépine, tubage) et imposées par les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère. Elles sont fonction du débit pompé et des caractéristiques de l'équipement technique de l'ouvrage.



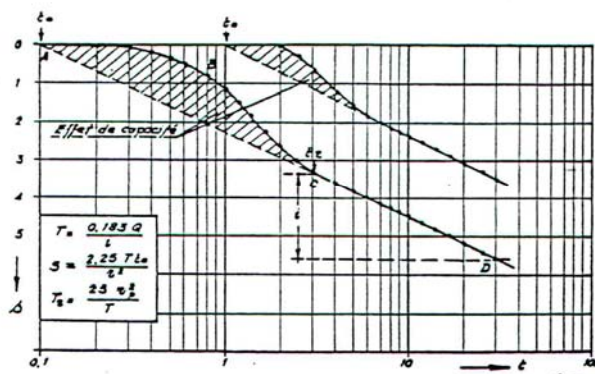
Le rabattement réel mesuré est égal à la somme de ces deux types de pertes de charge:

$$s = BQ + CQ^2 \text{ ou } n$$

33

## L'effet de capacité

- C'est un effet de vidange de l'ouvrage. Au tout début du pompage, une partie du débit prélevé provient directement de l'ouvrage et d'une partie de son environnement très proche (cavité) sans avoir transité dans l'aquifère.
- **Problème:**
  - Hors conditions d'application des modèles théoriques
  - Décalage des données pour les essais par paliers et longue durée



34

Tableau récapitulatif des résultats (nappe captive – sables Aptien de la vallée de l'Hérault)

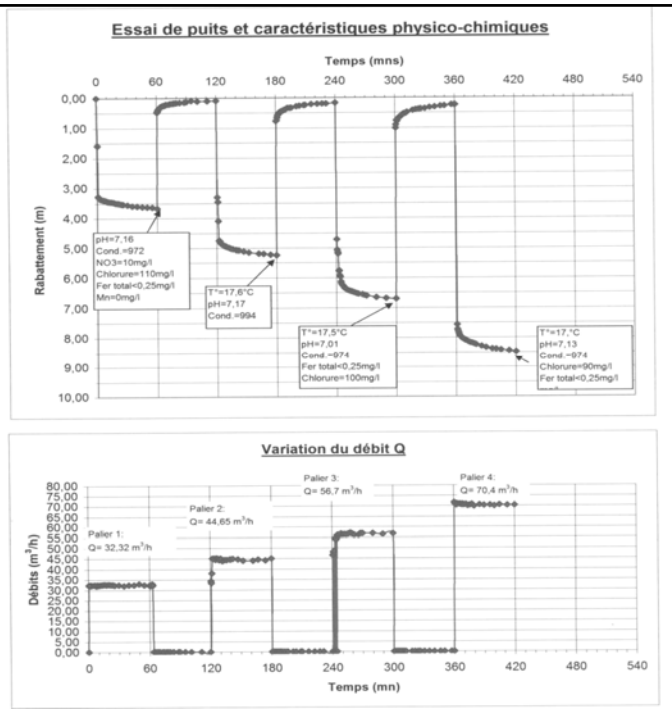
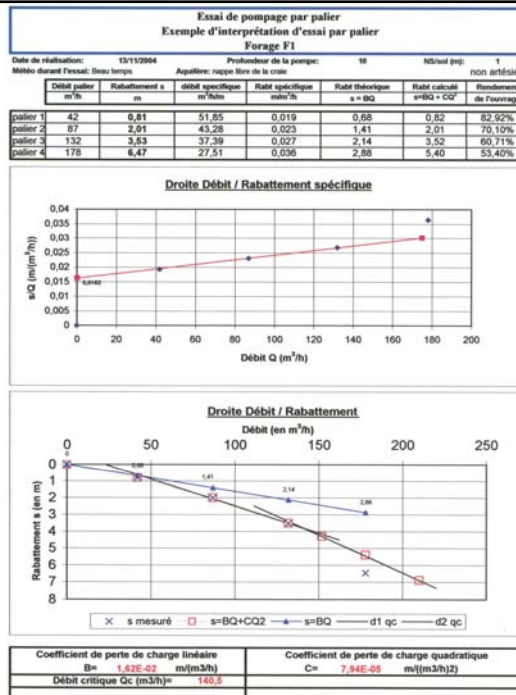


Tableau récapitulatif des résultats 2: Interprétation des résultats (nappe libre de la craie)



Courbe caractéristique de l'ouvrage



## Le débit d'exploitation recommandé

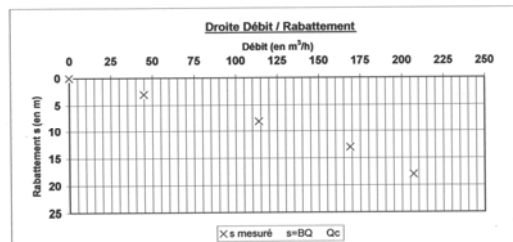
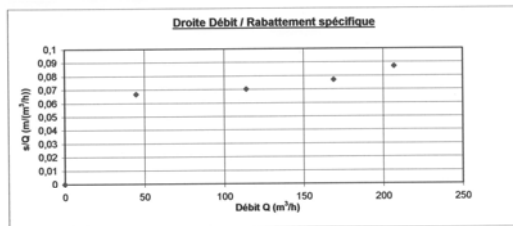
Il devra tenir compte:

- Du débit critique déterminé par l'essai par palier
- Des résultats de l'essai de nappe (effets limites, fluctuations saisonnières de la nappe)
- Des caractéristiques de l'équipement de captage (position des crépines, de la pompe, des sécurités manque d'eau)
- Des risques de colmatage (mécanique, physico-chimique, bactérien, entartrage)
  - > Une excellente formation « Diagnostic, vieillissement et réhabilitation d'un forage d'eau » est dispensée par l'Office International de l'Eau.
- Des problématiques liées à la qualité de l'eau (biseau salé, ...)
- Du mode d'exploitation souhaité par le maître d'ouvrage

39

Essai de pompage par palier						
Exemple support de cours Office International de l'Eau forage Ste Marie						
Date de réalisation:	25/05/1957	Profondeur de la pompe:	40m/sol	Niveau (m):	-23,00m/sol	
Débit palier m <sup>3</sup> /h	Rabattement s m	débit spécifique (m <sup>3</sup> /h)/m	Rabat spécifique m/m <sup>2</sup> /h	Rabat théorique s = BQ	Rabat calculé s=BQ + CQ <sup>2</sup>	Rendement de l'ouvrage
palier 1	45	3,00				
palier 2	114	8,90				
palier 3	169	13,00				
palier 4	207	18,00				

Exercices: Essai de puits / Essai de pompage par paliers



Coefficient de perte de charge linéaire B= m/(m <sup>3</sup> /h)	Coefficient de perte de charge quadratique C= m/((m <sup>3</sup> /h) <sup>2</sup> )
Débit critique Qc (m <sup>3</sup> /h)=	nappe captive des grés Yprésien

40

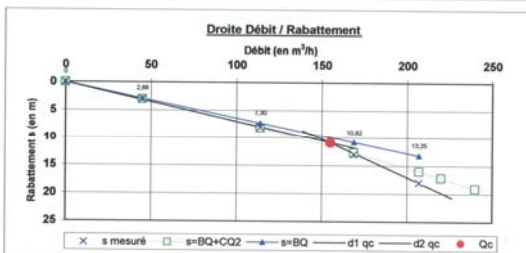
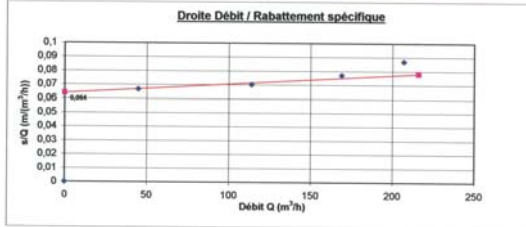
Déterminer:

1. Q spécifique,
2. Rabattement spécifique,
3. Perte de charge linéaire et quadratique,
4. Rendement de l'ouvrage, Débit critique

Essai de pompage par palier Exemple support de cours Office International de l'Eau forage Ste Marie							
Date de réalisation:	25/09/1987	Profondeur de la pompe:	40mvsol	Niveau (m):	-33,00mvsol		
Débit palier m <sup>3</sup> /h	Rabattement s m	débit spécifique (m <sup>3</sup> /h)/m	Rabat spécifique m <sup>2</sup> /h <sup>2</sup>	Rabat théorique s=BQ	Rabat calculé s=BQ+CQ <sup>2</sup>	Rendement de l'ouvrage	
palier 1	45	3,00	15,00	0,067	2,88	3,01	85,64%
palier 2	114	8,00	14,25	0,070	7,30	8,14	89,65%
palier 3	169	13,00	13,00	0,077	10,82	12,07	85,39%
palier 4	207	18,00	11,50	0,087	13,25	16,02	82,08%

Exercices: Essai de puits /  
Essai de pompage par  
paliers

### Résultats



Coefficient de perte de charge linéaire $B= 6,40E-02$ m(m <sup>3</sup> /h)	Coefficient de perte de charge quadratique $C= 6,48E-06$ m(m <sup>3</sup> /h) <sup>2</sup>
Débit critique Qc (m <sup>3</sup> /h)= 185,1	nappe captive des grès Yprésien

41

### Différents types de courbe Débit/ Rabattement spécifique

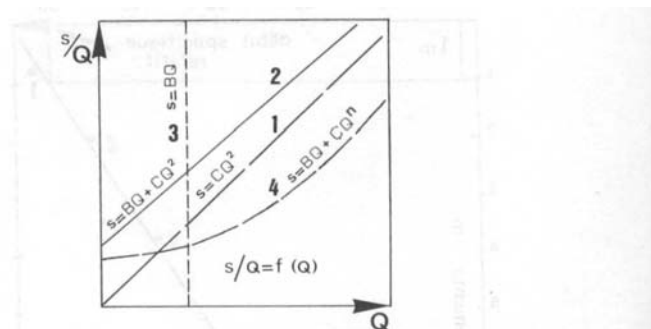
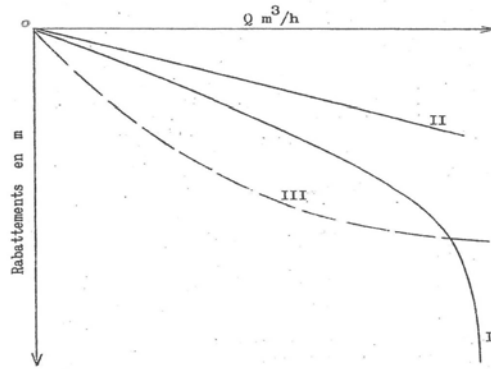


Figure 78 -Droites débits/rabattements spécifiques. D'après J. Forkasiewicz (1978).  
1, régime turbulent prédominant dans l'aquifère et dans le puits ; 2, régimes turbulent et laminaire ; 3, régime laminaire avec pertes de charge dans la crépine et le tubage, nulles ou négligeables ; 4, perte de charge quadratique avec exposant,  $n = 3, 4$ , etc.

