

La piézométrie

ou mesure de la profondeur de la surface des nappes

Ecole d'Hiver – 3 mars 2015

“Techniques d’observation et méthodes d’analyse pour la gestion de l’eau dans les bassins versants agricoles méditerranéens”

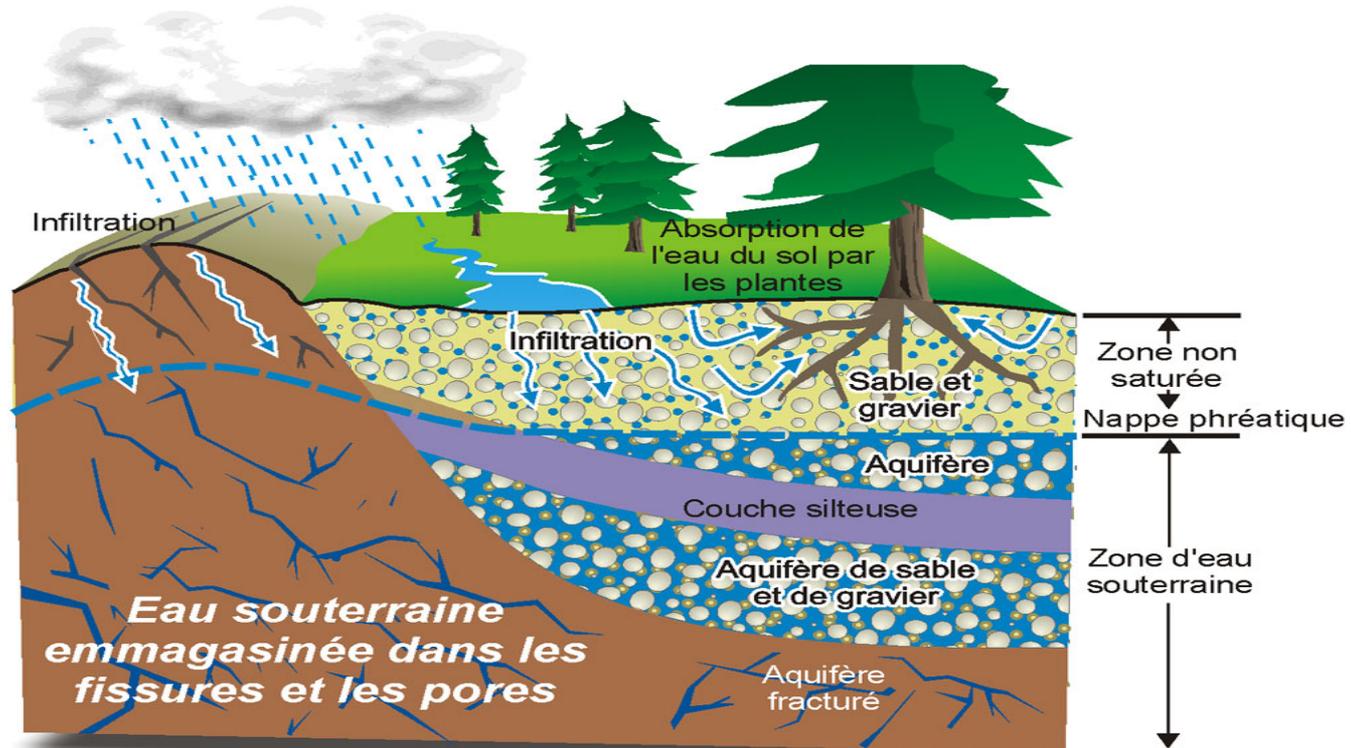
Lise Ponchant, Sylvain Massuel

1 – Rappels sur les eaux souterraines

Aquifère : formation géologique ou roche, fissurée (fracturée) ou suffisamment poreuse pour stocker de l'eau, et perméable pour laisser l'eau circuler.

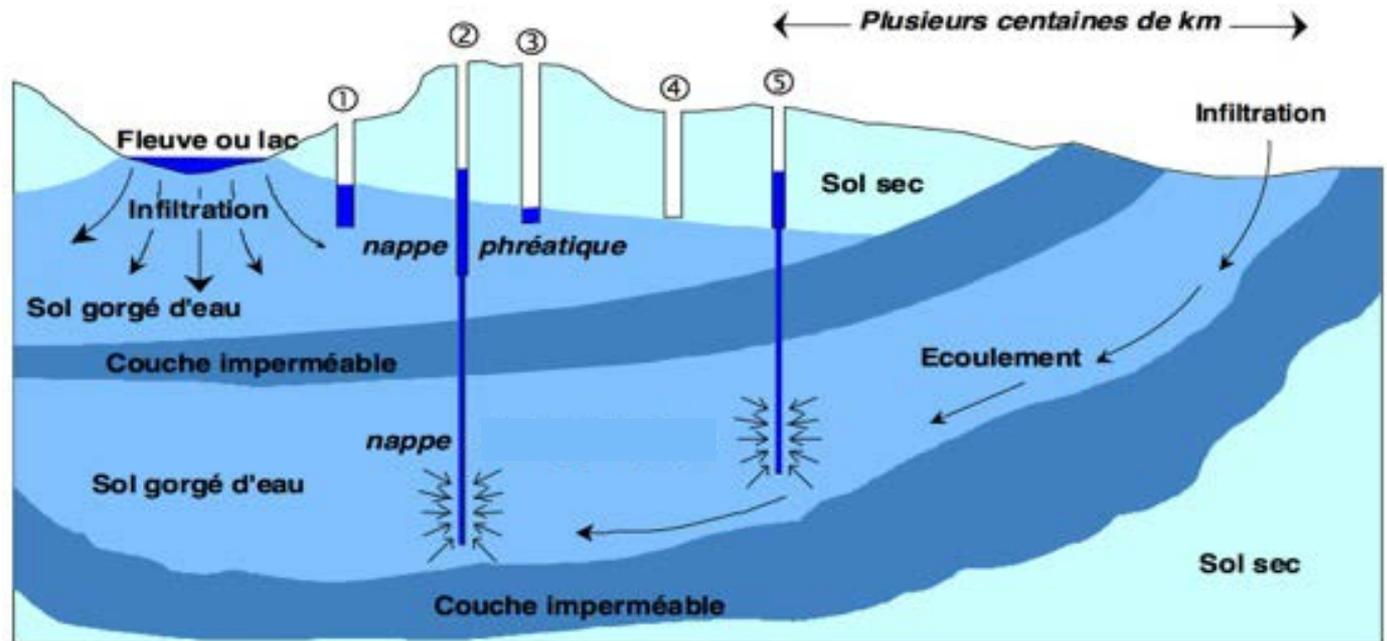
Nappe : eau contenue et circulant dans les pores ou les fissures d'un aquifère. La nappe peut être exploitée pour approvisionner les réseaux d'eau potable, pour l'agriculture etc...

Piézométrie : mesure de la profondeur de la surface de l'eau souterraine.



1 - Intérêt de la piézométrie

- Définir le sens de l'écoulement souterrain
- Estimer le débit d'une nappe
- Evaluer la capacité d'un aquifère (réserves en eau)
- Evaluer la recharge naturelle (fluctuations de la surface piézométrique), régime d'alimentation de l'aquifère
- Explorer, apprécier les caractéristiques d'une nappe sur un territoire (propriétés hydrodynamiques, limites de l'aquifère, études géotechniques avant réalisation d'un ouvrage...)
- Surveiller une nappe exploitée (durabilité de l'exploitation)
- Etudier les relations de la nappe avec la surface (recharge, décharge)
-



1 - Intérêt de la piézométrie



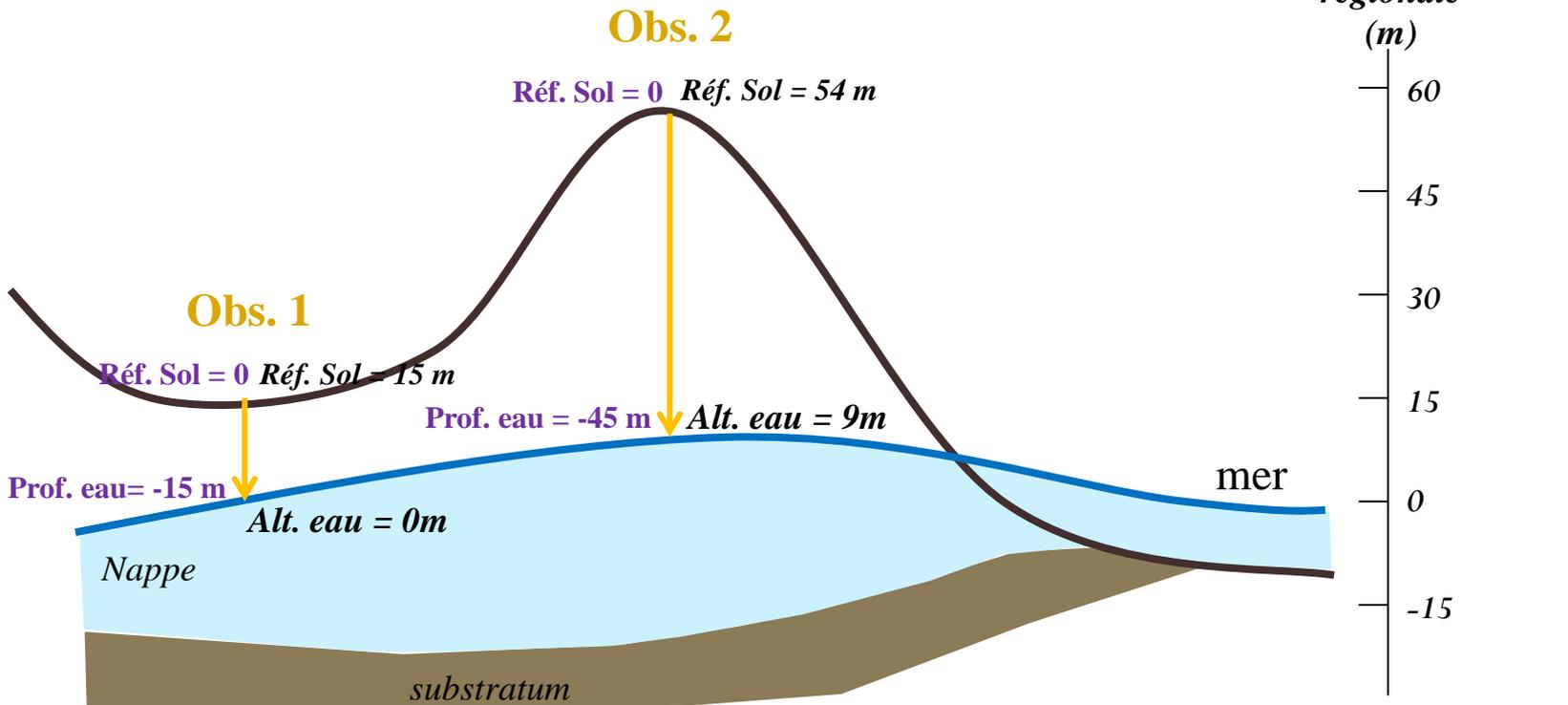
Expression sous deux formes de la surface piézométrique:

- la profondeur par rapport au sol/référence de lecture
- l'altitude selon une référence régionale

! À l'échelle d'un territoire, d'une nappe, la piézométrie n'aura d'intérêt scientifique et opérationnel que si elle est exprimée en altitude selon une référence régionale !

