



Journée Scientifique et Technique du CFMS

12 MAI 2022

Restitution du groupe de travail « Rabattement de nappe »

Quelles mesures pour quels objectifs?

Julien Kirmaier - ARCADIS

Introduction:

Besoins en reconnaissances hydrogéologiques

➤ Besoins

- *Contexte hydrogéologique et son fonctionnement (interactions entre aquifères)*
- *Niveaux d'eau pour les dimensionnements*
- *Paramètres hydrodynamiques des aquifères touchés par le projet*

➤ Sommaire

- *Enjeux pour les donneurs d'ordre publics et privés*
- *Besoins principaux pour un projet à composante souterraine*
- *Grandeurs mesurables et appareillages utilisés*
 - *Incertitudes et dérives associées aux méthodes*
 - *Incertitudes et dérives associées aux ouvrages*
- *Types d'essais disponibles*
- *Essais en sondages*
- *Essais sur ouvrages pérennes*

Introduction:

Documents sur les reconnaissances hydrogéologiques

Document normatifs

- *P94-500: contenu et enchaînement des campagnes G1, G2...*
- *Normes relatives*
 - *aux mesures piézométriques (niveau, qualité) et aux essais hydrogéologiques (22282-x)*
 - *à la création (et à l'abandon) de puits et piézomètres (X10-999)*

« Guides de bonnes pratiques » et « Recommandations »

- *AFTES GT24R3F1: « Reconnaissances géologiques, hydrogéologiques et géotechniques nécessaires à la conception des ouvrages souterrains »*
 - Annexe 7 « Mesures et essais hydrogéologiques in-situ »*

Enjeux pour les donneurs d'ordre publics et privés (1/2)

➤ Temps, maîtrise foncière

- *Planning de reconnaissances serrés dans le cadre des projets d'infrastructures*
- *Contraintes:*
 - *réglementaires: DLE pour piézomètres,*
 - *locales: arrêtés de voirie en milieu urbain, maîtrise foncière pour sondages...*

➤ Coûts

- *Optimisation des interventions sur site parfois en « surchargeant » les opérations*
ex: piézomètre posé dans sondage pressiométrique ou doublet de piézomètres dans un seul sondage
- *Choix de prestataires (souvent sur critères financiers)*

➤ Méthodes fiables pour définir les paramètres pour les dimensionnements ?

Enjeux pour les donneurs d'ordre publics et privés (2/2)