42



## Types de nappe et Validité de l'essai par palier

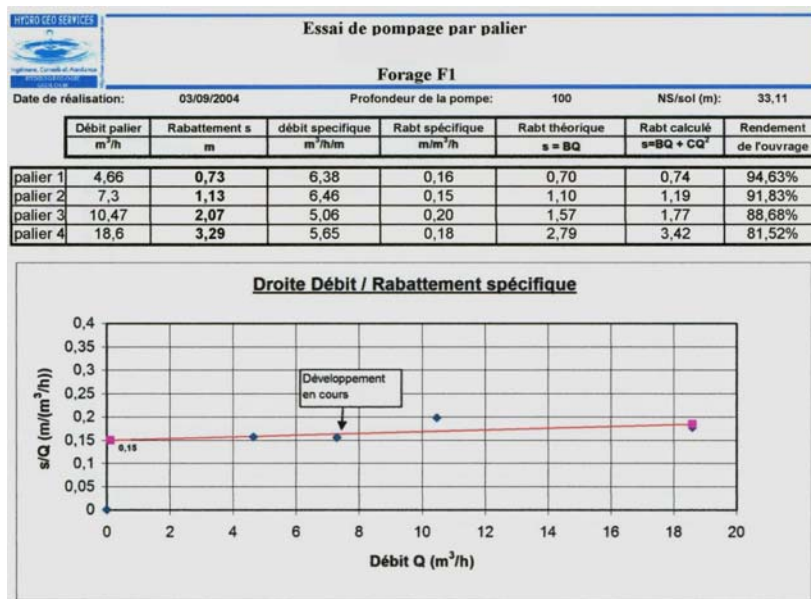


- Types de caractéristiques.

- I - nappe libre
- II - nappe captive
- III - essai défectueux

43

## Exemple: Essai de puits / Essai de pompage par paliers Développement en cours

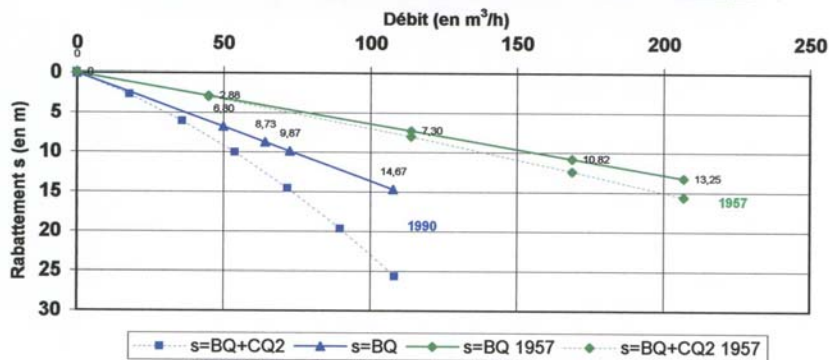




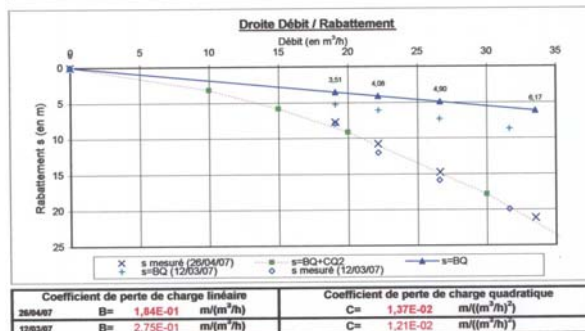
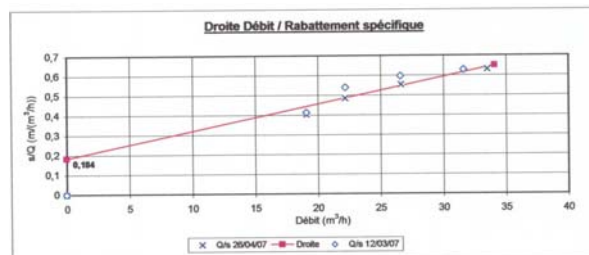
## De l'intérêt de la connaissance de l'évolution des pertes de charges dans le temps

**Suivi qualitatif** du complexe aquifère / ouvrage dans le temps par comparaison des courbes caractéristiques de l'ouvrage à différentes dates. Ces courbes réalisées dans des conditions expérimentales similaires permettent l'établissement d'un diagnostic précis (étude de phénomènes de colmatage ou développement, détérioration de l'équipement de captage, problématique de ressource)

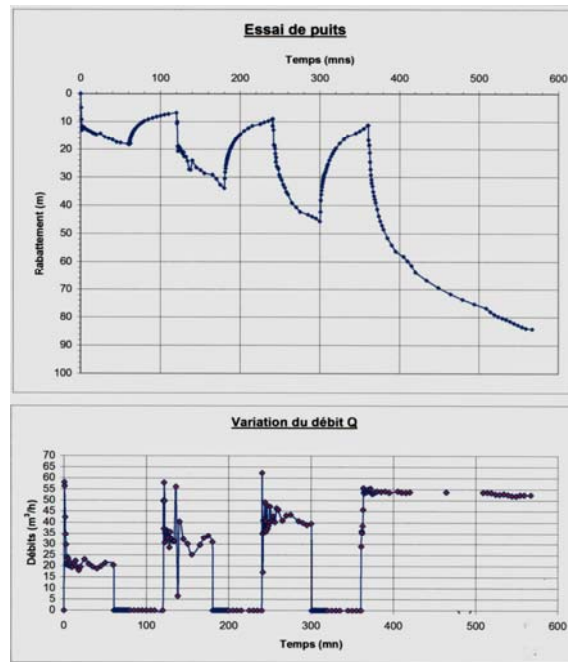
**Droite Débit / Rabattement: Exemple d'évolution de colmatage**



Exemple de décolmatage  
(Cause de Viols le Fort)



**Exercice :**  
Analyse critique  
de validité  
(nappe captive -  
Rodez)



47

**Etude de cas:**  
Forages de l'Office International  
de l'Eau  
- La Souterraine -

**Objectifs:**  
Contrôle, analyse de situation et mise en oeuvre  
Réalisation d'un essai de puits  
Exemple de mise en oeuvre sur site

48

## Essai de nappe / Essai de pompage longue durée

49

### Essai de nappe / Essai de pompage longue durée

#### Objectif

1. Déterminer les caractéristiques hydrauliques de l'aquifère:

#### En nappe captive:

- Transmissivité  $T$  ( $m^2/s$ )
- Coefficient d'emmagasinement  $S$
- Rayon fictif  $R_f$  (ou rayon d'influence du pompage) ( $m$ )

#### En nappe semi-captive:

- Résistance hydraulique verticale  $c$  (jours) (ou résistance à l'écoulement vertical)
- Facteur de drainance  $L$  ( $m$ )

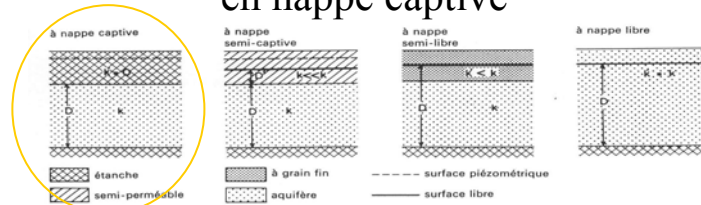
#### En nappe libre:

- Facteur d'égouttement

2. Déterminer les conditions aux limites de l'aquifère

50

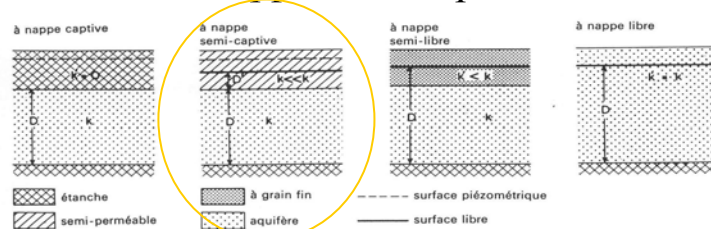
## Caractéristiques hydrauliques en nappe captive



- **Transmissivité  $T$  ( $m^2/s$ )** = débit traversant une section normale à l'écoulement, de largeur unitaire prise sur toute l'épaisseur de l'aquifère et sous un gradient hydraulique égal à l'unité (unité:  $m^3/s / m$ )
- **Coefficient d'emmagasinement  $S$**  = volume d'eau libéré ou emmagasiné à travers une surface d'aire égale à l'unité, pour une variation de la charge hydraulique normale à cette surface. Pour une nappe captive, il dépend de l'élasticité des roches et de l'eau. Grandeur de l'ordre de  $10^{-4}$  à  $10^{-6}$ . En nappe libre, il équivaut à la porosité efficace de la roche (élasticité négligeable)
- **Rayon fictif  $R_f$  (m)** = (ou rayon d'influence du pompage)
- **Conditions aux limites de l'aquifère** (limite d'alimentation, limite imperméable, et tous les états intermédiaires)

51

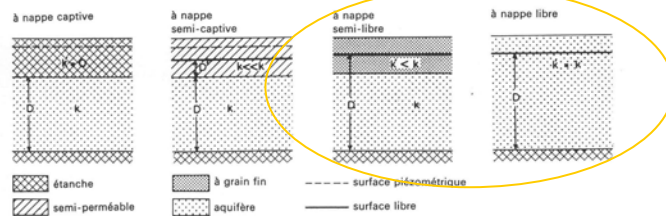
## Caractéristiques hydrauliques en nappe semi-captive



- **Résistance hydraulique verticale  $c$  (jours)** (ou résistance à l'écoulement vertical) =  $c$ 'est le rapport entre l'épaisseur saturée  $D$ ' de la couche semi-captive et sa perméabilité verticale  $k'$ , soit  $D'/k'$ . Elle caractérise la résistance de la couche semi-perméable à la drainance vers le haut ou vers le bas.
- **Facteur de drainance  $L$  (m)** = Le facteur de drainance détermine la répartition des échanges d'eau entre la nappe principale et la couche semi-perméable. Il permet de connaître la provenance de l'eau pompée dans l'ouvrage de captage. Un facteur  $L$  élevé indique une grande résistance à l'écoulement dans la couche semi-perméable par rapport à la résistance dans la nappe proprement dite.  $L$ 'influence de la drainance est alors faible.

52

## Caractéristiques hydrauliques en nappe libre avec débit retardé



- **Facteur d'égouttement  $B$  (m)** = Il peut se comparer au facteur de drainage des nappes semi-captives. Une valeur de  $B$  élevée témoigne d'un drainage rapide. Si le facteur  $B$  est infini, on a affaire à une nappe libre sans débit retardé.