Gradient hydraulique

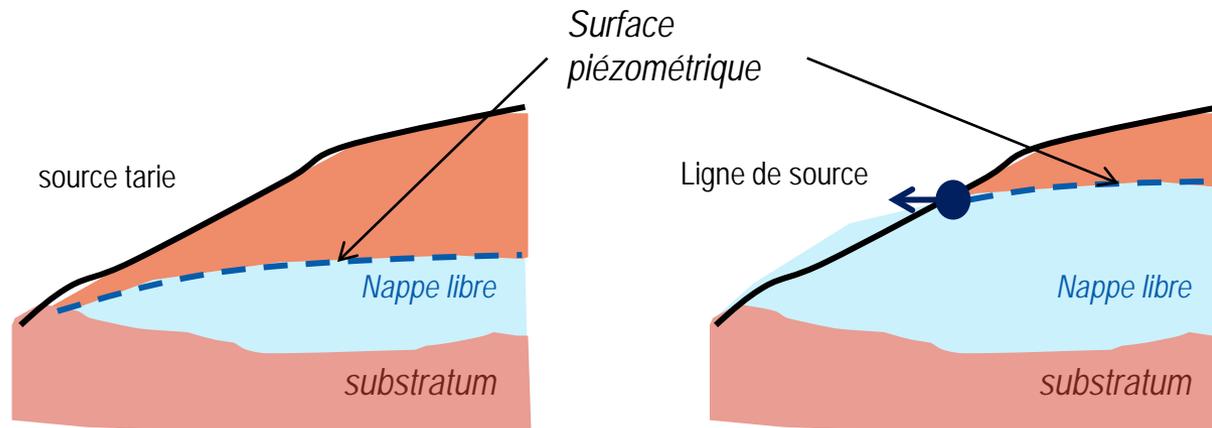
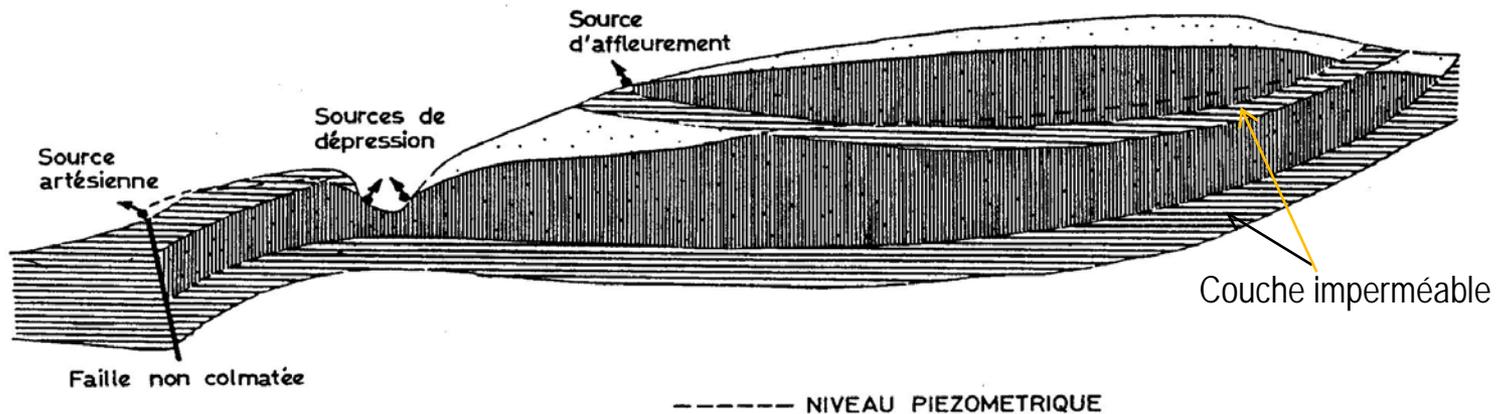
- Si réf. "profondeur": écoulements Obs 1 → Obs 2; faux
- Si réf. "altitude": écoulements Obs 2 → Obs 1; vrai



2 – Comment observer la nappe : les sources

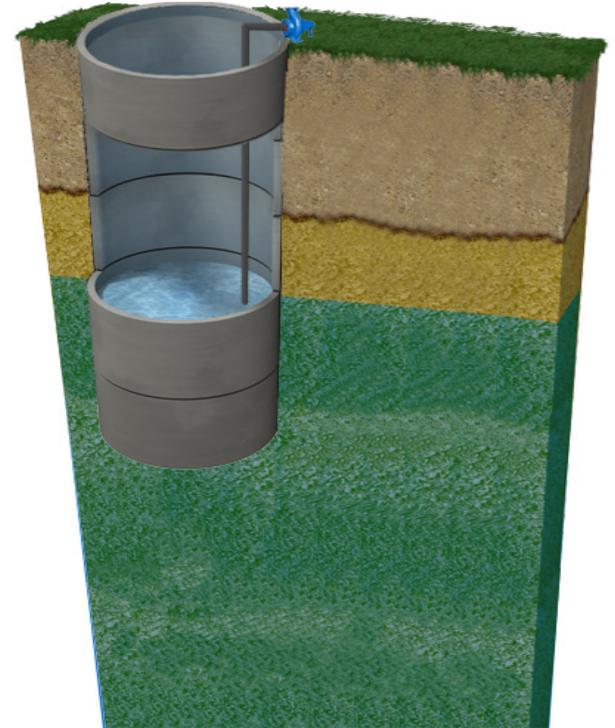
Les observations directes aux exutoires (intersections surfaces piézo/topo) :

- Les sources de dépression (nappe libre)
- Les sources d'affleurements (nappe "perchée": le socle et la surface piézométrique, ligne de source)
- les émergences (nappe profonde: point de fissure, filon)



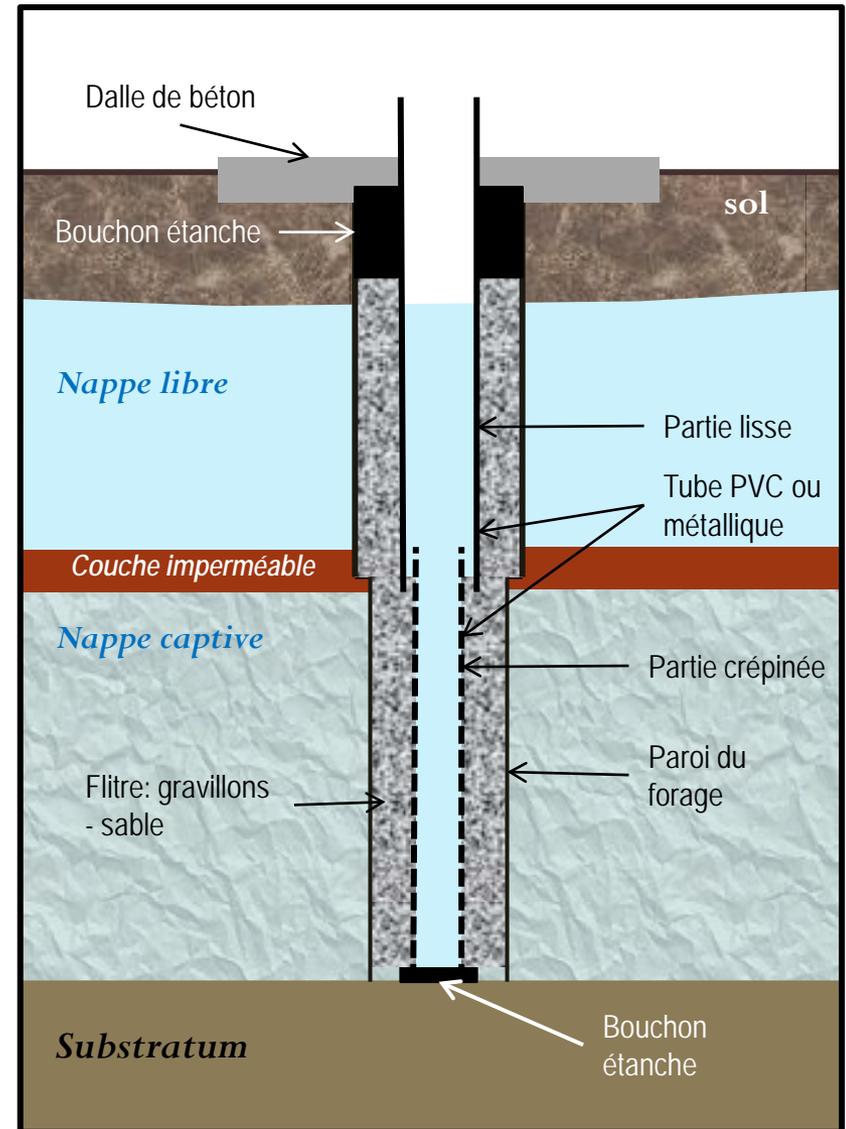
2 – Comment observer la nappe : les puits

- **Existants, nombreux, faciles d'accès** : Coût faible ou nulle, mise en oeuvre simple
- **Usages et ouvrages mixtes** : exploitation domestique – agricole (pompage), traditionnels, puits abandonnés, piézométrie...)
- **Observation non complète** : seulement la “surface” de la zone saturée, souvent que la nappe libre (phréatique)
- **Manque de réactivité** possible aux variations de la nappe : colmatage, effet capacitif
- **Difficulté de la mesure** : margelles non planes, protection capteurs...
- **Risque de perturbations** par des éléments extérieurs (déchets, pluies, ruissellement...)