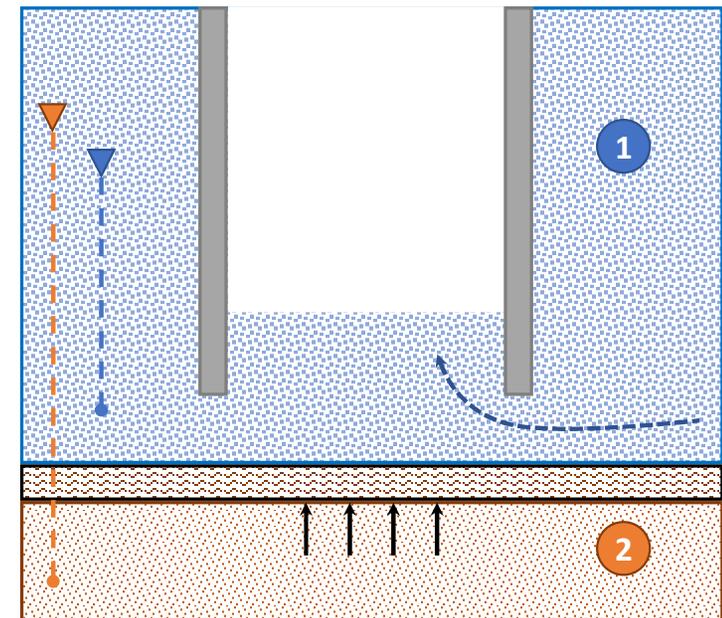
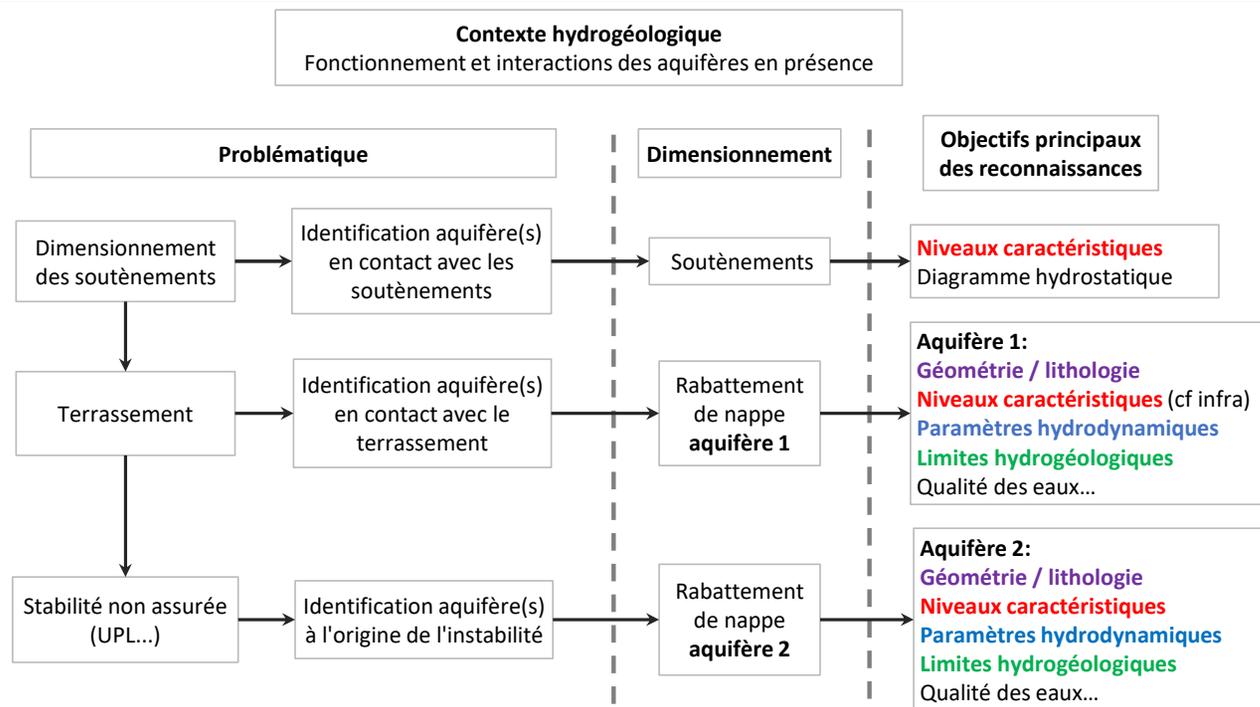
➤ Objectifs identiques à ceux des essais mécaniques

- *Maîtrise du volume et du planning des reconnaissances*
- *Caractérisation de toute la zone d'influence hydrogéologique des travaux et des ouvrages projetés*
- *Exigence de qualité des résultats obtenus (reconnaisances in-situ et laboratoire)*
- *Pérennité des points de mesures dans le temps (piézomètres, CPI...)*
- *Traçabilité des investigations (reconnaisances in-situ et laboratoire)*
- *Facilité d'utilisation lors des phases ultérieures (enchaînement des missions)*

➤ Programme de reconnaissance: compromis entre:

- *les objectifs à atteindre pour le dimensionnement,*
- *les coûts,*
- *les contraintes (réglementaire, site),*
- *les délais de réalisation.*

Besoins principaux pour un projet à composante souterraine



Problématiques valables à la fois en travaux et en exploitation, que le soutènement soit étanche ou non

Grandeurs mesurables et appareillages utilisés

➤ Potentiels / longueurs

- *niveaux piézométriques / limnimétriques: profondeurs, hauteurs...*
- *potentiels électriques: CPI, micro-moulinet...*
- *paramètres physico-chimiques (conductivité, pH, O₂...),*

➤ Flux (mesure directe)

- *débites :*
 - *débites-mètres à impulsion, courantomètres...*
 - *hélices (moulinet, compteur volumétrique...)*
 - *mesure de hauteur d'eau via une courbe de tarage (ex : seuil étalonné, canal ouvert, venturi...)*
- *courants électriques (ex: ampérage pour certains types de CPI)*

➤ Temps

➤ Incertitudes:

- **Matériel:**
précision, adéquation du matériel, étalonnage, entretien des appareils
- **Humain:**
aléatoire

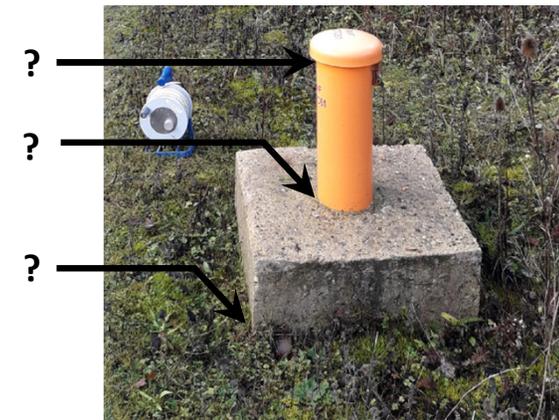
Grandeurs mesurables et appareillages utilisés