53

## Régime d'écoulement

### Régime permanent:

Équilibre entre le débit sortant de l'ouvrage et le débit entrant par ailleurs dans la nappe. L'évolution du rabattement dans le temps (au niveau des piézomètres) est alors négligeable, et le gradient hydraulique aux abords de l'ouvrage de captage devient constant.

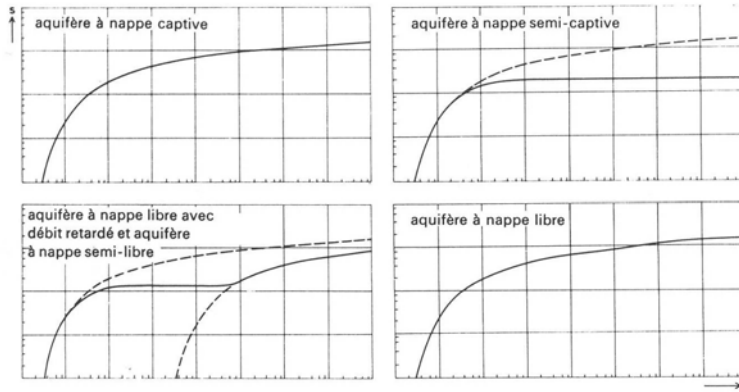
### Régime transitoire (ou de non équilibre) :

Il se produit entre le début du pompage et le moment où l'on atteint le régime permanent.

Nappe captive = Régime transitoire

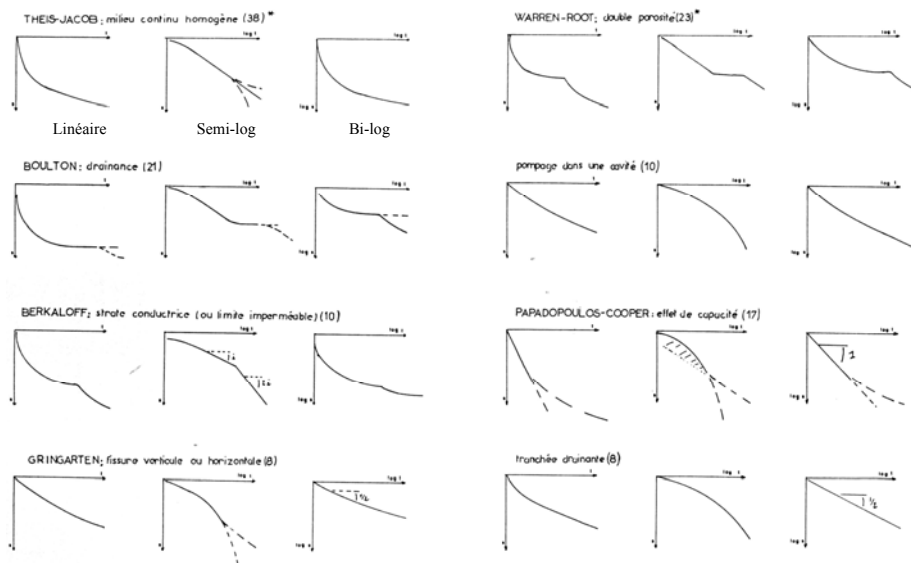
54

## Type de nappe / Type de courbes (représentation bi-logarithmique)



55

## Types de courbes et modèles représentatifs



56

## Mise en œuvre: Données à surveiller

- Pluviométrie
- Travaux pouvant affecter la nappe (carrière, tranchée drainante, ...)
- Pompage voisin
- Rejets des eaux d'exhaures
- Qualité de l'eau d'exhaure (chlorure, conductivité, Fer, Nitrate, ...)
- Débit d'exhaure
- Niveaux piézométriques: attendre la remontée complète au niveau statique initial avant le début de pompage d'essai

57

## Durée de l'essai longue durée

- Elle dépend:
  - du type de nappe,
  - du degré de précision recherché,
  - des conditions d'exploitation espérées,
  - de la géologie (limite imperméable ou d'alimentation suspectées).
- Les 48 à 72h DDASS traditionnelles
- Considération pratique de représentation graphique semi-logarithmique: (5 modules semi-log=10 000' soit 6.94 jours)

58

## Décision d'arrêt du pompage

- En règle générale, on cherche à atteindre un régime pseudo-permanent afin d'obtenir des informations précises sur l'aquifère (recherche des conditions aux limites)
- En pratique:
  1. On tracera la courbe au fur et à mesure de l'essai afin de juger de son évolution. L'apparition de limite conduira à la poursuite de l'essai.
  2. On gardera en tête, les conditions d'exploitation future souhaitées pour l'ouvrage et on tâchera de reproduire au minimum ces conditions pour l'essai longue durée (si possible en période d'étiage).

59

## En fin de pompage et avant arrêt

- Prélèvement pour analyse d'eau
- Contrôle manuel du niveau dynamique à la sonde piézométrique
- Contrôle du débit
- Vérification de l'absence d'amorce de condition aux limites sur les courbes (temps, rabattement)

60



# Mise en forme des données (Tableaux de données brutes)

- Unité de mesure: m<sup>3</sup>/h, m, minutes

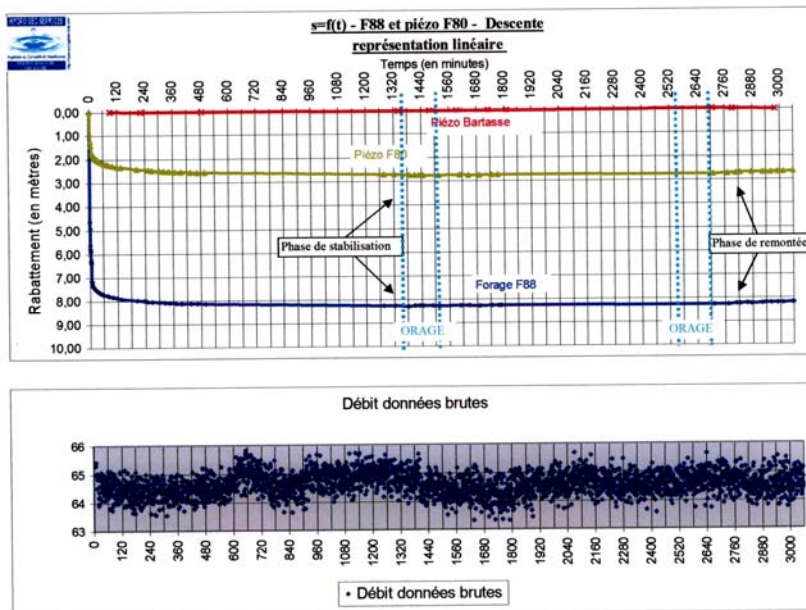
ESSAI DE POMPAGE LONGUE DUREE / Descente							Essai de pompage longu		
S.A.E.P du BLAGOUIR - SOULLAC (46)							Suivi des piézomètres		
Forage Castinière							Piezomètres		
N.S./sol (en m):	2,93	Prof pompe /sol (m) =	6,5	diff. Captr-manuel =	-0,69	Compteur totalisateur débit: 70292			
Débit (m <sup>3</sup> /h) =	78	Prof capteur /sol (m) =	27,58	rapair/sol (m):	1,08	Piézo P11			
Opérateur : J.F. DADOUN		Météo: Soleil et pluie		Date de l'essai : 17/10/2003			Distance au Forage		
							8		

Temps (mn)	Manuel/rapair	Niv capteur	Niv dynamique / sol (m)	Rabatement (m)	Débit (m <sup>3</sup> /h)	Conductivité mS/cm	s/O	temps	Capteur	rabatt.
0,1	4,01	23,96	2,93	0,00	0		0	0,1	4,11	0,00
0,5		23,96	2,93	0,00	80		-0	0,5	4,11	0,00
1,0		23,96	2,93	0,00	80		-0	1,0	4,11	0,00
1,5		23,91	2,98	0,05	87,03		-0	1,5	4,12	-0,01
2,0		23,96	2,93	0,00	86,63		-0	2,0	4,11	0,00
2,5		23,92	2,97	0,04	86,4	647,2	0	2,5	4,12	-0,01
3,0		23,93	2,96	0,03	83,96	634,4	0	3,0	4,12	-0,01

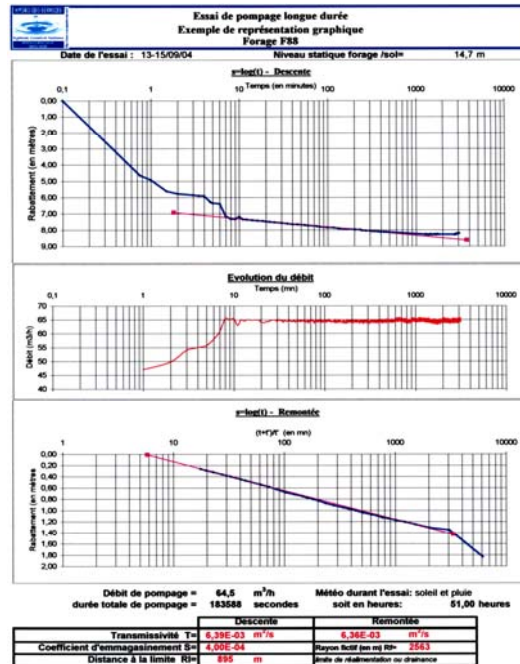
61

# Mise en forme des données LD: graphiques



62

Mise en forme  
des données LD:  
Graphiques  
semi-log  
(Sables Aptien captif  
de la vallée de  
l'Hérault)



63

### Suivi de la remontée au niveau statique

- Le pas de temps d'enregistrement sera similaire à celui utilisé pour la descente.
- On suivra de la même manière, la remontée sur les piézomètres
- La remontée sera suivie jusqu'au retour au niveau statique

64

## Méthode d'interprétation des essais de nappe

65

### Condition d'application des méthodes d'interprétation

- En règle générale pour la plupart des méthodes d'interprétation les hypothèses de base d'application suivantes doivent être respectées:
  - Aquifère isotrope, homogène et d'épaisseur constante dans la zone influencée par le pompage
  - Puits complet: l'ouvrage pénètre entièrement l'aquifère et l'eau arrive en écoulement horizontal sur toute l'épaisseur de la nappe
  - Surface piézométrique horizontale avant le pompage
  - Pompage à débit constant
- En régime transitoire, on ajoutera à ces hypothèses les conditions suivantes:
  - ✓ L'emmagasinement de l'eau dans l'ouvrage est négligeable
  - ✓ L'eau emmagasinée est libérée au même instant que la baisse de la charge hydraulique (hors nappe libre ou semi-libre)

=> diamètre de l'ouvrage de captage étroit

66

**En pratique, ces conditions sont rarement satisfaites.**

- Cela n'interdit cependant pas l'application de la plupart des méthodes d'interprétation.
- Certaines méthodes spécifiques permettent d'intégrer ces écarts aux conditions d'application théoriques.