2 – Comment observer la nappe : les piézomètres

- Ouvrages dédiés **uniquement à la piézométrie**
- **Observation de toute la zone saturée** jusqu'au substratum (écoulements profonds, de surface, interactions)
- **Choix de la nappe/aquifère** à observer (nappe libre, captive) et connaissance du souterrain
- **Réactivité** forte aux variations de la nappe
- **Nivellement**, références connues
- **Milieu fracturé** : prise en compte de la **transmissivité**
- Risque de perturbations extérieures presque nul



3 - Choix des points de mesure

- **Mesures ponctuelles** : 1 piézomètre comme point d'accès à la nappe (puits, forage) permettant le suivi périodique de cette nappe
 - Suivi temporel en général
 - Observer l'influence d'un point sur un autre (ex : essai de pompage, pollutions...)

Contraintes d'implantation:

- loin des **perturbations éventuelles** (pompage, drainage, marécage, haies d'arbres, topographie, géologie...)
- **dimension humaine** (habitants, agriculteurs, exploitants, opérateurs...)

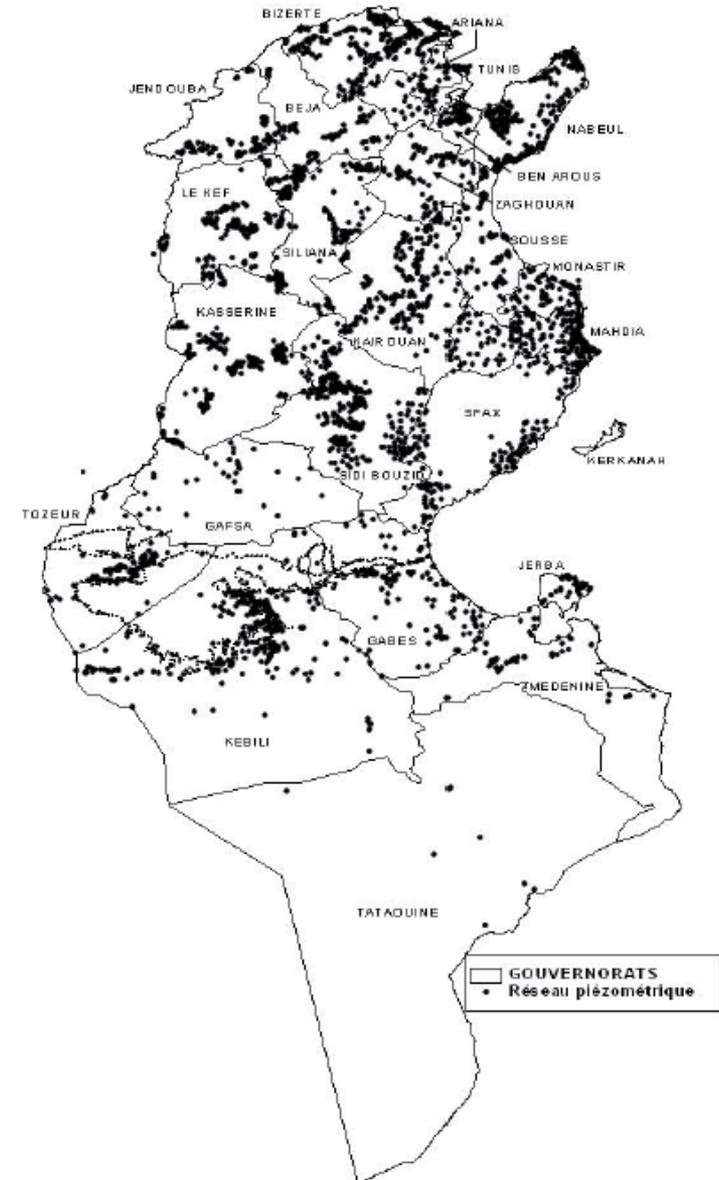


- **Mesures en réseau** de piézomètres (réseau piézométrique) pour le suivi périodique du niveau de l'eau des nappes souterraines
 - Suivi spatialisé et vue d'ensemble
 - Localisation (horizontalement et verticalement) et nombre de piézomètres :
 - représentativité du territoire – de la nappe :
 - surface, géologie, topographie, réseau hydrographique
 - dynamique (à l'échelle de la réponse hydrogéologique)
 - quel(s) aquifère(s) observé(s) – suivi(s)
 - objectifs du réseau (scientifique, opérationnel...)

3 – Exemple : Le réseau piézométrique national Tunisien

Grande échelle

- Depuis les années 50
- Objectifs :
 - Suivi de l'exploitation relativement forte de certaines nappes
 - Observer la variation naturelle des nappes
 - Régime d'alimentation des aquifères
- DGRE
- 3700 points de surveillance (puits, forages, piézomètres)
- 148 systèmes aquifères suivis

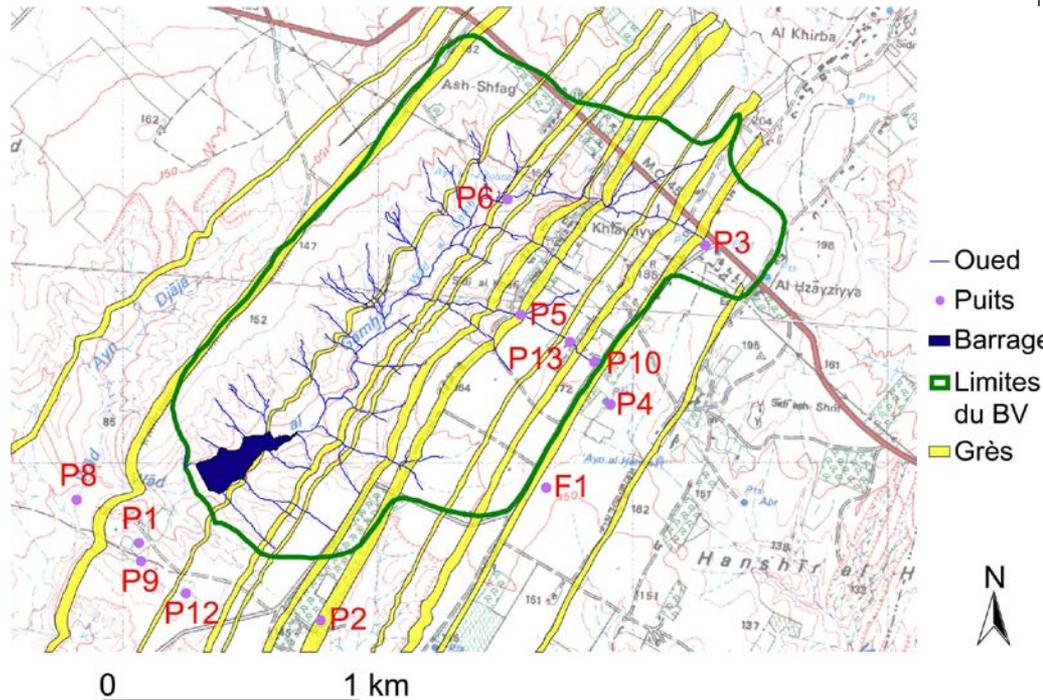
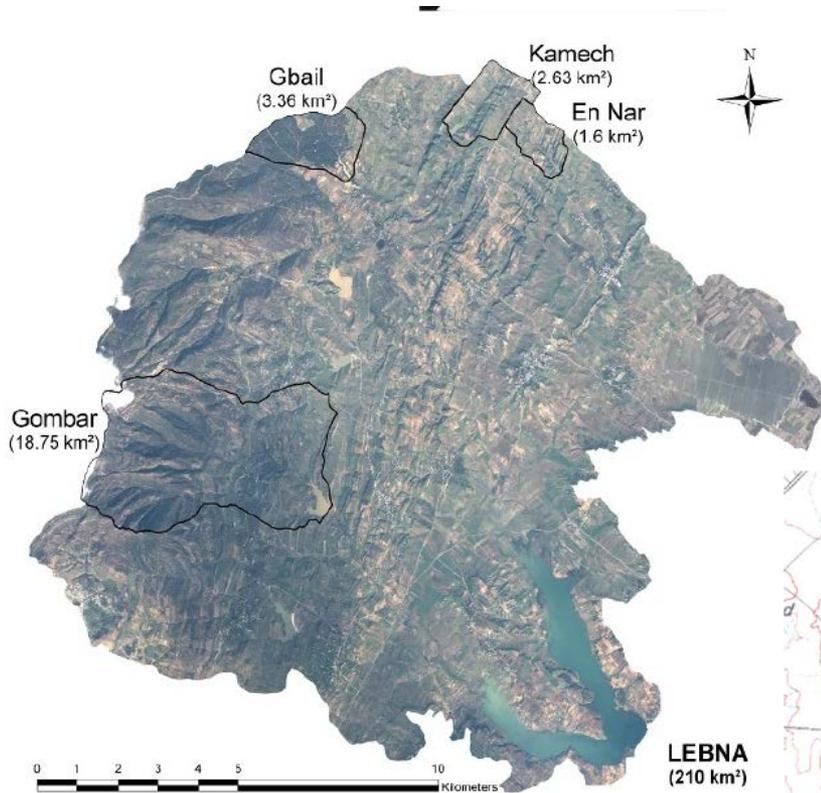


Horriche. F, Besbes. M., *Analyse du réseau piézométrique national tunisien (2006)*. *Revue des sciences de l'eau*. 347-363p

Figure 2 Réseau piézométrique national (1949 – 1996).
National piezometric network (1949 – 1996).