Incertitudes et dérives associées aux méthodes: potentiel

➤ Mesures de potentiel: ex piézométrie

- **Point de référence**
 - *nivellement absolu, relatif...*
- **Mesures manuelles: précision +/- 1cm**
 - *mesure manuelle à la sonde lumineuse,*
 - *lecture sur échelle graduée (puits anciens)*
- **Mesure automatiques : CPI, capteurs/enregistreurs de pression**
 - *Étalonnage avant la pose (CPI)*
 - *Gamme de fonctionnement (dénoyage / saturation)*
 - *Baromètre (pour capteurs de pression absolue non compensés)*
 - *Précision : pourcentage de la gamme de mesure (usine)*
 - *facteurs secondaires: effet température air/eau sur extension des suspenseurs par ex.*

Référence du nivellement ?



➤ Problématiques identiques avec les mesures de qualité...

Grandeurs mesurables et appareillages utilisés

Incertitudes et dérives associées aux ouvrages

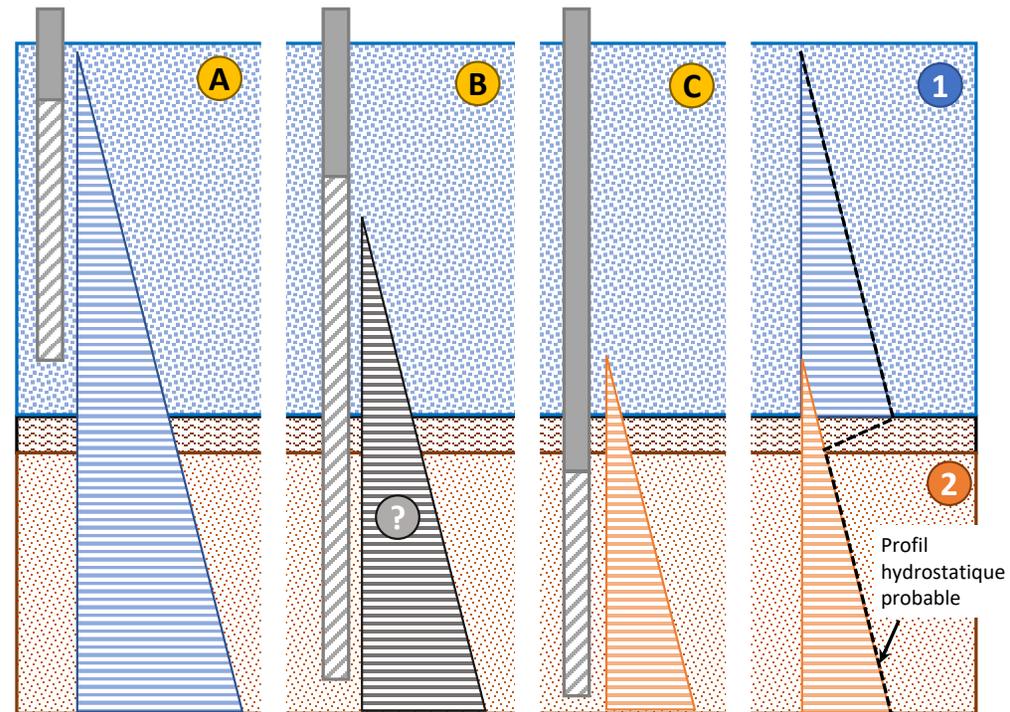
Exemple sur formation stratifiée (MMG)

- Réseau existant + nouveaux piézomètres
- Deux horizons (1 & 2) du même « aquifère » séparés par des marnes raides (3-4m)

- ⇒ Compartimentation non détectée précédemment
- ⇒ Piézomètres B longs pour éviter qu'ils ne soient secs
- ⇒ Niveau B intermédiaire entre les niveaux A et C
- ⇒ **La mesure perturbe le phénomène**

- **Mesures correctives: destruction du piézomètre B**

- ⇒ Destruction du tubage PVC (surforage)
- ⇒ Injection de coulis par le fond sous pression avec contrôle de résurgence



Grandeurs mesurables et appareillages utilisés

Incertitudes et dérives associées aux ouvrages

➤ Ouvrages de suivi (puits, piézomètres)

- **Réseau existant (phases précédentes...)**

- ⇒ Collecte coupes techniques (rapports)