67

## Différentes méthodes d'interprétations en nappe captive

### **Régime permanent en nappe captive:**

Méthode de Thiem – 1906

### **Régime transitoire en nappe captive:**

Méthode de Theis

Méthode de Chow

Méthode de Jacob

Méthode de la remontée de Theis

68

## Différentes méthodes d'interprétations en nappe semi-captive

### Régime permanent en nappe semi-captive:

Méthode de De Glee

Méthode de Hantush et Jacob

Modification de Ernst de la méthode de Thiem

### Régime transitoire en nappe captive:

Méthode de Walton

Méthode 1, 2 et 3 de Hantush

69

## Différentes méthodes d'interprétations en nappe libre

### Régime permanent en nappe libre

Méthode de Thiem-Dupuit

### Régime transitoire en nappe libre avec débit retardé

Méthode de Boulton

70

## Cas particulier: Hypothèses de base non respectées

De nombreuses autres méthodes existent, et permettent d'étudier les cas expérimentaux où les hypothèses de base ne sont pas respectées.

(Voir Tableau récapitulatif joint)

Le traitement des aquifères fissurés et des aquifères karstiques fera l'objet d'un chapitre particulier.

71

Essai de pompage  
en aquifère à perméabilité  
d'interstices

72

## Interprétation: en régime transitoire et nappe captive

- Les méthodes d'interprétation disponibles font appel:
  - Au tracé d'une droite (Jacob, Remontée de Theis)
  - À une superposition d'abaque (Theis)

### Conditions d'application particulières et remarques:

**Jacob:**  $u=(r^2 \cdot S)/(4 \cdot T \cdot t)$  doit être inférieur à 0.01. C'est à dire que r doit être petit ou t grand. En pratique, en nappe captive cette condition est presque toujours atteinte.

**Theis:** Utilisé lorsque t est petit ou que la distance entre le forage et le piézomètre est trop longue. Méthode bi-logarithmique, difficultés d'établissement de concordance pour les courbes bi-log à grand rayon de courbure.

73

## Theis et les formules en régime transitoire

Theis (1935) découvrit que, en pompage, l'influence du prélèvement de l'eau se propage vers l'extérieur avec le temps. Il montra que le volume prélevé est égal à la somme des produits de l'abaissement de la charge hydraulique par le coefficient d'emmagasinement.

L'équation du régime transitoire de Theis s'écrit de la manière suivante:

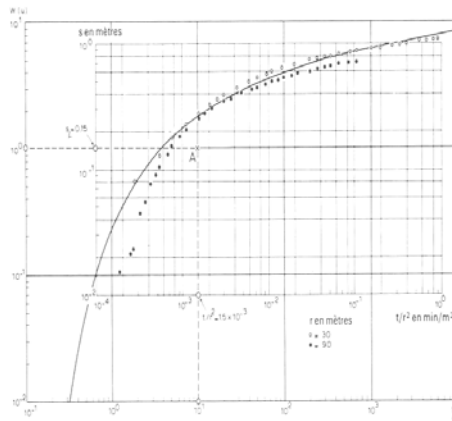
$$s = \frac{Q}{4\pi kD} \int_u^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy = \frac{Q}{4\pi kD} W(u)$$

$$u = \frac{r^2 S}{4kDt} \text{ et, par conséquent, } s = \frac{4kDt u}{r^2}$$

74

## Méthode de THEIS

En pratique, le calcul de T et S consiste à reporter s (rabattement) en fonction de t (temps de pompage) en coordonnées bi logarithmiques et à superposer la courbe obtenue sur la courbe théorique en maintenant les axes de coordonnées parallèles. On superpose généralement la courbe standard de Theis exprimée en 1/u de façon à avoir un sens des abscisses croissant sur les deux courbes.



La coïncidence des deux graphiques permet de faire correspondre à un point quelconque d'un graphique un point de l'autre et l'identification des coordonnées de ce couple de point (s, t) et (W(u),u) permet de calculer T et S par les formules:

$$T = \frac{Q}{4 \cdot \pi \cdot s} \cdot W(u) \quad \text{et} \quad S = \left( \frac{4 \cdot T \cdot t}{r^2} \right) \cdot u$$

avec: T transmissivité en m²/s Q débit de pompage (m³/s) s rabattement (m) au temps t S coefficient d'emmagasinement r rayon du puits ou distance forage-piézomètre.

75

## Le Rayon fictif ou Rayon d'influence (Rf)

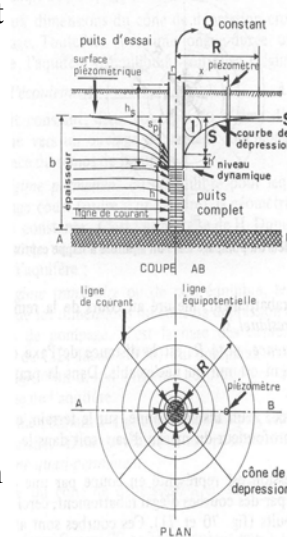
C'est la distance à laquelle le rabattement est considéré comme nul.

Si l'on considère l'expression de Jacob (u < 0.02):

$$s = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{2,25 T t}{x^2 S} = 0$$

$$R_f = 1,5 \sqrt{\frac{T t}{S}}$$

On peut aussi rechercher le rayon fictif en posant s=0.01m et en extrayant de l'équation de l'écoulement adhoc la valeur de rayon fictif.





## Méthode de Jacob

Cette méthode découle de l'équation de Theis. Elle est applicable pour des valeurs de t grande ou de r petite (pour lesquelles une simplification de cette équation est possible).

La valeur  $u=(r^2 \cdot S)/(4 \cdot T \cdot t)$  doit être inférieure à 0,01.

L'équation s'écrit alors:

$$s = \frac{2,30Q}{4\pi kD} \log \frac{2,25kDt}{r^2 S}$$

Il en découle (pour un rabattement nul) que:

$$S = \frac{2,25kDt_0}{r^2} \quad ; \quad kD = \frac{2,30Q}{4\pi \Delta s}$$

Cette méthode peut être appliquée pour chaque piézomètre et permet ainsi d'analyser l'hétérogénéité spatiale de T et S.

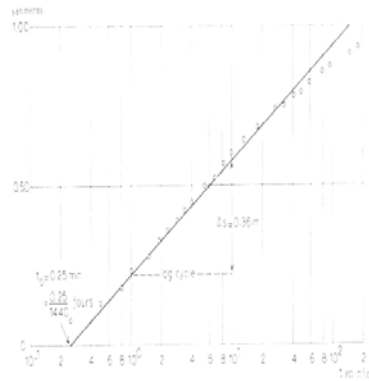
77

## Exemple d'interprétation par la méthode de Jacob

### Mode opératoire:

- On trace la courbe  $s=f(\log(t))$ .
- Passée les premières minutes (effet capacitif possible) on obtient une droite.
- On prolonge cette droite jusqu'à l'axe des abscisses (lire  $t_0$ ).  
Calculer la pente de la droite.
- On calcule T (=kD) et S avec:

$$S = \frac{2,25kDt_0}{r^2} \quad ; \quad kD = \frac{2,30Q}{4\pi \Delta s}$$



Exercices: Calculer T et S, et vérifier la validité de la méthode

On obtient:

$$kD = T = (2,3 \cdot 788) / (4 \cdot 3,14 \cdot 0,36) = 401 \text{ m}^2/\text{jour}$$

$$S = (2,25 \cdot 401 \cdot 0,25) / (30^2 \cdot 1440) = 0,00017$$

$u = 0,00017/t$  donc pour  $t > 0,01$  jour soit 14' la condition  $u < 0,01$  est vérifiée (condition valide)

Remarque: un effet de drainance ou de limite d'alimentation apparaît à  $t > 40'$ .

## Méthode de la remontée de Theis

Une fois le pompage achevé, le niveau de l'eau cesse de descendre pour remonter vers le niveau statique d'origine. Cette remontée permet le calcul de la transmissivité sans perturbation parasite liée au pompage. Les conditions de validité de la méthode de Jacob doivent être valides ( pour  $u=(r^2 \cdot S)/(4 \cdot T \cdot t)$  suffisamment petit) .

$$s'' = \frac{Q}{4\pi kD} \left( \ln \frac{4kDt}{r^2 S} - \ln \frac{4kDt''}{r^2 S''} \right) \quad (16)$$

avec

$s''$  = rabattement résiduel en mètres

$r$  = distance en mètres entre le piézomètre de mesure et le puits de pompage; si l'on prend la mesure dans le puits de pompage,  $r = r_w$ , rayon hydraulique du puits

$S''$  = coefficient d'emmagasinement de la remontée, sans dimension

$S$  = coefficient d'emmagasinement durant le pompage, sans dimension

$t$  = temps en jours depuis le début du pompage

$t''$  = temps en jours depuis l'arrêt du pompage

$Q$  = débit de remontée = débit de pompage en  $m^3$ /jour.

79

## Méthode de la remontée de Theis (2)

Si  $S=S''$  alors:

$$s'' = \frac{2,30Q}{4\pi kD} \log \frac{t}{t''}$$

On trace alors la courbe  $s=f(\log(t/t''))$  afin de déterminer la droite passant par l'ensemble des points (détermination de la transmissivité).

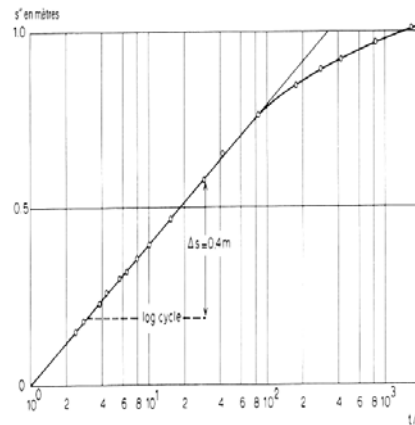
$$kD = \frac{2,30Q}{4\pi \Delta s}$$

80

## Exemple d'interprétation par la méthode de la remontée de Theis

$$kD = \frac{2,30Q}{4\pi\Delta s}$$

- Cette méthode ne permet pas la détermination du coefficient d'emmagasinement S.
- On comparera T descente et T remontée à fin de contrôle de validité.
- Cette méthode est particulièrement intéressante dans le cas où l'on ne possède pas de piézomètre (pas de perturbation liées aux pertes de charge)



81

## Comparatif des méthodes employées en nappe captive et régime transitoire

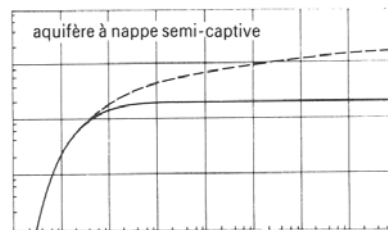
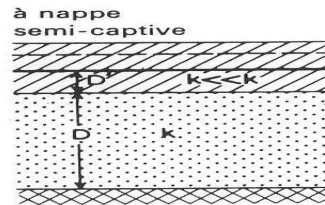
Méthode	Piézomètre utilisé	kD (T) en m <sup>2</sup> /jour	S
Theis	tous	418	1.7 * 10 <sup>-4</sup>
Chow	H30	360	2 * 10 <sup>-4</sup>
Jacob I	H30	401	1.7 * 10 <sup>-4</sup>
Jacob I	H90	480	1.8 * 10 <sup>-4</sup>
Jacob I	H215	960	5.8 * 10 <sup>-4</sup>
Jacob III	tous	438	1.7 * 10 <sup>-4</sup>

On constate sur cet exemple, que la méthode de Jacob I est la moins optimiste (et donc celle à retenir dans le cas d'une modélisation prudente). Le piézomètre H215 laisse supposer l'existence d'une limite de drainance ou d'alimentation.