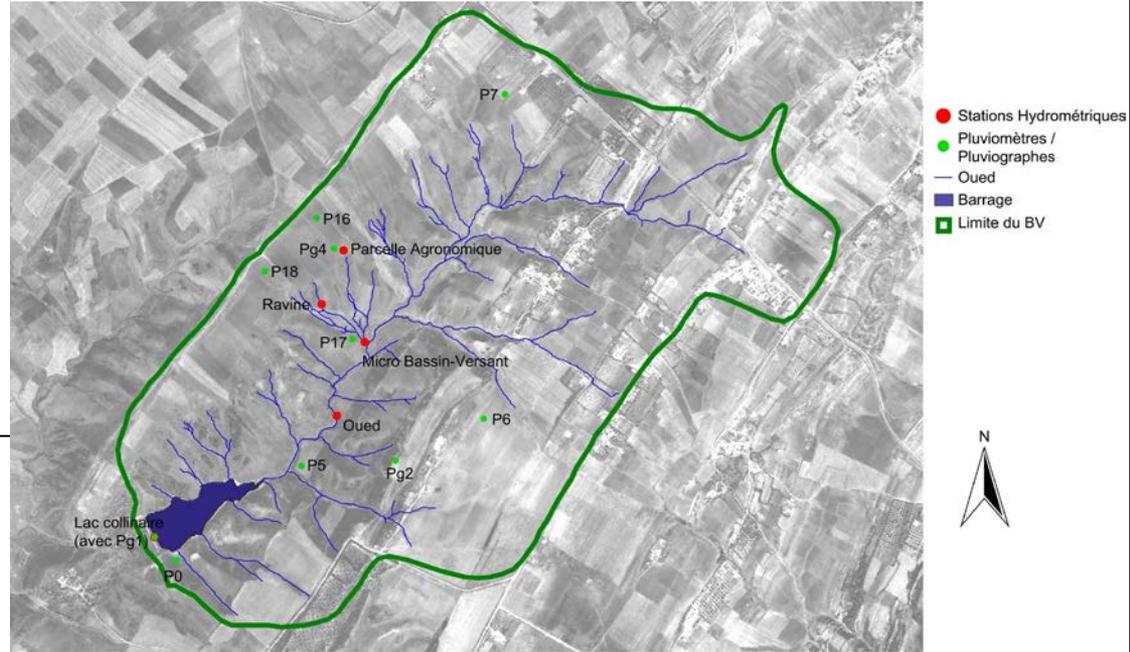
3 - Exemple de l'Observatoire de Kamech, Cap Bon

Petite échelle



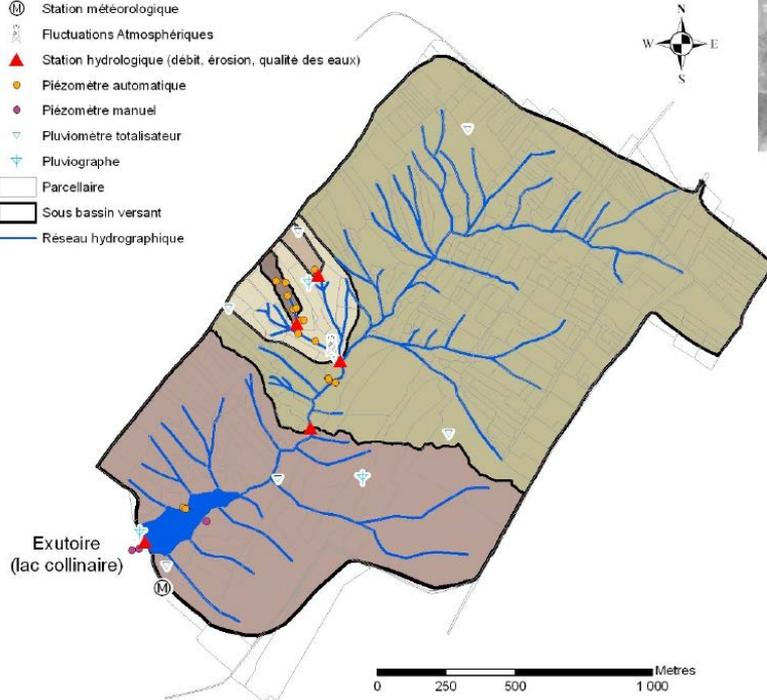
3 - Exemple de l'Observatoire de Kamech, Cap Bon

Petite échelle



Légende

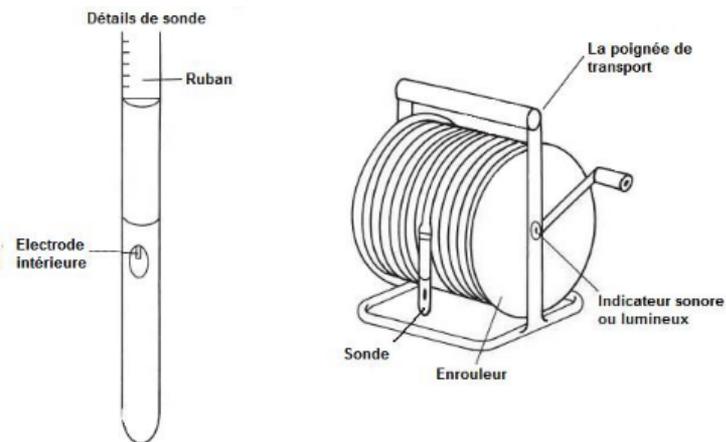
- Ⓜ Station météorologique
- ⚡ Fluctuations Atmosphériques
- ▲ Station hydrologique (débit, érosion, qualité des eaux)
- Piézomètre automatique
- Piézomètre manuel
- ▽ Pluviomètre totalisateur
- ⚡ Pluviographe
- ▭ Parcelle
- ▭ Sous bassin versant
- Réseau hydrographique



4 – Comment mesurer : sonde manuelle

● Sonde manuelle capacitive (sonore)

- Différentes longueurs du ruban
- La lecture manuelle : procédé
- Indispensable au contrôle & traitement des données automatiques



Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Fiabilité de la mesure- Précision au cm près- Observation directe du niveau, état du piézomètre- Peu de panne	<ul style="list-style-type: none">- Fréquence faible de mesure (déplacements physiques d'un observateur, coût)- Références de la lecture (métadonnées, quelles données "écrites"?)- État/entretien de la sonde (fiabilité):<ul style="list-style-type: none">- ruban (coupé, effacé...)- Électrode- Changements d'opérateurs : décalages- Risque d'erreurs lors du passage au numérique

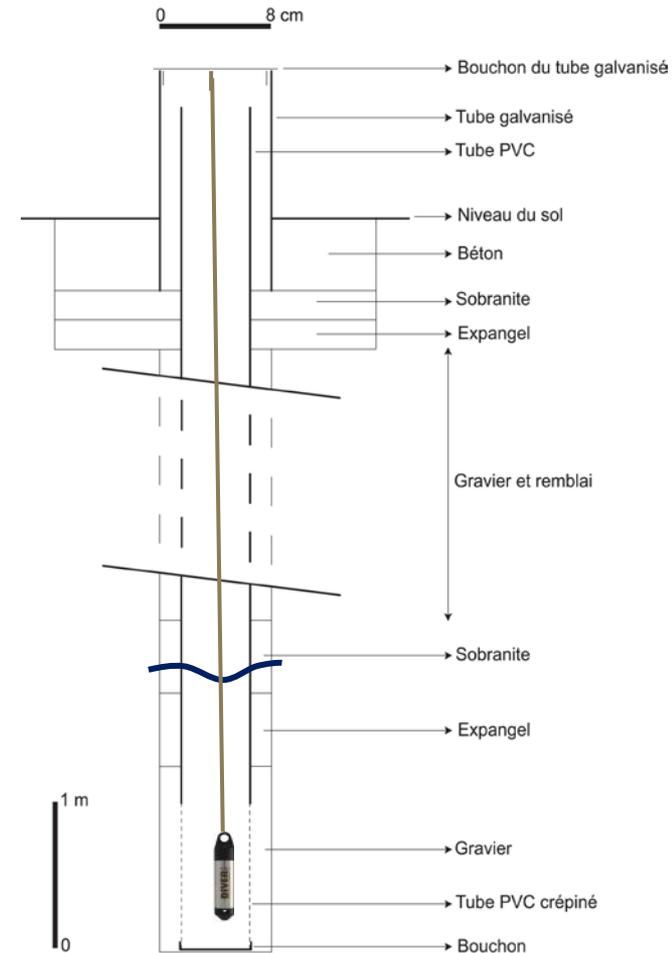
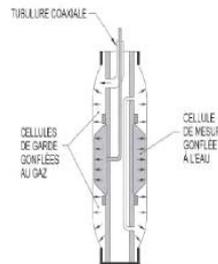
3 – Comment mesurer: système automatique

- **Systèmes de mesure automatiques :**

- Couple: capteur + logger (numérique ou papier, interne ou externe)
- Déchargements (manuels, télétransmission)