- ⇒ Nivellement et référence des mesures pour les mesures antérieures

- ⇒ Audit des ouvrages: étanchéité, nettoyage, essais de récupération / pompages

Objectif: Représentativité des mesures (espace et temps)

- **Nouveaux points de mesures**

- ⇒ Respect des normes (X10-999): méthodes, **diamètres...**

- ⇒ Relève des niveaux d'eau le matin à la prise de poste lors de la foration (cas aquifères superposés)

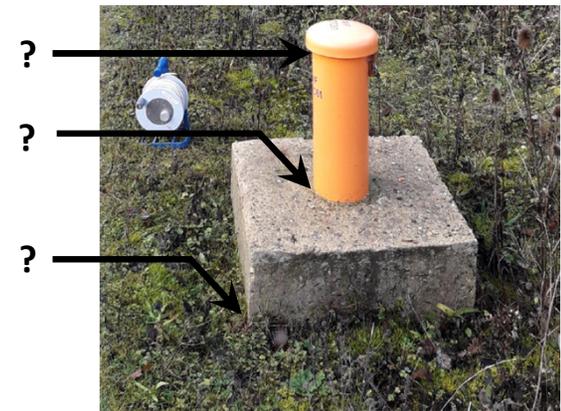
- ⇒ Foration à l'eau claire si possible, éviter l'équipement de sondages pressiométriques

- ⇒ Équipement piézométrique défini d'après la lithologie locale (carotté ou destructif proche d'un carotté)

- ⇒ Développement avant mise en service - Première estimation de productivité

- ⇒ Système de numérotation **unique** pour tous les ouvrages

Référence des mesures antérieures?



Types d'essais de perméabilité disponibles

Perméabilité: mesures simultanées de niveau et de débit

| Type d'essai | Protocole | Résultats |
|------------------------------|---|--|
| Pompages d'essais | Pompage/injection à débit constant (ISO 22282-4) | Perméabilité horizontale « en grand » Coefficient d'emmagasinement Identification des limites hydrogéologiques (nature, position) <i>Perméabilité verticale si instrumentation spécifique (drainance)</i> => rabattement de nappe |
| Essais en sondage | Pompage/injection à débit constant (ISO 22282-2, ancien « Lefranc » P94-132) | Perméabilité horizontale locale (1m de rayon?) Formation peu perméable à perméable => Rabattement de nappe et/ou drainage |
| | Récupération (vidange/remplissage) (ISO 22282-2, ancien X30-423), Slug tests (ISO 22282-2) | Perméabilité horizontale locale (0.5 à 1m de rayon?) Formation peu perméable (aquitard), passées locales (argiles sableuses) ou massif +/- rocheux pour une excavation en méthode traditionnelle (ex: rameau...); contrôle qualité d'injections/jet grouting => drainage |
| | Injection sous pression (ISO 22282-3, ancien « Lugeon ») | |
| Essais en laboratoire | Œdomètre, perméamètre... | Perméabilité très locale (quelques cm), généralement verticale => Peu utiles pour le dimensionnement d'un pompage/drainage |

Grandeurs mesurables et appareillages utilisés

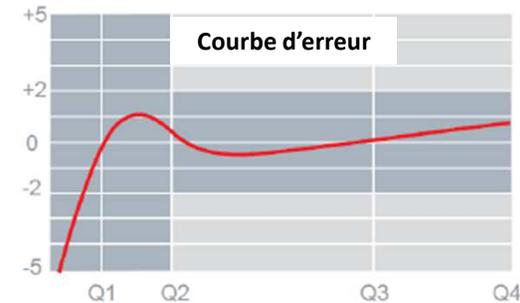
Incertitudes et dérives associées aux méthodes: débits

Mesures de débit

- *Seuil / venturi / canal ouvert*
 - *Installation / tarage + incertitudes liées au matériel*
 - *mesures de hauteur*
- *Chronométrage du remplissage d'un récipient gradué*
- *Débitmètre ou chronomètre + compteur*
 - *Choix selon la gamme de fonctionnement et le débit attendu*
 - *Respect des consignes de montage*
 - *Seuil de déclenchement et précision associée*
 - *Automatisation de l'acquisition possible (échantillonnage)*



* : Dans les positions verticales, le compteur est moins précis et il est impératif que la tuyauterie soit constamment en eau.



| Calibre | A | B |
|--------------------------------|------|------|
| Q1 (débit mini) [L/h] | 50 | 80 |
| Q2 (débit de transition) [L/h] | 80 | 128 |
| Q3 (débit nominal) [L/h] | 2500 | 4000 |
| Q4 (débit maxi) [L/h] | 3100 | 5000 |