82

## Interprétation: **Nappe semi-captive**

- En nappe semi-captive, lorsque l'on pompe, l'eau provient de la nappe elle-même, mais aussi de la couche semi-perméable (et de la nappe libre au dessus) qui la surmonte.
- L'effet du pompage fait baisser la charge hydraulique de la nappe, et crée ainsi une différence de charge entre la nappe principale et la couche semi-perméable. L'eau de la nappe de la couche supérieure rejoint alors celle de la nappe principale.



83

- La quantité d'eau mobilisée dans la couche supérieure est proportionnelle à la différence de charge entre l'eau du toit et celle de la nappe principale, et inversement proportionnelle à la résistance hydraulique verticale de la zone saturée de la couche semi-perméable.
- L'hypothèse: « nappe infini et homogène, toit et substratum imperméable » d'utilisation des formules en nappe captive n'est pas respectée.
- La condition: le niveau de la nappe libre doit rester constant (ou du moins le rabattement ne doit pas excéder 5% de l'épaisseur de la zone saturée de la couche semi-perméable, doit être respecté pour l'utilisation des formules en nappe semi-captive.
- Le **régime permanent** est possible grâce à la réalimentation par la couche semi-perméable (drainance proportionnelle au rabattement)

84

### Interprétation

#### Nappe semi-captive à régime transitoire

- Avant d'atteindre le régime d'équilibre, le rabattement croît avec le temps de pompage. Hantush et Jacob ont montré que l'équation du rabattement dans une nappe semi-captive se présente ainsi:

$$s = \frac{Q}{4\pi kD} \int_0^{\infty} \frac{1}{y} \exp\left(-y - \frac{r^2}{4L^2 y}\right) dy$$

ou encore

$$s = \frac{Q}{4\pi kD} W(u, r/L) \quad (27)$$

avec

$$u = \frac{r^2 S}{4kDt} \quad (28)$$

85

### Interprétation

#### Nappe semi-captive à régime Transitoire

Plusieurs méthodes d'interprétation découlent de cette équation:

1. Méthode de Walton: superposition d'abaque à multiples courbes
2. 1ère Méthode de Hantush: tracé de droite et recherche du point d'inflexion, abaque, calcul
3. 2ème Méthode de Hantush: au moins 2 piézomètres, recherche de point d'inflexion, calcul
4. 3ème méthode de Hantush:  $q > 2 r/l$  et  $t > 4 t_p$ , superposition d'abaque (Theis, nappe captive) et calcul

86

## 1ère méthode de Hantush

### Conditions d'application:

1. Nappe semi-captive, écoulement en régime transitoire (l'évolution du rabattement dans le temps n'est pas négligeable)
2. Diamètre de l'ouvrage de pompage faible
3. L'eau emmagasinée est libérée en même temps que la baisse de charge
4. le rabattement du régime permanent doit être connu (approximativement)

Cette méthode a l'avantage de ne nécessiter qu'un seul piézomètre.

87

## 1ère méthode de Hantush

On trace la courbe  $s=f(\log(\text{temps}))$  pour les rabattements relevés sur le piézomètre. On cherche ensuite le point d'inflexion  $p = \frac{1}{2} s_m$ . Les formules suivantes et la table de Hantush permettent le calcul des paramètres.

$$(29) \quad s_p = \frac{1}{2} s_m = \frac{Q}{4\pi kD} K_0 \left( \frac{r}{L} \right)$$

où  $K_0$  est la fonction modifiée de Bessel de seconde espèce et d'ordre zéro.

$$(30) \quad u_p = \frac{r^2 s}{4kD\tau_p} = \frac{r}{2L}$$

(31) La pente de la courbe  $\Delta s_p$  au point d'inflexion est donnée par

$$\Delta s_p = \frac{2,30Q}{4\pi kD} e^{-r/L}$$

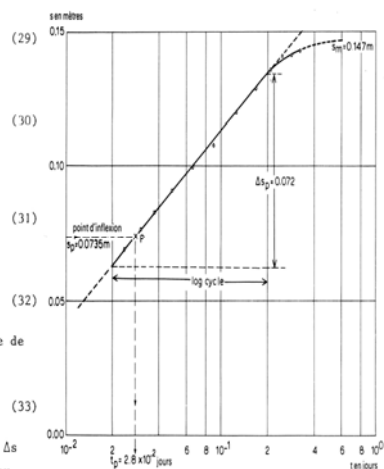
soit

$$(32) \quad r = 2,30L (\log \frac{2,30Q}{4\pi kD} - \log \Delta s_p)$$

(33) Au point d'inflexion, la relation entre le rabattement et la pente de la courbe vaut

$$\frac{s_p}{\Delta s_p} = e^{r/L} K_0(r/L)$$

Dans les équations (29) à (33), l'indice p signifie "au point d'inflexion".  $\Delta s$  signifie la pente de la droite, c'est à dire la différence de rabattement par cycle log de temps.



88



## Contrôle des résultats obtenus par la 1<sup>ère</sup> méthode de Hantush

Le calcul se base sur une estimation de  $s_m$ .

On vérifiera donc la validité de  $s_m$  en portant les résultats obtenus dans les équations suivantes, puis on vérifie la concordance entre la valeur extrapolée et la valeur calculée ( $W(u, r/L)$  d'après abaque de Hantush).

$$s = \frac{Q}{4\pi kD} \int_u^{\infty} \frac{1}{y} \exp\left(-y - \frac{r^2}{4L^2 y}\right) dy$$

ou encore

$$s = \frac{Q}{4\pi kD} W(u, r/L)$$

avec

$$u = \frac{r^2 S}{4kD\tau}$$

91

Table des valeurs de  $W(u, r/L)$  de Hantush

ANNEXE IV. TABLE DES VALEURS DE  $W(u, r/L)$ .  
(Voir Chapitre 3, Section 4; HANTUSH, 1956)<sup>†</sup>

$u$	$r/L$	0	0.005	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0			1.08(1)	9.44	8.06	7.25	6.67	6.23	5.87	5.56	5.29	5.06
1(-6)	1.00(6)	1.32(1)										
2(-6)	5.00(5)	1.25(1)										
4(-6)	2.50(5)	1.18(1)	1.07(1)									
6(-6)	1.66(5)	1.14(1)	1.06(1)									
8(-6)	1.25(5)	1.12(1)	1.05(1)	9.43								
1(-5)	1.00(5)	1.09(1)	1.04(1)	9.42								
2(-5)	5.00(4)	1.02(1)	9.95	9.30								
4(-5)	2.50(4)	9.55	9.40	9.01	8.03							
6(-5)	1.66(4)	9.14	9.04	8.77	7.98	7.24						
8(-5)	1.25(4)	8.86	8.78	8.57	7.91	7.23						
1(-4)	1.00(4)	8.63	8.57	8.40	7.84	7.21						
2(-4)	5.00(3)	7.94	7.91	7.82	7.50	7.07	6.62	6.22	5.86			
4(-4)	2.50(3)	7.25	7.23	7.19	7.01	6.76	6.45	6.14	5.83	5.55		
6(-4)	1.66(3)	6.84	6.83	6.80	6.68	6.50	6.27	6.02	5.77	5.51	5.27	5.05
8(-4)	1.25(3)	6.55		6.52	6.43	6.29	6.11	5.91	5.69	5.46	5.25	5.04
1(-3)	1.00(3)	6.33		6.31	6.23	6.12	5.97	5.80	5.61	5.41	5.21	5.01
2(-3)	5.00(2)	5.64		5.63	5.59	5.53	5.45	5.35	5.24	5.12	4.89	4.85
4(-3)	2.50(2)	4.95		4.94	4.92	4.89	4.85	4.80	4.74	4.67	4.59	4.51
6(-3)	1.66(2)	4.54		4.53	4.51	4.48	4.45	4.40	4.36	4.30	4.24	
8(-3)	1.25(2)	4.26		4.25	4.23	4.21	4.19	4.15	4.12	4.08	4.03	
1(-2)	1.00(2)	4.04		4.03	4.02	4.00	3.98	3.95	3.92	3.89	3.85	
2(-2)	5.00(1)	3.35		3.34	3.34	3.33	3.31	3.30	3.28	3.26		
4(-2)	2.50(1)	2.68					2.67	2.67	2.66	2.65	2.65	2.64
6(-2)	1.66(1)	2.29							2.28	2.28	2.27	2.27
8(-2)	1.25(1)	2.03							2.02	2.01	2.01	2.01
1(-1)	1.00(1)	1.82								1.81	1.81	1.81
2(-1)	5.00(1)	1.22										1.22
4(-1)	2.50(1)	7.02(-1)										7.00(-1)
6(-1)	1.66(1)	4.54(-1)										
8(-1)	1.25(1)	3.11(-1)										

92



## Autres méthodes de Hantush

- **2<sup>ème</sup> méthode de Hantush**: Elle nécessite plusieurs piézomètres (au moins 2).
- **3<sup>ème</sup> méthode de Hantush**: Nécessite plusieurs piézomètres, et on doit satisfaire aux conditions supplémentaires suivantes:  $q > 2 r/L$  et  $t > 4 t_p$ ;
- Nécessite la construction d'une courbe type

93

## Interprétation:

### **Nappe libre**

Les nappes libres sont caractérisées par:

- Tridimensionnalité de l'écoulement au voisinage de l'ouvrage de pompage
- Variation de la transmissivité avec le rabattement
- Retard de désaturation de la couche aquifère

L'eau pompée provient de la réserve par:

- Écoulement gravitaire
- Tassement de l'aquifère
- Expansion de l'eau due à la décompression de la nappe

94

## Méthodes d'interprétation Nappe libre régime transitoire

On tiendra compte de la valeur du rabattement  $s_m$  par rapport à la hauteur initial saturée  $b$  pour choisir la méthode d'interprétation. 3 cas possibles:

1.  $s < 0.1 b$ : on appliquera les méthodes établies pour les nappes captives (la composante verticale de la vitesse au voisinage du captage et la diminution de  $T$  peuvent être négligées ( $S$  =porosité efficace de l'aquifère))
2.  $0.1b < s < 0.3b$ : on corrigera le rabattement par la formule suivantes avant d'appliquer les méthodes établies pour les nappes captives :  $s_c = s_m - (s_m^2/2b)$
3.  $s > 0.3 b$ : méthodes de Berkaloff, ou Boulton qui tiennent compte de la composante verticale de la vitesse et de la diminution de  $T$  (nappe libre à débit retardé)

95

## Méthode de Berkaloff-Boulton Conditions d'utilisation

- Nappe homogène et isotrope, de même épaisseur dans toute la zone influencée par le forage
- Extension latérale infinie
- Substratum imperméable, horizontal
- Puits parfait
- Rayon du puits négligeable
- Débit pompé constant

96

## Méthode de Berkaloff-Boulton

On utilisera la courbe d'un piézomètre proche du captage (pour disposer du 1<sup>er</sup> segment).