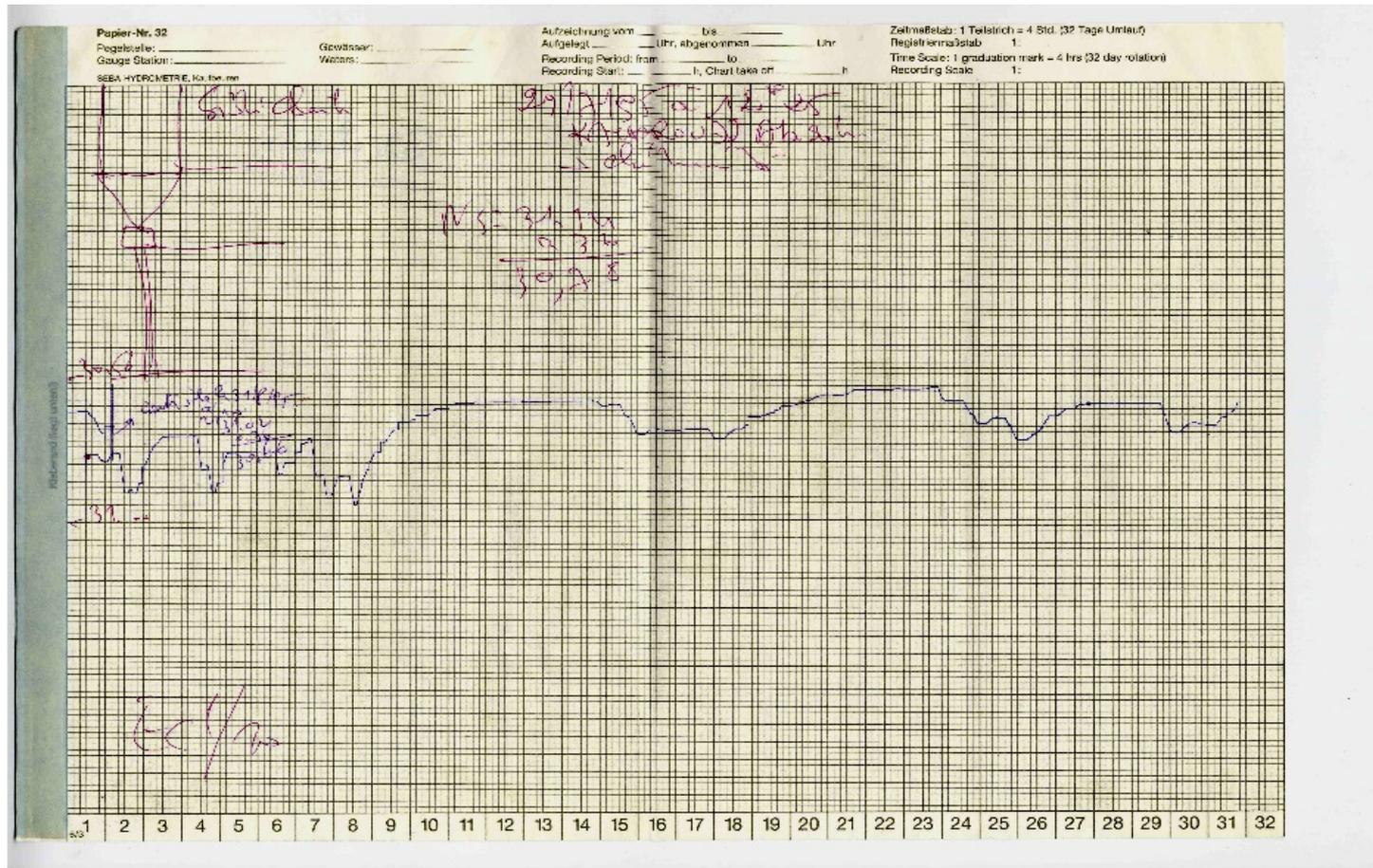
- Flotteur Thalimède

- Capteurs de pression immergés:
avec mise à air libre ou pression absolu



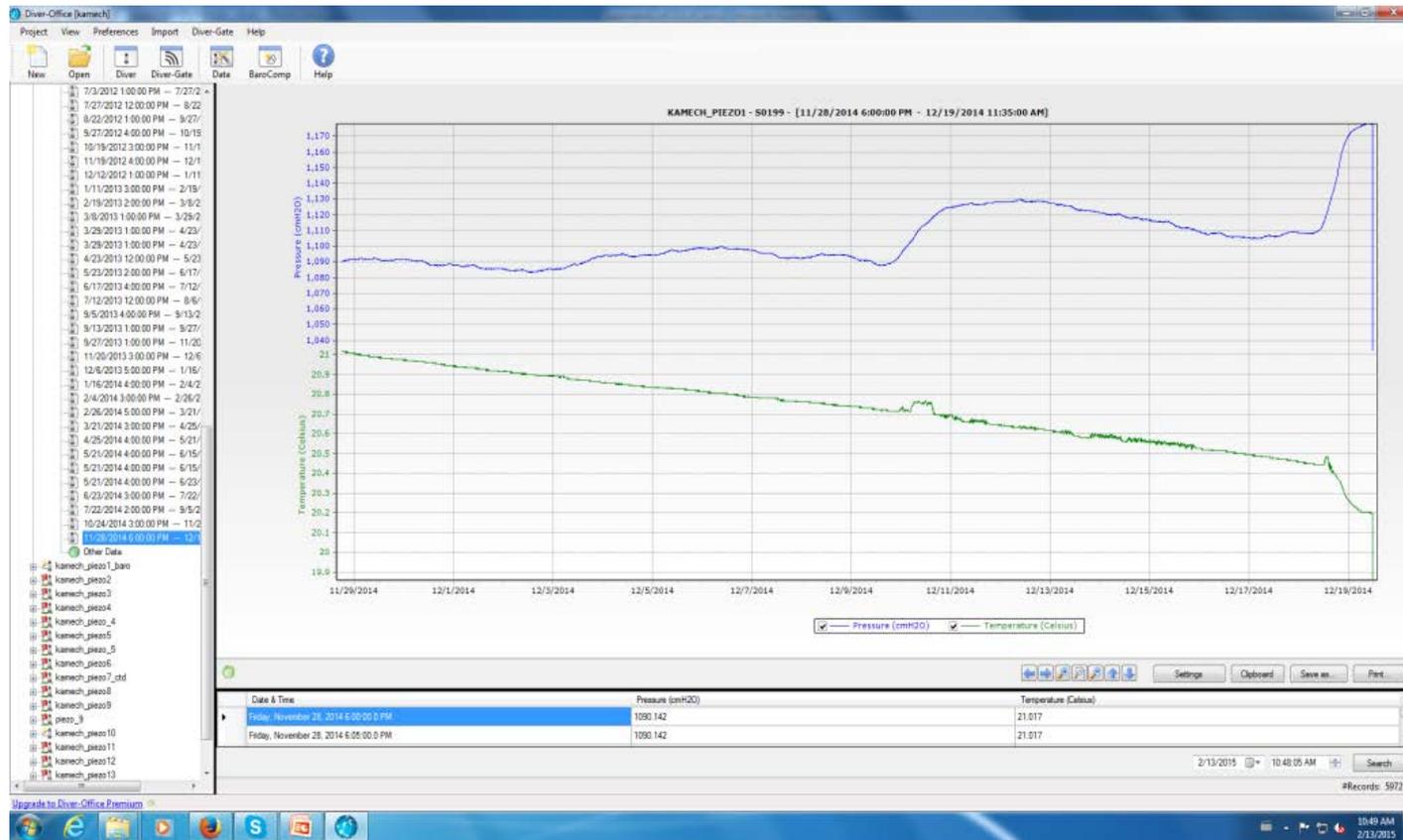
3 – Comment mesurer: systèmes automatiques

- Systèmes de mesure automatique : exemple de logger papier



3 – Comment mesurer: systèmes automatiques

Systemes de mesure automatiques : exemple de logger numérique (logiciels de téléchargements)



3 – Comment mesurer: systèmes automatiques

Connaître les caractéristiques du capteur pour bien choisir et maintenir :

Etendue de mesure : Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.

Résolution : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.

Sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

Précision : Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.

Capacité de la mémoire : en lien avec la fréquence des mesures et des tournées de déchargement

Mode d'alimentation

Programmation (sonde avec logger externe, fonctionne sur l'évènement...)

Spécifications techniques du Mini-Diver®

Type	DI 501	DI 502	DI 505	DI 510	DI 500 (Baro)
Etendue de mesure	10 m H ₂ O	20 m H ₂ O	50 m H ₂ O	100 m H ₂ O	1,5 m H ₂ O
- précision**	0,5 cm H ₂ O	1 cm H ₂ O	2,5 cm H ₂ O	5 cm H ₂ O	0,5 cm H ₂ O
- résolution	0,2 cm H ₂ O	0,4 cm H ₂ O	1 cm H ₂ O	2 cm H ₂ O	0,1 cm H ₂ O

** sur la plage compensée en température

	MINIDAT 1	MINIDAT 2	BARODAT 1	AQUADAT 1	AQUADAT 2	MINIDAT 4	MINIDAT 5 et 7	MINIDAT 7H	BARODAT 5
	Capteurs de pression		Capteur barométrique	Capteurs de conductivité et pression		Capteurs de pression			Capteur barométrique
Principe	Piézo-résistif céramique			-	Piézo-résistif titane				
Echelles	9, 30, 76 m. absolue		0,5 à 2 bars	-	10,5, 60, 200, 340 m. absolue 3,5, 10,5, 21, 70, 211, 351 m. relative	10,5, 60, 200, 340 absolue	10,5, 60, 200, 340, 693 ⁵ m. absolue 3,5, 10,5, 21, 70, 211, 351 m. relative	10,5 m. relative	0 à 1,14 bar
Précision à 15°C P.E. ²	±0,1 %		±0,1 %	-	±0,05 %			±0,003 m jusqu'à 3 m ±0,1 % de la lecture à partir de 3 m	±0,05 %
Précision 0°C à 50°C P.E. ²	±0,3 %		±0,3 %	-	±0,1 %				
Résolution P.E.	Egale ou meilleure que 0,01 %				Egale ou meilleure que ±0,005 %				
Pression maximum	1,33 à 2 x échelle (suivant échelle)		-	-	2 x échelle (éclatement : 3 x échelle)				
Température de Fonctionnement ¹	0 à 50°C			-5 à 50°C		-20 à 80°C			

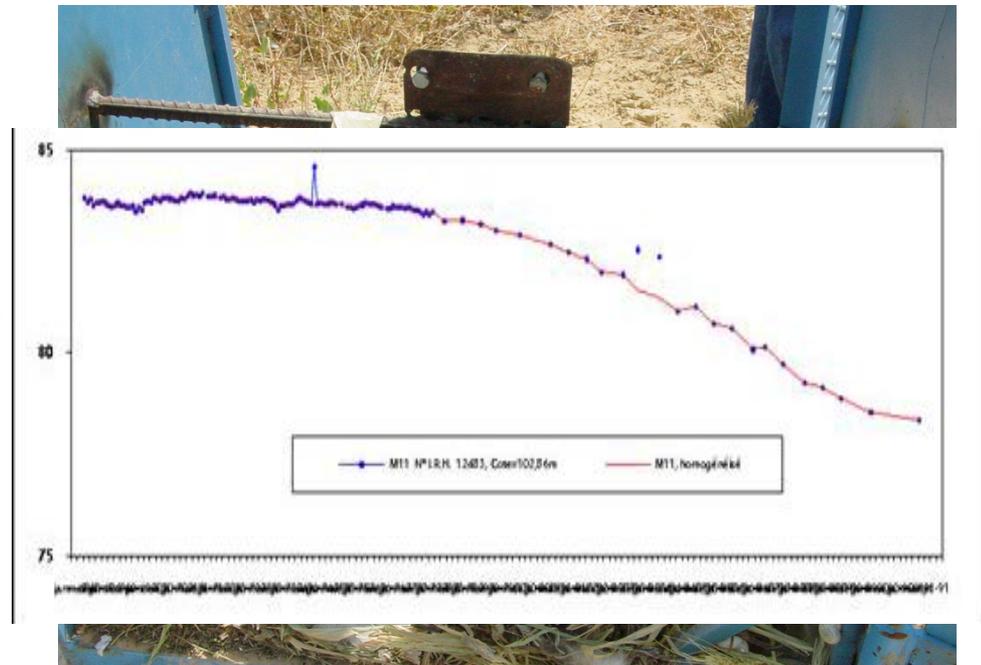
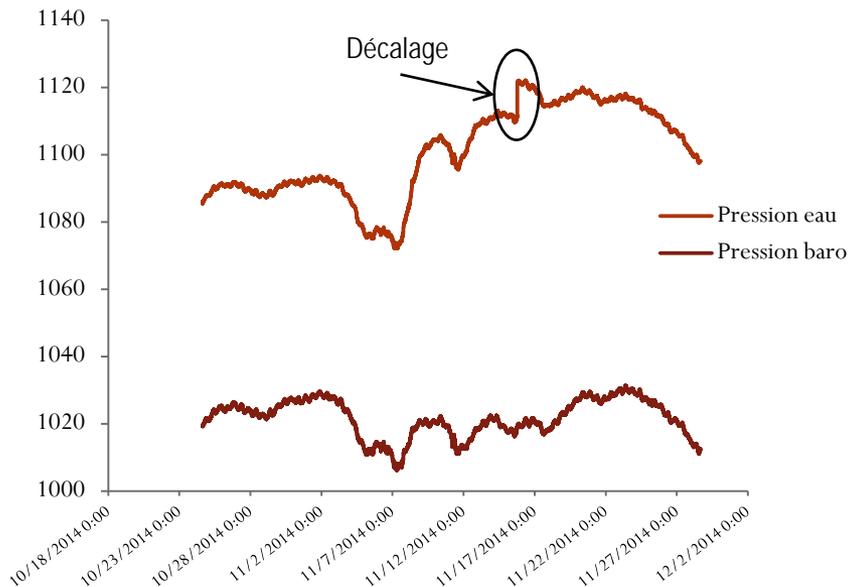
3 – Comment mesurer: systèmes automatiques