Mesures de flux plus incertaines que les mesures de potentiel

- ⇒ *Faire varier le débit le moins possible, le maintenir constant*
- ⇒ *mesurer les variations de potentiel/niveau*

Essais en sondage: exemples d'incertitudes sur les débits

Ex 1: Variation volontaire du débit

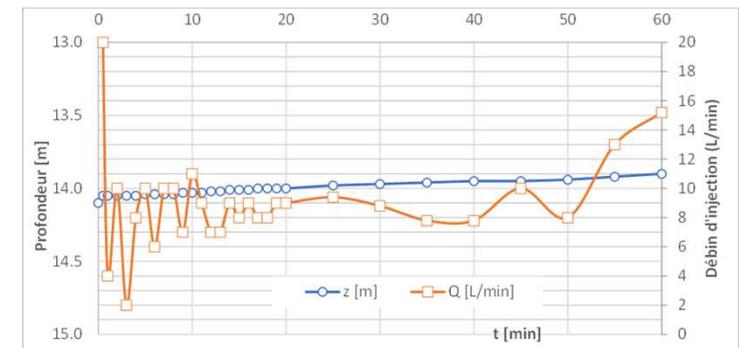
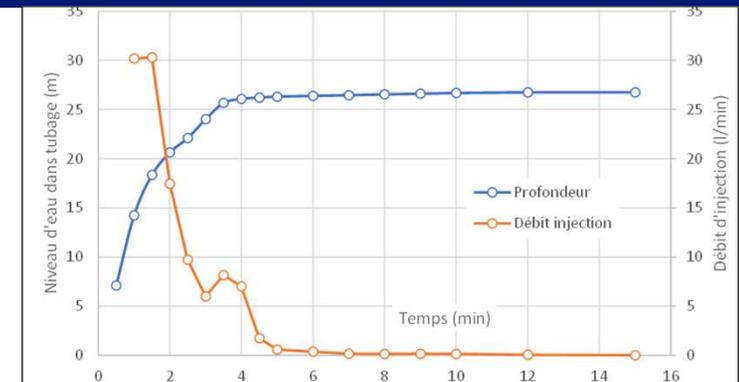
- *Protocole d'essai à niveau constant: l'opérateur règle le débit jusqu'à obtenir une stabilisation.*
 $0.02 < Q < 30 \text{ L/min}$

Ex 2: Variation involontaire du débit

- *Protocole d'essais à débit constant bien respecté*
- *Réglage de l'injection inchangé pendant l'essai*
- *Prise d'eau au poteau incendie, mesures compteur + chrono*
 $2 < Q < 10 \text{ L/min}$

⇒ *Difficulté (voir impossibilité) d'interprétation*

⇒ *Incertitudes sur les résultats*



Essais en sondage: exemples d'incertitudes sur les débits

➤ Choisir un protocole de mesure adapté de façon à réduire les incertitudes

- *Proscrire les essais à niveau constant, imposer un protocole à débit constant fixé au départ,*
- *Préférer un essai en pompage plutôt qu'en injection*
 - ⇒ *Avantage: réduit les risques de colmatage*
 - ⇒ *Inconvénients: matériel supplémentaire pour équipes (pompe, câble + flexible, source énergie...)*
- *Utiliser un dispositif de régulation des débits pour maintenir un débit constant*
- *Réduire les erreurs systématique (C^{ste}) sur le temps et la profondeur ou le volume*