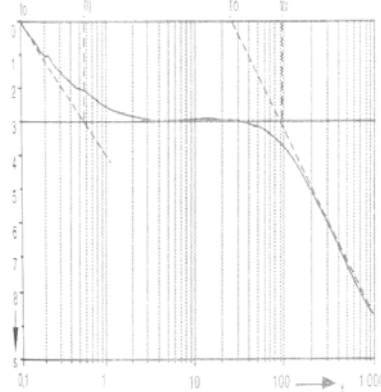
On distingue 3 segments:

1. La nappe libre réagit au départ comme une nappe captive, l'eau est instantanément libérée de l'emmagasinement par le tassement de l'aquifère et par l'expansion de l'eau elle-même. L'écoulement gravitaire n'a pas commencé. L'équation de l'asymptote du début est la suivante:

$$s_1 = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{t}{t_0}$$

2. La pente devient plus faible à cause de la recharge par l'eau gravitaire provenant des interstices situées au dessus du cône de rabattement (égouttement). L'équation est alors:

$$s_2 = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{t_\eta}{t_0}$$



3. Il y a équilibre entre l'apport de l'eau gravitaire et la vitesse de baisse de la surface libre.

$$s_3 = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{t_\eta}{t_0'}$$

97

## Méthode de Berkaloff-Boulton

### Mode opératoire

On reporte le rabattement observé (sur un piézomètre proche) en fonction du temps (t en échelle log).

On a:

$$t_0 = \frac{r^2 S}{2,25 T} \quad ; \quad t_0' = \frac{r^2 S'}{2,25 T} \quad ; \quad t_\eta = \frac{0,561}{\eta \alpha}$$

Tracer la droite du palier horizontal et celles, parallèles, des asymptotes. Déterminer la pente i, t<sub>0</sub>, t<sub>η</sub>, t'<sub>0</sub> et α

Calculer:

$$T = 0.183 Q/i$$

$$S = (2.25 * T * t_0) / r^2 = \text{coefficient d'emmagasinement immédiatement mobilisable}$$

$$S + S' = (2.25 * T * t_0') / r^2 = \text{coefficient d'emmagasinement total}$$

$$S' = (S + S') - S = \text{coefficient d'emmagasinement retardé}$$

$$\alpha = \text{vitesse d'épuisement de la réserve} = 0.561 / t_\eta$$

98

TABLEAU 17. - RECAPITULATION DES METHODES D'INTERPRETATION DU CHAPITRE 4.

**HYPOTHESES DE BASE** (exceptées celles qui leur sont substituées dans la colonne 1): 1. L'aquifère est d'extension latérale apparentement illimitée. 2. L'aquifère est homogène, isotrope et d'épaisseur constante. 3. Avant le pompage, la surface piézométrique et/ou la surface libre sont (presque) à l'horizontale. 4. Le débit de pompage est constant. 5. Le puits est complet. SEULEMENT DANS LE CAS DU RÉGIME TRANSITOIRE: 6. L'emmagasinement de l'eau dans le puits est négligeable. 7. L'eau emmagasinée est libérée au même instant que la base de la charge hydraulique.

HYPOTHESE(S) SUBSTITUEE(S)	AQUIFERE A NAPPE	RÉGIME D'ÉCOULEMENT	METHODE D'INTERPRETATION		REMARQUES	PARAM. CALCUL.	SECT.	REFE
			NOM	TYPE				
1. Aquifère traversé sur toute son épaisseur par au moins une frontière étanche ou d'alimentation	captive ou libre	permanent	Diets	calcul	limites d'alimentation seulement	kD	1.1.1	DIET
			Stallman	superposition	limites étanches et/ou d'alimentation	kD et S	1.2.1	PERK al.,
			Image de Hantush	ligne droite	une seule limite d'alimentation	kD et S	1.2.2	HANT 1959
2. Aquifère homogène, anisotrope et d'épaisseur constante	captive ou libre	transitoire	Hantush	calcul		(kD) <sub>u</sub> , (kD) <sub>s</sub> et S	2.1.1	HANT 1966
			Hantush-Thomas	calcul	aussi pour les données de la remontée	(kD) <sub>u</sub> , (kD) <sub>s</sub> et S	2.1.2	HANT THOM
			Hantush	calcul		(kD) <sub>u</sub> , (kD) <sub>s</sub> , S et $\sigma$	2.2.1	HANT 1966
2. Aquifère homogène et isotrope, mais dont l'épaisseur varie de façon exponentielle	captive	transitoire	Hantush	superposition	$dD/dx < 0,20$	kD <sub>2</sub> et S	3.1.1	HANT 1964
3. Avant le pompage, la surface libre est parallèle au substratum	libre	permanent	point culminant	calcul		kD	4.1.1	com tion
		transitoire	Hantush	superposition	$i < 0,20$	kD et S	4.2.1	HAN 196
4. Débit variable	captive ou libre	transitoire	Cooper-Jacob	ligne droite	pompage par paliers	kD et S	5.1.1	COC JAC
			Aron-Scott	ligne droite	décroissance continue du débit	kD et S	5.2.1	AR SC
			Sternberg	ligne droite	décroissance continue du débit	kD et S	5.2.2	ST 19
			remontée de Sternberg	ligne droite	décroissance continue du débit	kD	5.2.3	ST 19
5. Puits incomplet	captive	permanent	1ère corr. de Huisman	calcul	$r > r_w$	kD	6.1.1	AI 11
			2ème corr. de Huisman	calcul	$r = r_w$	kD	6.1.2	AI 11
			Correction de Jacob	calcul	partie crépinée près du toit ou du mur de la nappe	kD	6.1.3	J
			semi-captive	permanent	1ère et 2ème correction de Huisman	calcul		kD

Différentes méthodes en fonction du type de nappe et du type de régime

## Cas particuliers (pas si particuliers dans la pratique !!!): Méthodes d'interprétation pour des conditions d'application imparfaitement réunies

1. Débit variable en cours de pompage
2. Aquifère limité par au moins une frontière
3. Puits artésien jaillissant
4. Puits de grand diamètre
5. Aquifère anisotrope
6. Aquifère en biseau
7. Aquifère incliné
8. Puits incomplet

## Variations de débit en cours de pompage

En l'absence de variateur, il est fréquent que l'on observe une variation du débit de pompage en cours d'essai (baisse du débit avec l'augmentation du rabattement). Dans le cas où les conditions de base sont respectées, on peut appliquer les méthodes suivantes:

Variations de débit par paliers:

**Méthode de Cooper-Jacob**

Variations continues de débit:

**Méthode Aron-Scott**

101

## Aquifère limité par une limite

Deux types de limite peuvent exister:

1. Limite imperméable
2. Limite d'alimentation

Dans ce cas, l'hypothèse d'extension latérale illimitée de la nappe n'est plus satisfaite.

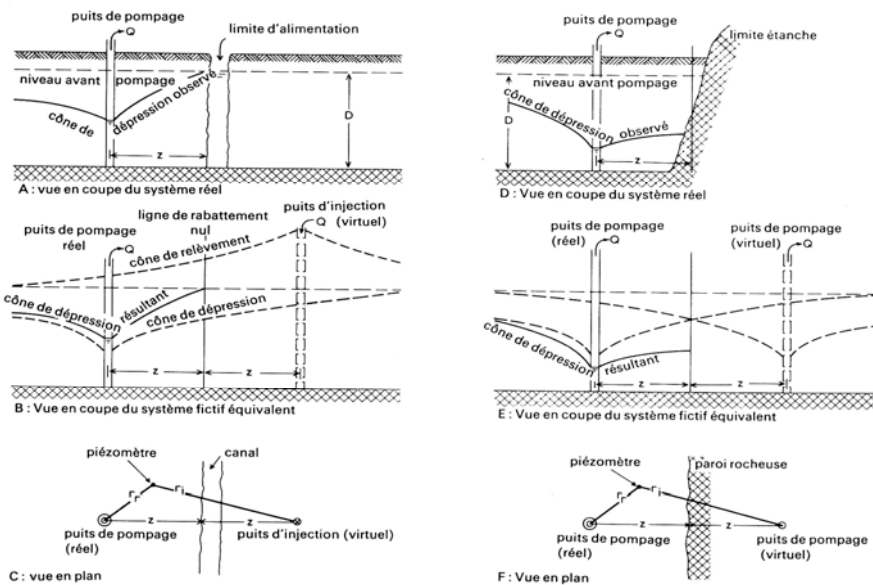
Pour interpréter l'écoulement dans ce type d'aquifère, les auteurs ont utilisé le **Principe de superposition des écoulements**: le rabattement causé par deux ou par plusieurs puits est égal à la somme des rabattements causés par chacun des puits. Un puits image est virtuellement créé. L'hypothèse d'extension latérale illimitée se trouve alors fictivement vérifiée et les équations traditionnelles sont alors applicables.