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">- Représentativité de l'aquifère (temps et espace): fréquence élevée et réseau important- Programmation à l'évènement possible via un logger externe: au delà d'une variation, déclenchement via un autre capteur- Précision de la donnée (capteur)- Interface numérique: traitement et valorisation simplifiés, base de données- Métadonnées inscrites automatiquement dans fichier de chroniques- Structuration en BDD, archivages automatiques et visualisation directe des données- Main d'oeuvre limitée / quantité de données; mise en oeuvre facile	<ul style="list-style-type: none">- Lacunes: mémoire pleine (capacité de la mémoire) problèmes d'alimentation (batterie, piles), pannes, dysfonctionnements (capteur, logger) par rapport à la fréquence de déchargements (lacunes)- Dérives possibles du capteurs: identification, corrections- Stabilité du capteur (système de fixation: colliers, fils non extensibles...)- Références de mesures (niveau du capteur, logger papier)- Risques d'erreurs : conversion et changements de formats, numérisation (logger papier)- Obstruction: tube de mise à l'air, cellule de capteur- Compensation: localisation et fréquence du capteur de pression atmosphérique (influence altitude, topographie)- Coût important : milliers de DT (un sonde 1000DT, une centrale 5000 DT)

5 – Observation des données piézométriques

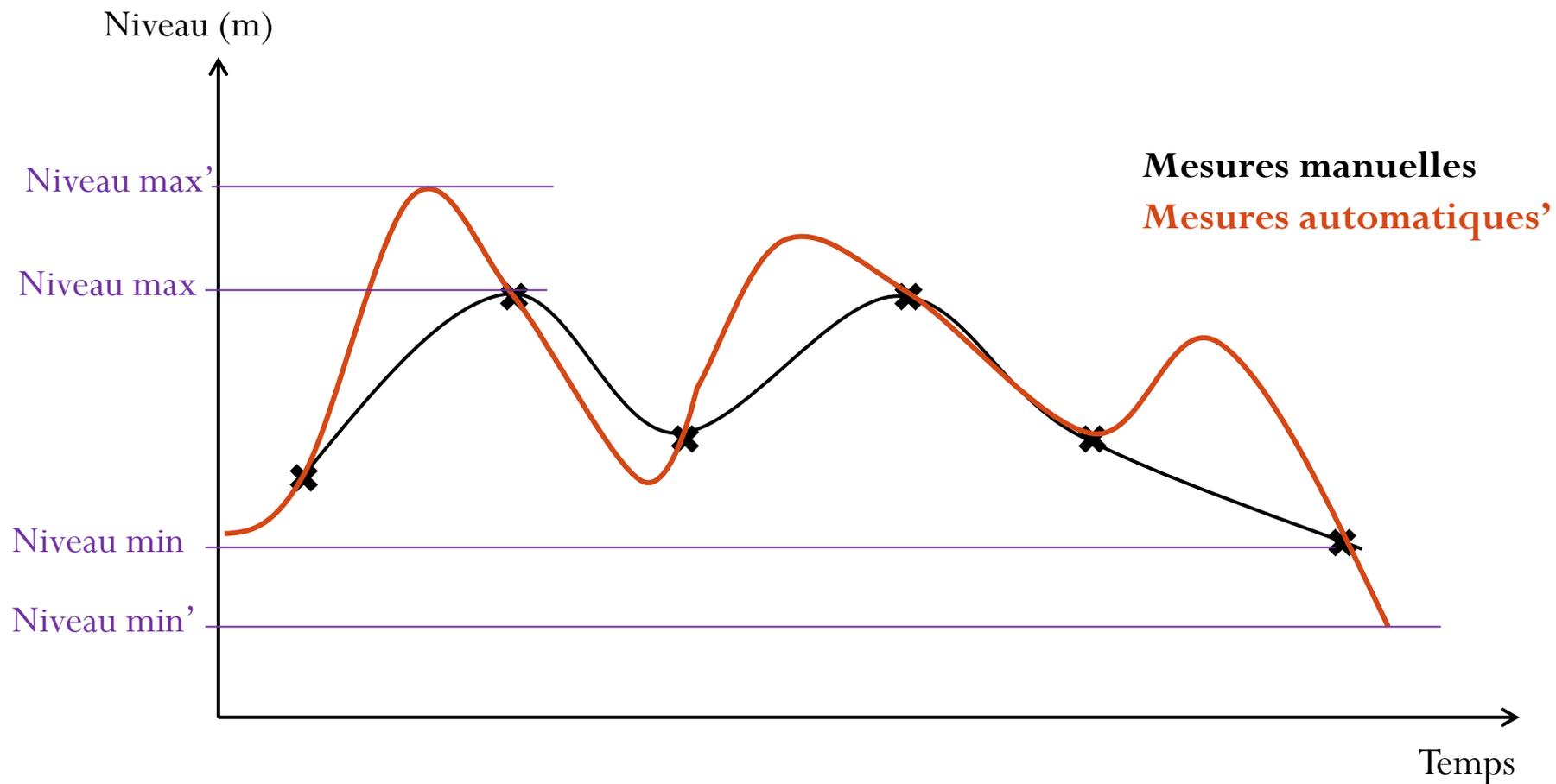
Erreurs liées à l'opérateur, aux éléments extérieurs

- Mesures perturbées par un élément extérieur (décalage, sauts, eaux de ruissellement dans le puits..)
- Problèmes de référence sur lecture manuelle et automatique: quelle référence pour le traitement (sol, margelle, haut du piézomètre), sonde pas à « 0 » (fil coupé), changement d'opérateur (décalage)
- Perturbations et fausses interprétations : confondre facilement une recharge avec une absence de décharge, importance des informations de contexte pour l'interprétation (pluies, prélèvements et périodes d'exploitation, géologie, hydrographie) et pour l'identification du niveau « d'équilibre ».

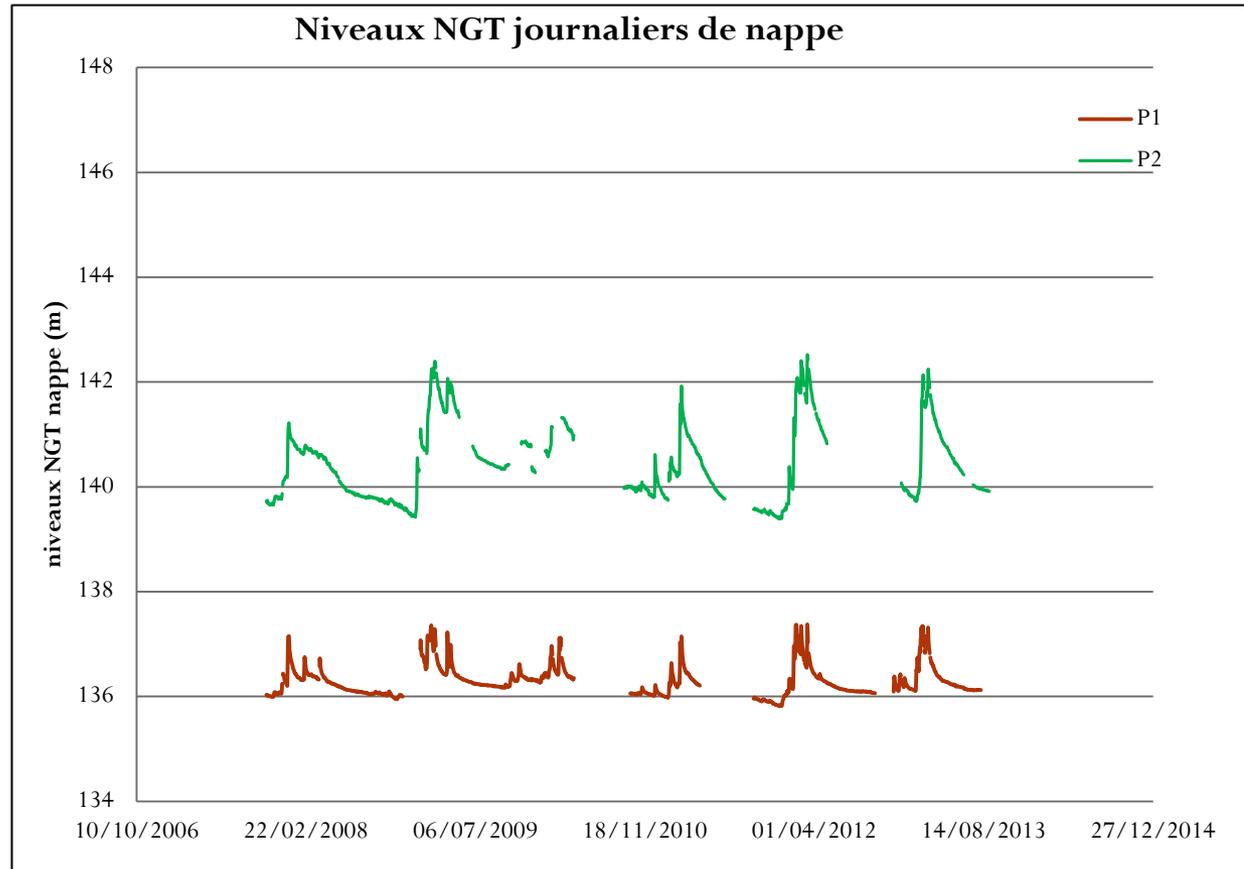


5 – Observation des données piézométriques

Problème d'échantillonnage: on manque des « minimums » et des « maximums », la dynamique réelle