➤ Apprécier la sensibilité des résultats aux erreurs sur les mesures

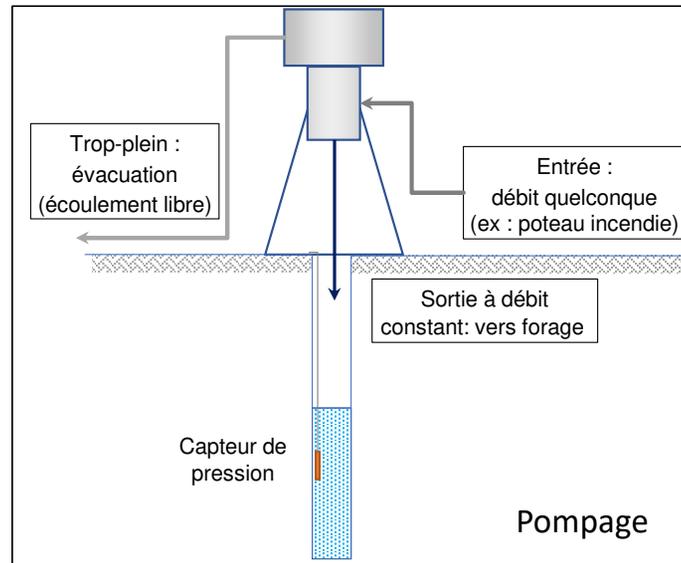
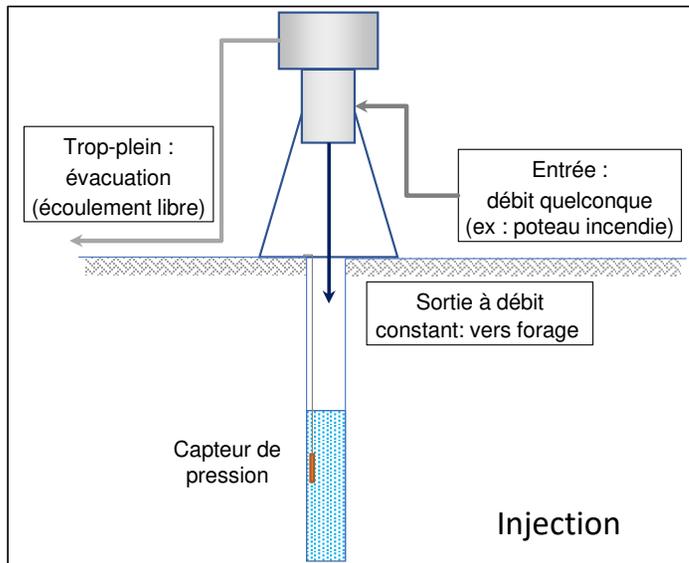
- *Savoir estimer les conséquences d'une erreur sur le résultat final (par excès, par défaut?)*

➤ Prendre en compte le facteur humain

- *Personnel soigneux et formé!*
- *Préparation des essais / mesures en amont (fiche méthode ...)*

Dispositifs de régulation des débits: réduction de la variabilité des débits des essais

➤ Faibles débits ($Q \alpha 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$) : dispositif à débordement Cf M. Cassan « Essais de perméabilité dans la reconnaissance des sols »



Pour essais en sondages, utilisable à la fois en injection et en pompage

Dispositif de régulation des débits: réduction de la variabilité des débits des essais

- **Dissocie l'obtention d'un débit constant de sa mesure**
 - Le débit peut être mesuré avant/après l'essai (ex: récipient gradué + chrono)
- **Consignes:**
 - Débordement du « réservoir » interne en permanence (charge constante sur sortie)
 - Réglage du dispositif inchangé au cours des essais (détermination préalable du débit d'essai),
 - L'injection dans le sondage doit être libre (pas de flexible qui plonge sous le niveau)

➤ Débits plus importants ($Q \alpha 10 \text{ m}^3/\text{h}$) : automate de régulation

- **Pompages d'essais par exemple**
- **Matériel spécifique: débitmètre électronique, coffret de commande, pompe à alimentation variable**
- **Asservissement de la pompe au débitmètre (variateur) sur la valeur de débit de consigne**
- **Utilisable également avec consigne de niveau pour rabattement de nappe**

Essais dans des ouvrages pérennes

Exploiter l'existant

Types de mesures envisageables

- *Suivi piézométrique*
- *Pompages d'essais*
- *Slug-tests*
- *Diagraphies: micro-moulinet, gamma-ray...*

Sources d'informations

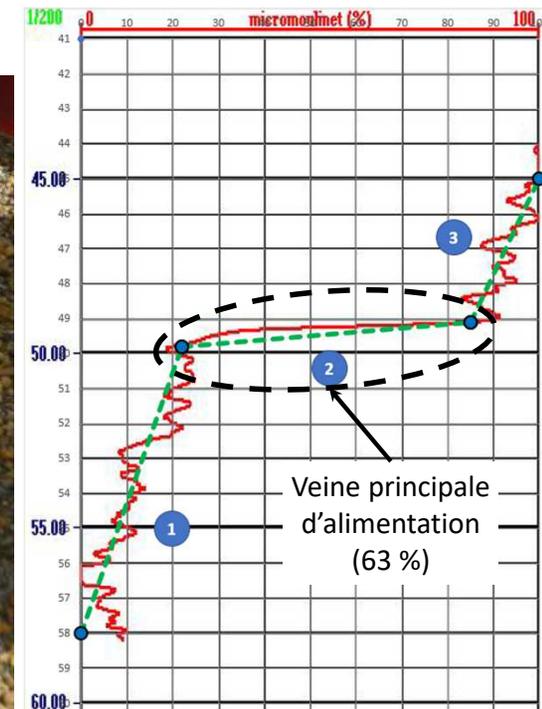
- *Rapports de sondage et audit des ouvrages (si antérieurs)*
- *Rapports journaliers*
 - *Lithologie (cf coupe)*
 - *Niveaux au cours de la foration (pris le matin à la prise de poste)*
 - *Arrivées d'eau, pertes...*
 - *Estimation de la productivité lors du développement ou de la réception des puits / piézomètres*