L'équation du rabattement en nappe captive est alors:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \text{Log} \left[ \frac{2,25 Tt}{Sr^2} + \text{Log} \frac{2,25 Tt}{Sr'^2} \right]$$

102

## Différents types de limites



103

## Méthodes d'étude de la distance à la limite

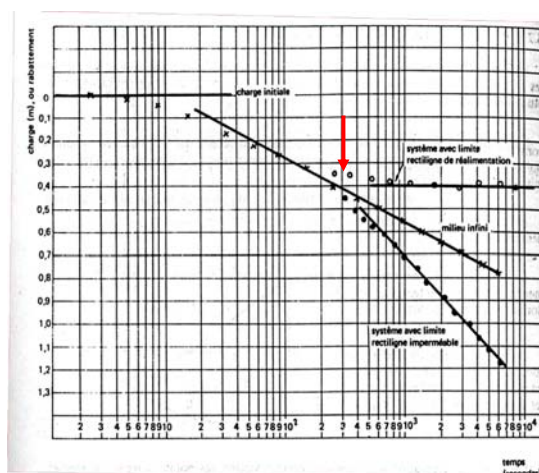
Le point d'intersection **I**, correspond au point où l'influence du pompage (ou de l'injection fictive) est nulle.

$$\text{Log} \frac{2,25 T t_I}{S r'^2} = 0$$

soit :

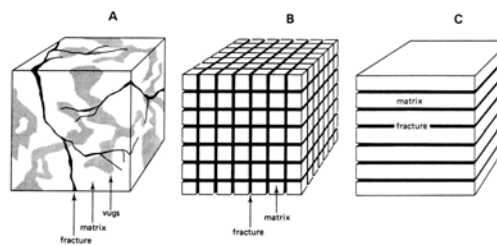
$$r' = \sqrt{\frac{2,25 \cdot T \cdot t_I}{S}}$$

r' = distance à la limite



Si l'on dispose de plusieurs piézomètres, on peut préciser la position exacte par une petite construction géométrique simple. 104

## Essai de pompage en aquifère fissuré



105

## Types de représentation des milieux fissurés

L'interprétation des essais de pompage peut être abordée à partir de trois types de représentation du milieu fissuré:

- Milieu à double porosité
- Milieu poreux homogène et anisotrope
- Milieu anisotrope affecté d'une fracture unique (horizontale ou verticale)

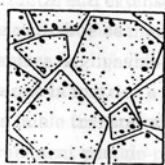
106

## Milieu fissuré à double porosité

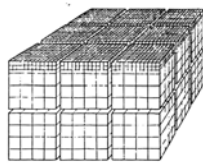
Hypothèse de base: Une roche poreuse affectée d'importantes fractures peut être représentée par la superposition de deux milieux poreux avec des pores de tailles différentes. Le milieu est constitué de blocs de dimensions irrégulières séparés par des fissures. Chacun de ces deux éléments a une porosité et une perméabilité propre, et une continuité existe entre eux.

En cours de pompage, un rééquilibrage de la pression différentielle s'effectue entre les fractures et les blocs, se traduisant par un transfert de fluide des blocs vers les fissures.

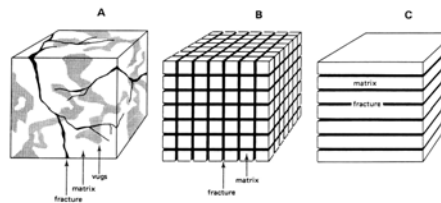
Barenblatt



Drogue



Warren-Root



## Méthode de Warren Root

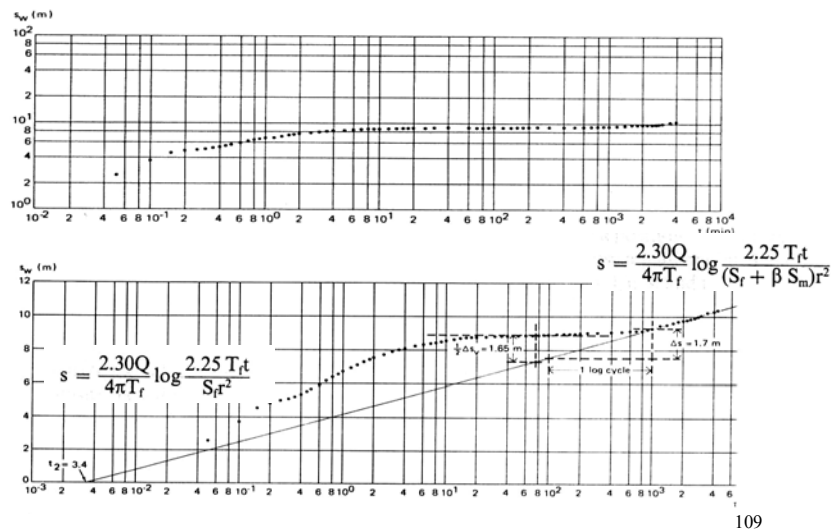
### Conditions d'application

1. Nappe captive d'extension latérale infinie
2. L'épaisseur de l'aquifère est uniforme dans la zone influencée par le pompage
3. Le forage traverse entièrement la zone fracturée
4. Le débit de pompage est constant
5. Avant pompage, la surface piézométrique est horizontale sur la zone d'influence du pompage

Cette méthode utilise les données recueillies au puits de pompage



## Exemple de courbe semi log de rabattement en aquifère fissuré à double porosité



109

## Méthode de Warren Root

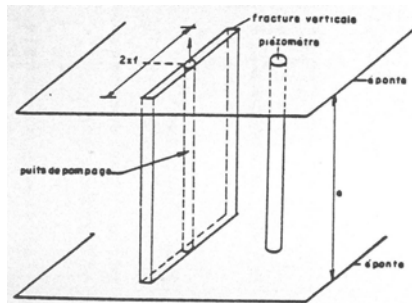
D'après ces auteurs, un système aquifère à double porosité est caractérisé par les facteurs suivants:

- Transmissivité effective  $T$
- Coefficient d'emmagasinement de la matrice  $S_m$
- Coefficient d'emmagasinement équivalent moyen des fractures  $S_f$
- Paramètre d'écoulement inter-porosité  $\lambda$  (sans dimension, permettant de vérifier la validité des équations de la partie finale de la courbe de rabattement)

110

## Milieu anisotrope affecté d'une fracture unique verticale

Gringarten considère que le puits est situé au milieu d'une fissure verticale de faible épaisseur par rapport à sa longueur et à sa distance au piézomètre. Il admet par ailleurs que la section horizontale de la fissure est petite et ne provoque pas d'effet de capacité notable. Les hypothèses d'application de la méthodes de Theis sont vérifiées.



111

## Méthode de Gringarten

### Évolution des transferts d'eau en cours de pompage

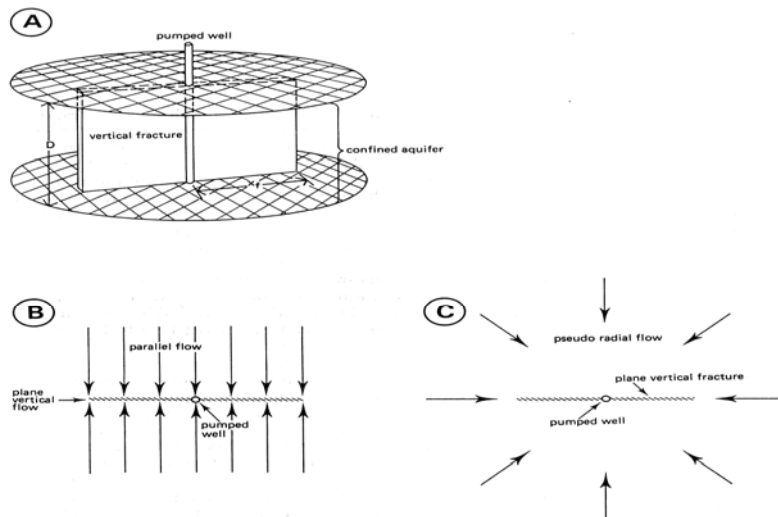
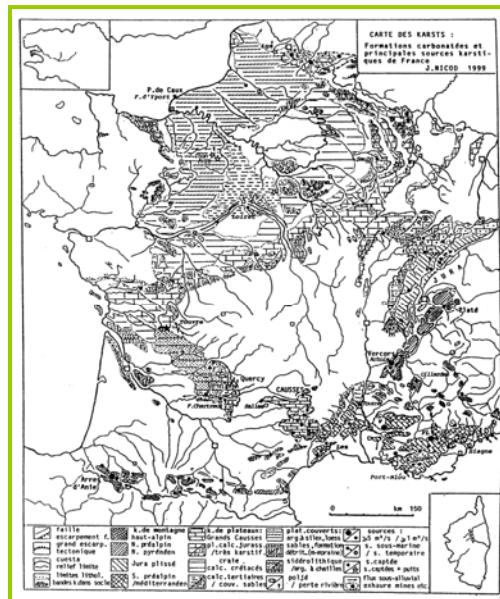


Figure 18.1 A well that intersects a single, vertical, plane fracture of finite length and infinite hydraulic conductivity  
 A: The well-fracture-aquifer system  
 B: The parallel flow system at early pumping times  
 C: The pseudo-radial flow system at late pumping times



## Essai de pompage en aquifère karstique

113

### Objectif des essais de pompage en aquifère karstique

1. Évaluation de l'aptitude du système karstique à fournir un débit d'exploitation (AEP, Soutien d'étéage)
2. Caractériser la vulnérabilité du système karstique (Périmètre de protection de captage AEP)
3. Evaluer la capacité évolutive de l'aquifère

→ Pour cela, il faut comprendre le fonctionnement du système karstique → => **approche globale**

114

## Questions de base à ce poser

1. Le système possède-t-il un fonctionnement karstique ? Existe-t-il une structure de drainage karstique fonctionnelle ?
2. Quelle est l'extension du système ?
3. Le système possède-t-il des réserves dans sa zone noyée ? Quelle est leur importance ? Quelle est leur qualité ?
4. Ces réserves autorisent-elles une surexploitation temporaire ?
5. Existe-t-il des conduits anciens, habituellement sans circulation, susceptible d'être réactivés lors de phénomènes exceptionnels (crue) ou nouveaux (pompage, mise en charge, etc ...)?
6. Peut-on démontrer l'exploitabilité de l'aquifère ?
7. Quels sont le dispositif de captage et sa localisation les plus appropriés compte tenue des caractéristiques de l'aquifère ?
8. Quel est l'impact de l'exploitation sur les autres ressources et sur les autres milieux ?
9. Quels scénarios peuvent être proposés pour protéger la ressource en eau souterraine ? Comment définir les périmètres de protection ?

115

### L'aquifère karstique: Organisation des écoulements souterrains

**Drainage** (réseau de conduits hiérarchisés)

**Stockage** (parties micro-fissurées ou poreuses de la roche non karstifiée, cavités karstiques connectées au drainage par des zones à fortes pertes de charges (Systèmes Annexes au Drainage) => compartimentage hydraulique responsable de très fortes hétérogénéités

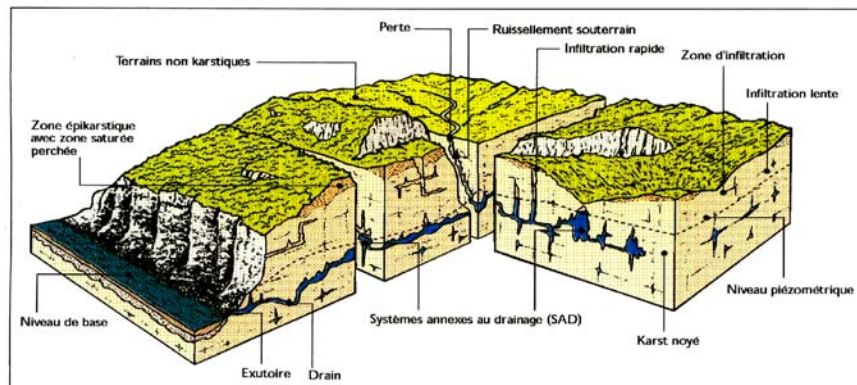


Figure 4 - L'aquifère karstique (d'après Mangin, 1975)

### Principales caractéristiques des karsts

Le phénomène de karstification est à l'origine du karst. Deux propriétés fondamentales découlent de ce processus d'érosion physico-chimique:

- *Le degré d'évolution de l'aquifère*: la karstification correspond à une évolution au cours de laquelle certains vides du milieu fissuré originel s'élargissent alors que d'autres se colmatent, aboutissant à la création de structures de drainage organisées et isolées du milieu fissural originel.
- *La fonctionnalité de l'aquifère*: le comportement karstique des écoulements résulte de la conjonction d'une structure organisée et d'un fort potentiel hydraulique au limite du système. Si l'un de ces éléments manque, le système n'est plus fonctionnel.