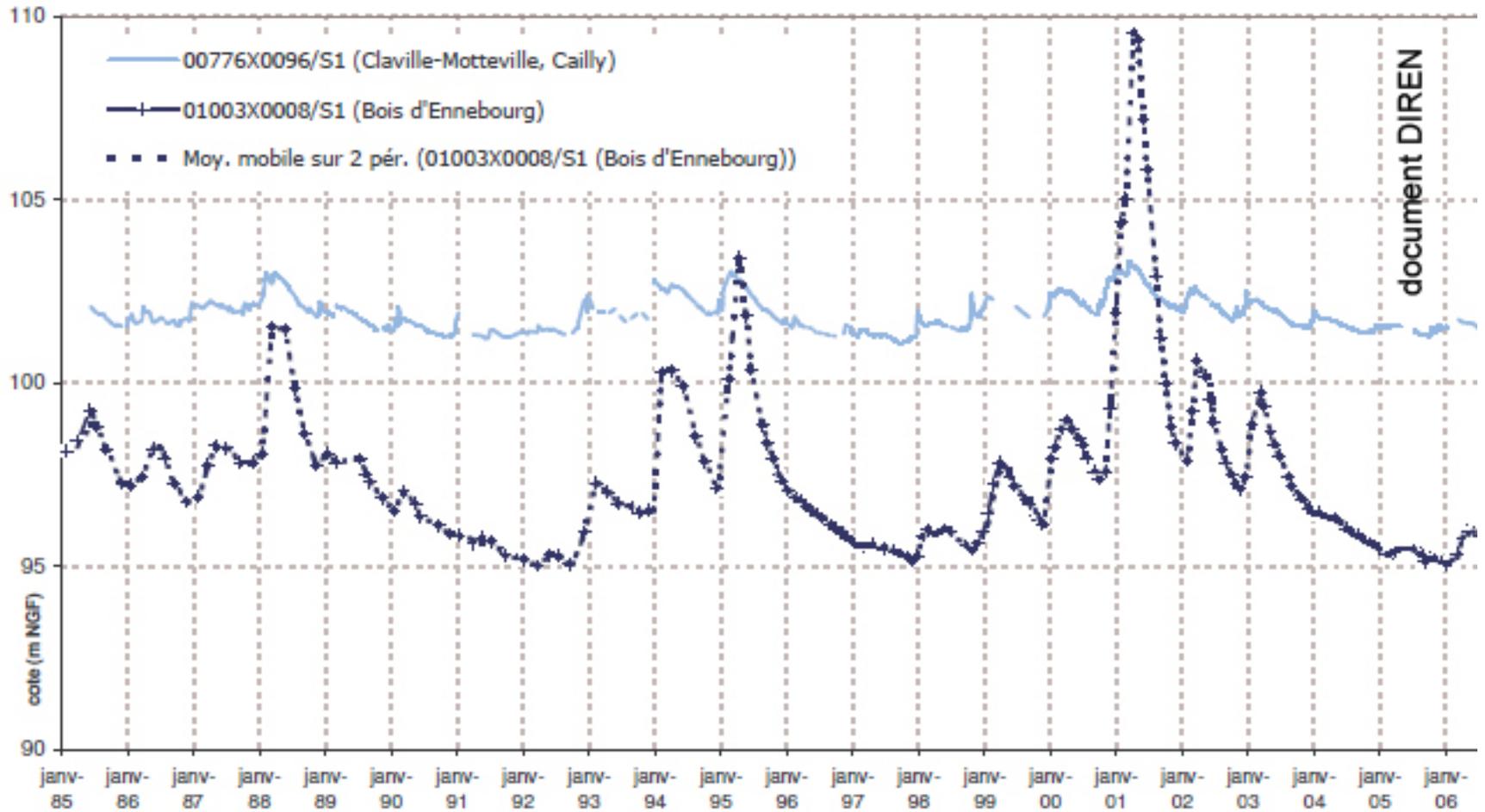


5 – Exemple de chroniques

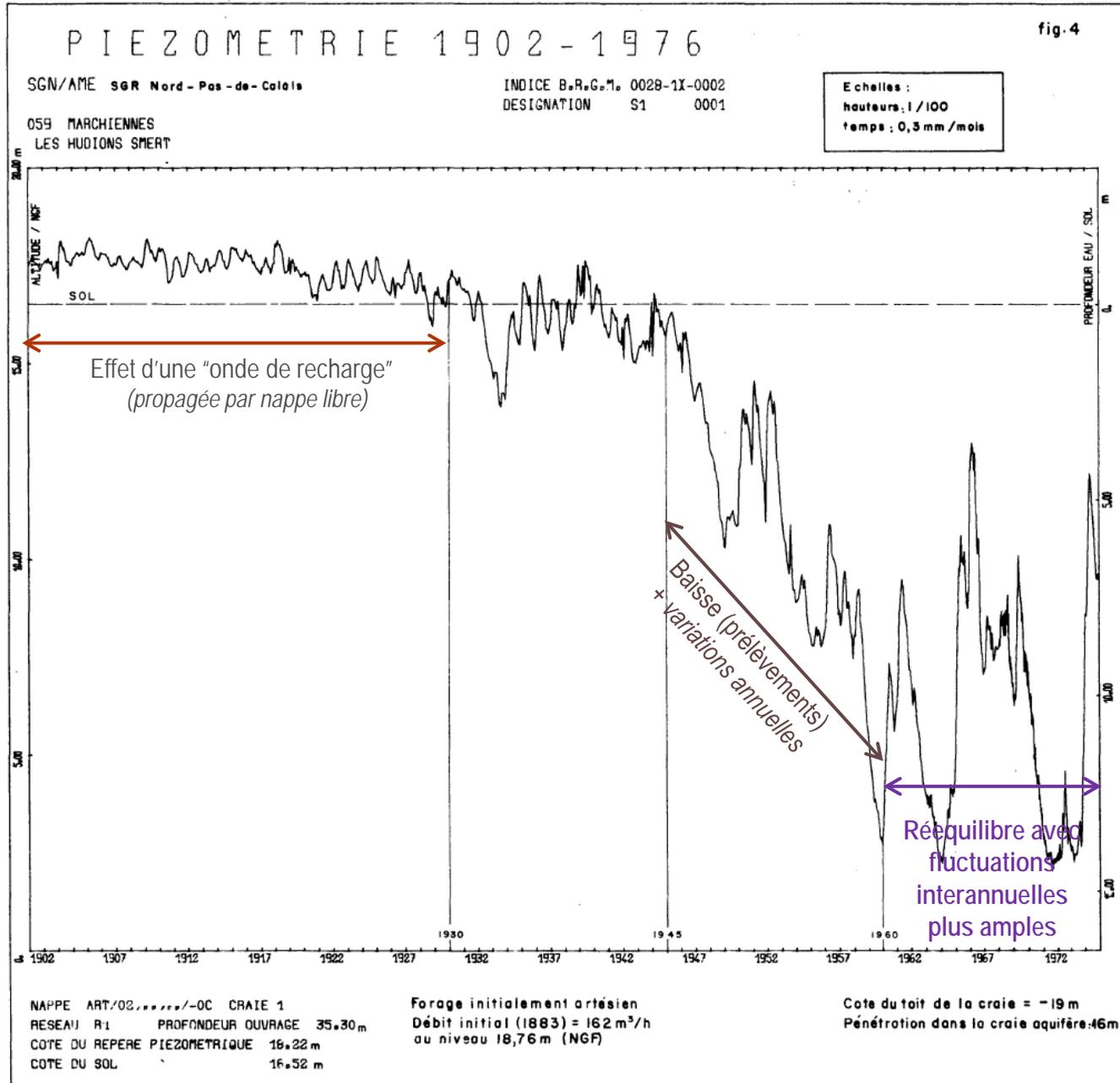


5 – Exemple de chroniques

Piézométrie observée depuis 1985 sur 2 points de surveillance de la nappe de la craie (en vallée et sur plateau)