Essais dans des ouvrages pérennes

Exemple 1: Diagraphie au micro-moulinet - Principe

► Courbe de cumuls de vitesse dans la zone de crépine

- Hélice étalonnée (vitesse de rotation \propto flux) à axe vertical
- Enregistrement de la vitesse de rotation selon la profondeur
=> vitesse verticale de l'eau dans le tubage (cumul)
- Au repos: circulations naturelles
- En pompage:
 - Identification des arrivées d'eau et de leurs contributions
 - Esquisse de zonation de perméabilité
- Utilisation
 - Équipement des puits (crépine / tube plein)
 - Dimensionnement des fiches hydrauliques des soutènements étanches (coupure)
 - Identification des arrivées d'eau en excavation traditionnelle?



Essais dans des ouvrages pérennes

Exemple 1: Diagraphie au micro-moulinet

Diagraphie au micro-moulinet sur deux piézomètres captant une formation stratifiée

Sur site:

- Le pompage au débit minimal vidange le piézomètre
- La diagraphie au micro-moulinet est requalifiée in-situ en « essai à charge variable »

Analyse

- Fiche produit du μ -moulinet: 
 - V_{min} : 2 cm/s $\Rightarrow Q_{min} \approx 6$ L/min (80/88 mm)
- Pour pouvoir discerner les venues d'eau sur 15-20m:
 $V = 10 \times V_{min} = 20$ cm/s $\Rightarrow Q_{min} \approx 60$ L/min en régime stabilisé

hélice:

- en aluminium anodisé
- diamètre: 50 mm, pas de 50 mm
- vitesse de démarrage: 2 cm/s
- domaine de vitesse conseillé: 2 - 50 cm/s

cage de

protection: en acier inoxydable
diamètre: 70 mm

Retour d'expérience:

- \Rightarrow Améliorer les rapports de sondage et les développements de piézomètres.
 - \Rightarrow Premier essai de productivité au nettoyage: estimation des débits / rabattement associé
- \Rightarrow Utiliser leurs résultats pour adapter les phases ultérieures de reconnaissances
- \Rightarrow Choisir le matériel en fonction des débits / vitesses attendus