117

### Trois grands types d'aquifères karstiques

En fonction du degré d'évolution du karst, on peut distinguer 3 grands types d'aquifère karstique:

1. Aquifères carbonatés, fissurés et karstifiés
2. Systèmes karstiques au sens strict
3. Systèmes karstiques contrôlés aux limites

118

## Aquifères carbonatés fissurés et karstifiés

Ce sont les systèmes en cours d'évolution, dont l'organisation n'est pas encore perceptible et qui peuvent être assimilés à des aquifères fissurés.

Dans cette catégorie se placent les aquifères où la karstification est localisée et ne produit pas d'isolement du réseau fissural originel (craie).

Les méthodes d'interprétation en milieu fissuré ainsi que la méthode de Theis sont utilisables car il n'y a pas d'organisation des écoulements

119

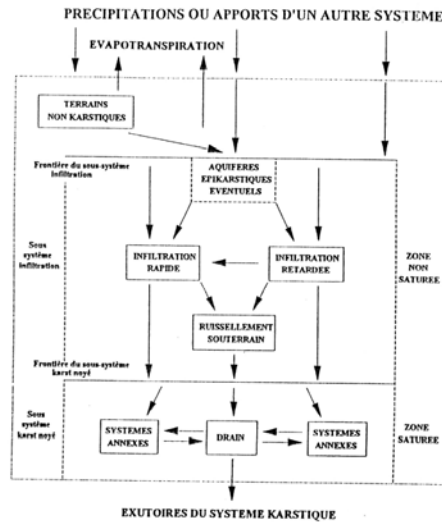
## Aquifères karstiques au sens strict

Il s'agit des systèmes karstiques fonctionnels dans lesquels vides et écoulements sont organisés. Les caractéristiques principales sont les suivantes:

- Existence de 2 types de vides: axe de drainage ou drain; Systèmes Annexes au Drainage (SAD)
- Dissociation des fonctions capacitives (stockage dans les SAD) et transmissives (relation au sein du karst noyé par le drain)
- Hétérogénéité et discontinuité de la zone noyée
- Existence de forts contrastes de vitesse
- Pertes de charge singulières entraînant des phénomènes d'inertie
- Comportement conditionné par l'état du système et les caractéristiques de la fonction d'entrée confèrent au système un caractère non linéaire et non stationnaire

120

## Schématisation de l'aquifère karstique



Aquifère superficiel retardateur des infiltrations possibles (épikarst)

Zone à forte hétérogénéité structurale et vitesse de circulation variable

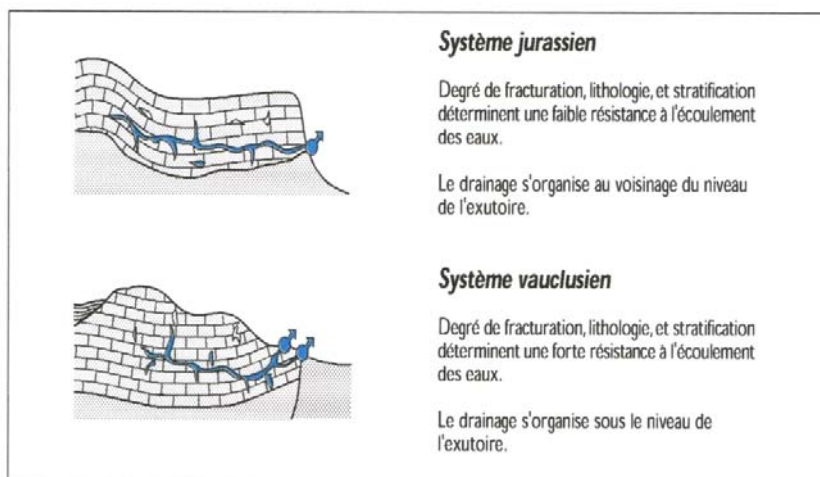
Développement préférentiel à l'aval du système

Vides organisés autour d'axe de drainage  
Autour de ces drains, un ensemble de vides organisés en ensembles indépendants à écoulement lent (SAD)

Fig. 5 : Schématisation de l'aquifère karstiques (d'après MANGIN, 1975)

121

## Système Jurassien / Vaclusien



### Système jurassien

Degré de fracturation, lithologie, et stratification déterminent une faible résistance à l'écoulement des eaux.

Le drainage s'organise au voisinage du niveau de l'exutoire.

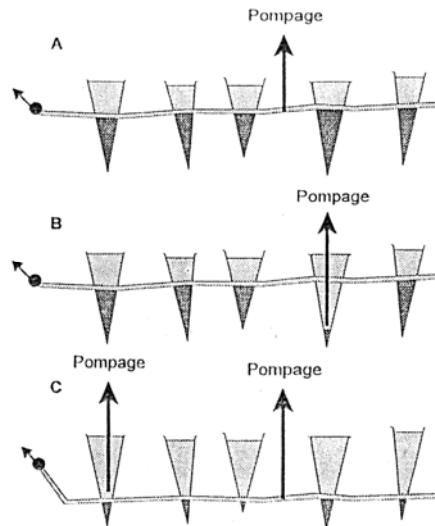
### Système vaclusien

Degré de fracturation, lithologie, et stratification déterminent une forte résistance à l'écoulement des eaux.

Le drainage s'organise sous le niveau de l'exutoire.

122

## Influence de la position du forage dans le système karstique



A - La mobilisation des ressources profondes n'est pas possible

B - L'exploitation d'un SAD permet la mobilisation des ressources profondes (risque de tarissement de l'exutoire)

C - La mobilisation de l'ensemble des réserves situées en dessus du drain est possible

123

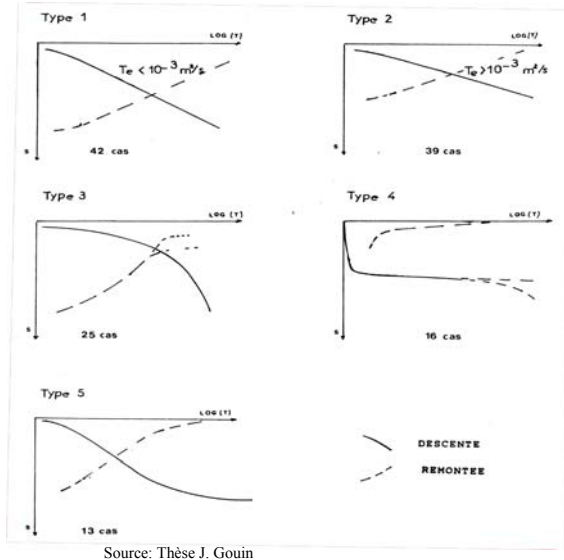
## Essai de pompage en aquifère karstique

1. En raison de l'existence de drains dans la zone noyée et des divers spécificités du karst, l'utilisation des méthodes classiques n'est pas parfaitement adaptée mais permet néanmoins une approche globale du problème.
2. Le but de l'essai de pompage ne sera pas de caractériser la structure du milieu mais de décrire les réponses obtenues au point de pompage et si possible à l'exutoire. Il devra viser à déterminer la position du forage dans le système et de l'axe de drainage par rapport aux réserves. On cherchera à déterminer les paramètres pouvant limiter l'exploitation.
3. L'essai de pompage devra être de longue durée et l'ensemble des points d'observation du système seront suivis.

124



## 5 familles de courbe de rabattement en milieu karstique



Type 1 et 2: Pompage dans un SAD; Équivalent à un milieu poreux

Type 3: Plusieurs interprétations possibles: épuisement d'une réserve mal réalimentée, pompage en cavité ( $Q_{\text{exploit}} > Q_{\text{réalimentation}}$ )

Type 4: Pompage dans une cavité provoquant une stabilisation immédiate ( $Q_{\text{exploit}} \leq Q_{\text{réalimentation}}$ )

Type 5: Stabilisation pouvant provenir d'une drainance

### **Le karst: un milieu hétérogène**

125

## Recommandations pour la réalisation d'essai de pompage en aquifère karstique

1. Réaliser des pompages de très longue durée pour s'affranchir de l'apparition de phénomènes non prévus par le modèle
2. Prendre en compte des marges d'erreur plus élevées lors des simulations d'exploitation (en introduisant un effet limite étanche pour maximiser les rabattements par exemple)
3. Mettre en exploitation progressivement et sous surveillance (période de validation)

126

## Le rapport d'essai de pompage

127

### Rapport d'essai de pompage

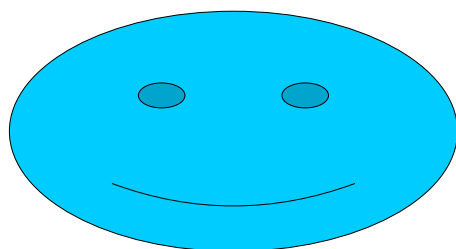
#### Il doit contenir au minimum:

1. Carte de localisation du forage d'essai et des ouvrages voisins,
2. Carte géologique avec localisation des ouvrages et des limites imperméable ou d'alimentation
3. Coupe lithologique et technique du forage d'essai et des piézomètres
4. Tableau des données brutes (s, Q) avec date et conditions de l'essai
5. Éventuellement limnigramme illustrant les corrections appliquées sur les données
6. Courbes et interprétations des pompages d'essai par palier (essai de puits), Commentaires
7. Courbes des essais de nappe (représentation linéaire, bi-logarithmique, et adaptée à la méthode d'interprétation)
8. Commentaire sur le raisonnement suivi pour choisir la méthode d'interprétation
9. Calculs abrégés et résultats obtenus, discussion sur le degré de confiance (concordance courbe théorique, courbe mesurée)
10. Éventuellement modélisation d'exploitation
11. Recommandation pour l'exploitation ou pour des recherches futures

128

**That's all PUMP !**

Bon essai de pompage à tous et à bientôt !



129