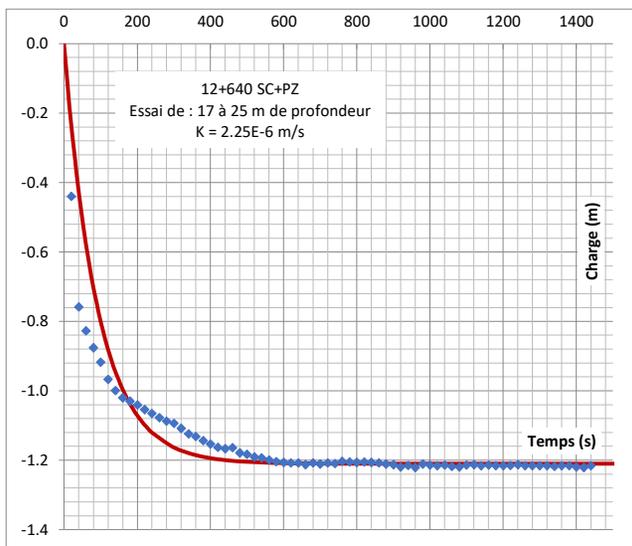
Essais dans des ouvrages pérennes

Exemple 2 : « petits » pompages d'essais dans piézomètres profonds

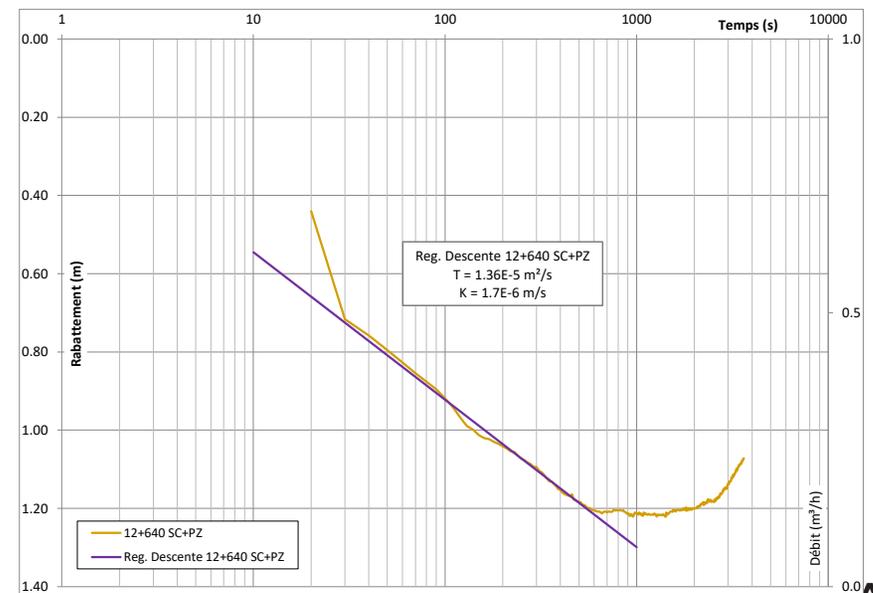
Exemple 2: Pompage à $Q \approx 0.1 \text{ m}^3/\text{h}$ avec suivi automatisé des niveaux

- *Pompage pendant 1h environ, régulation du débit avec dispositif à débordement*

Calage sur solution analytique « Lefranc »



Interprétation Cooper Jacob (descente)



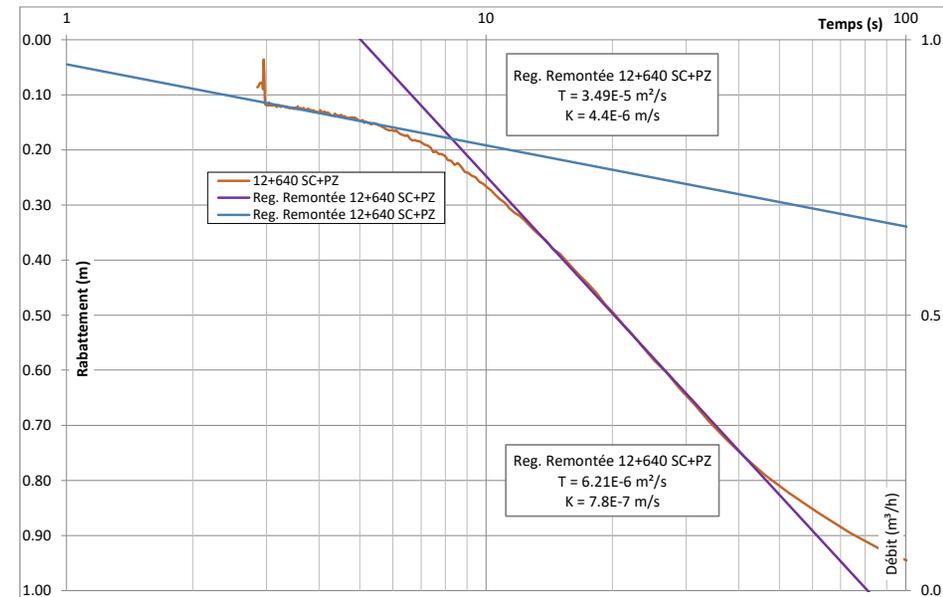
Essais dans des ouvrages pérennes

Exemple 2 : « petits » pompages d'essais dans piézomètres profonds

Exemple 2: récupération

- ⇒ *L'interprétation de la descente par Cooper-Jacob est cohérente avec l'ajustement sur la courbe « Lefranc »*
- ⇒ *L'interprétation de la remontée par Cooper-Jacob donne une bonne gamme de valeurs.*
- ⇒ *Le gain de précision sur les débits et sur les niveaux permet de compenser les défauts (faible débit...)*
- ⇒ *Les formules théoriques restent valables même avec des débits faibles.*
- ⇒ *Limites de l'approche: l'absence de piézomètre « satellite » ne permet pas d'identifier les limites ou d'estimer l'emmagasinement.*

Interprétation Cooper Jacob (récupération)



Conclusion

➤ Les essais hydrogéologiques peuvent beaucoup apporter en génie civil

- *Dimensionnement des ouvrages*
 - *Dimensionnement des rabattements de nappe*
- ⇒ *Intégration de la problématique hydrogéologique dès le début des études/reconnaisances*

➤ Marge d'amélioration importante

- *Qualité des mesures et des protocoles: faire peut-être moins mais mieux*
- *Prise en compte et réduction des incertitudes, notamment sur les débits*
- *Analyse de la sensibilité des résultats aux données d'entrée*

➤ Sources d'amélioration

- *Formation et implication des équipes (terrain et bureau d'études)*
- *Identification des bonnes problématiques*
- *Éviter les reconnaissances inutiles ou « causes perdues »*

Merci de votre attention.