5 – Exemple de chroniques



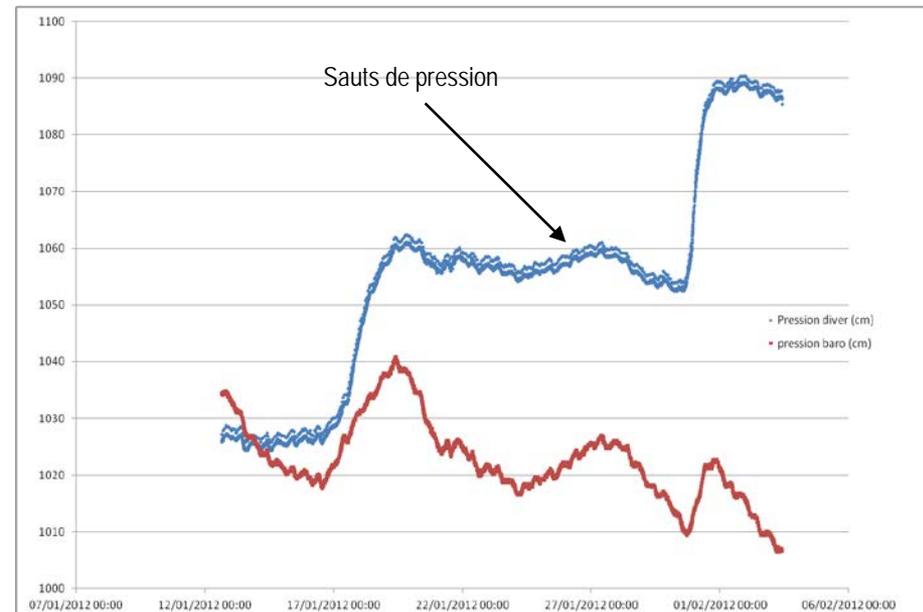
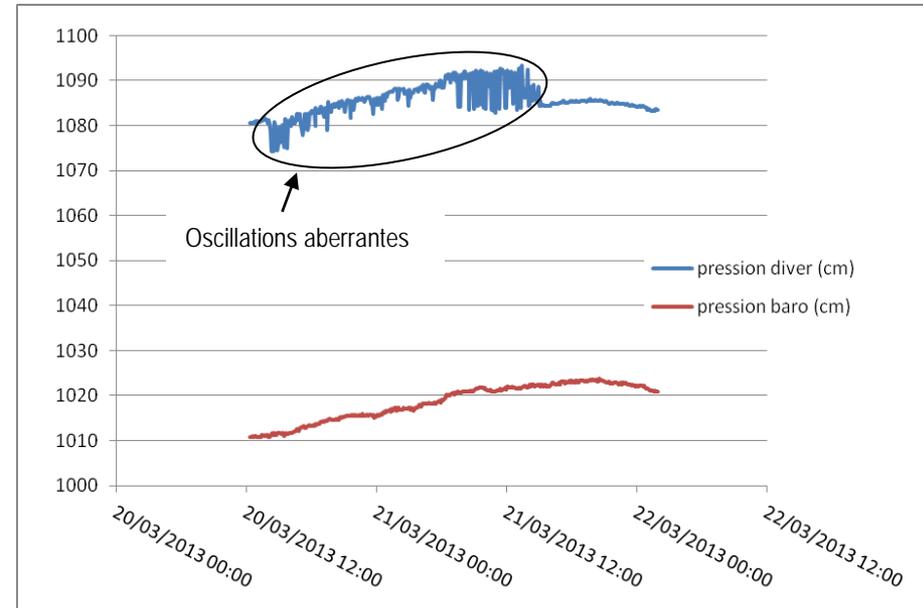
Margat J. (1977). La surexploitation des nappes souterraines. Rapport BRGM.

5 – Observation des données piézométriques

Mesures automatiques:

- **Problèmes liés à l'instrument :**
 - Sauts de pression, oscillations aberrantes (réguliers ou non / corrigéables ou lacunes)
 - Lacunes logger: capacité de mémoire, problèmes d'alimentation
 - État de l'ouvrage de mesure (puits, piézomètre): suintement parois du piézomètre, température, colmatage
- **Dérives :**
 - Dérive de l'horloge du logger
 - Dérive du capteur et identification grâce à la **lecture manuelle** : dérive linéaire (corrigeable) ou non linéaire (lacune)

!! Toujours « doubler » une chronique piézométrique automatique par les relevés manuels !!



6 – Spatialisation: interpolation linéaire et krigeage

Interpolation Spatiale : estimer des valeurs interpolées (Z^*) à partir d'un nombre fini de valeurs (Z_i) dans des points de mesures connus (x_i)

! une carte piézométrique s'exprime en altitude et non pas en profondeur par rapport au sol !

Le NIVELLEMENT est donc aussi important que la mesure piézométrique.

Il existe des cartes de profondeurs mais elles sont élaborées pour des questions bien particulières et en aucun cas pour définir le sens des écoulements.

Les variables de l'interpolation spatiale :

Z la variable régionalisée étudiée

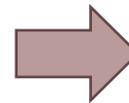
Z_i sa valeur connue en un point x_i numéroté i

Z^* sa valeur interpolée en un point donné x_0

d_i la distance entre x_i et x_0

w_i le poids d'estimation au point x_i

→ $Z^* = \sum_i w_i Z_i$

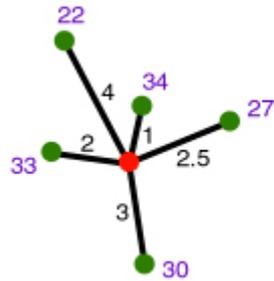


Comment déterminer la pondération, le poids w_i , de chaque valeur connue Z_i , pour estimer la valeur interpolée ?

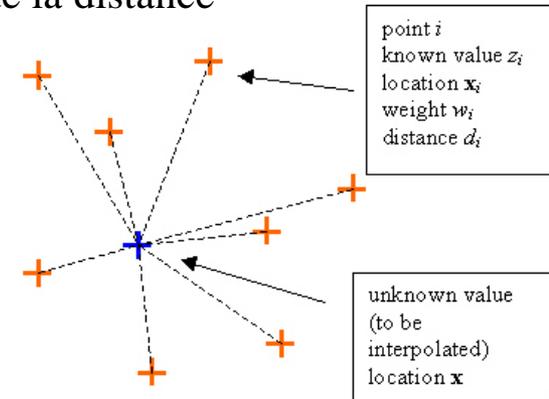
En **piézométrie**, on utilise essentiellement **l'interpolation linéaire ou le krigeage** car les écoulements souterrains ont des gradients faibles (de l'ordre du ‰), les écoulements sont « lissés », pas de « pic », de pentes fortes comme on peut en trouver pour la surface topographique.

6 - Spatialisation : Principes de l'interpolation linéaire et du krigage

○ **Interpolation linéaire** : pondération en fonction de l'inverse de la distance



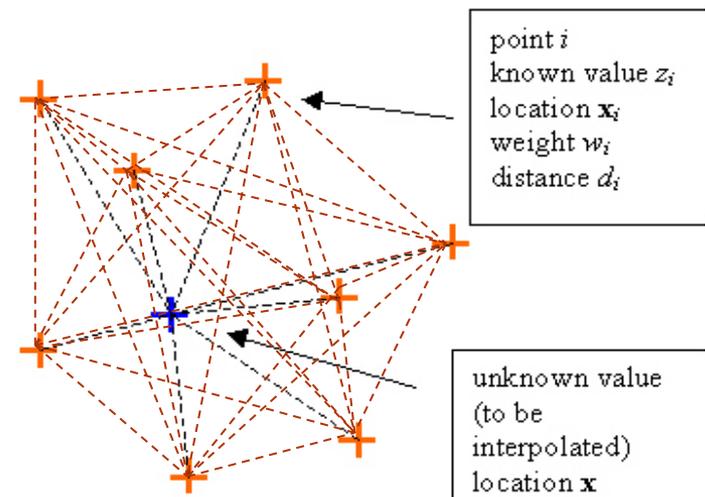
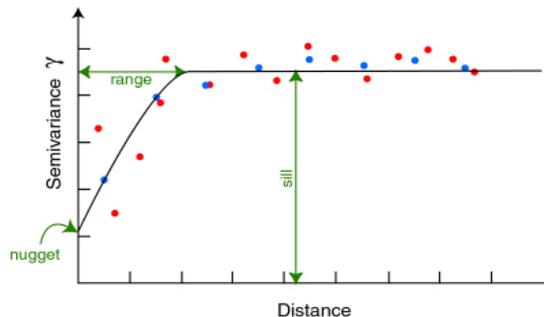
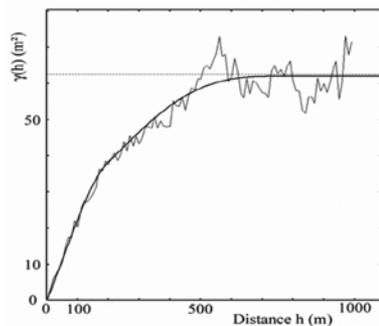
$$Z(x) = \frac{\sum w_i z_i}{\sum w_i} = \frac{\frac{34}{1^2} + \frac{33}{2^2} + \frac{27}{2.5^2} + \frac{30}{3^2} + \frac{22}{4^2}}{\frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2.5^2} + \frac{1}{3^2} + \frac{1}{4^2}} = 32.38$$



○ **Krigeage** : pondération à partir du degré de similarité entre les valeurs Z_i

➔ calcul de la covariance entre les points en fonction de la distance entre ces points.

- Modélisation de la structure spatiale des valeurs Z_i : élaboration du semi-variogramme
- Ajustement d'une fonction g(h) au semi-variogramme et estimation des w_i grâce à cette fonction



6 - Spatialisation : Exemples de traitement sous SIG

- Application dans les logiciels SIG : extension Geostatistical Spatial Analyst (ArcGIS, QGIS...)

Carte piézométrique du système aquifère phréatique de Sfax

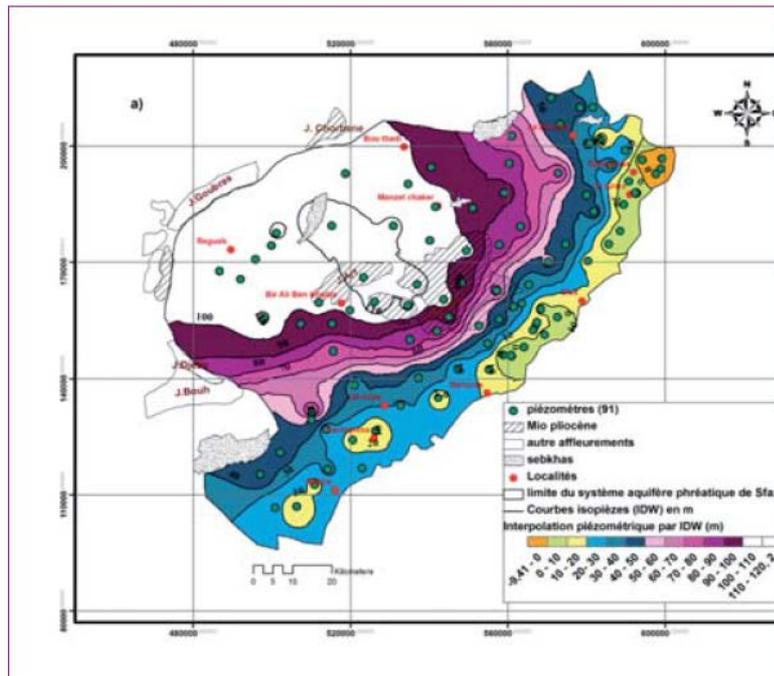


Figure 4a : Carte piézométrique obtenue par la méthode de « pondération inverse de distance ».

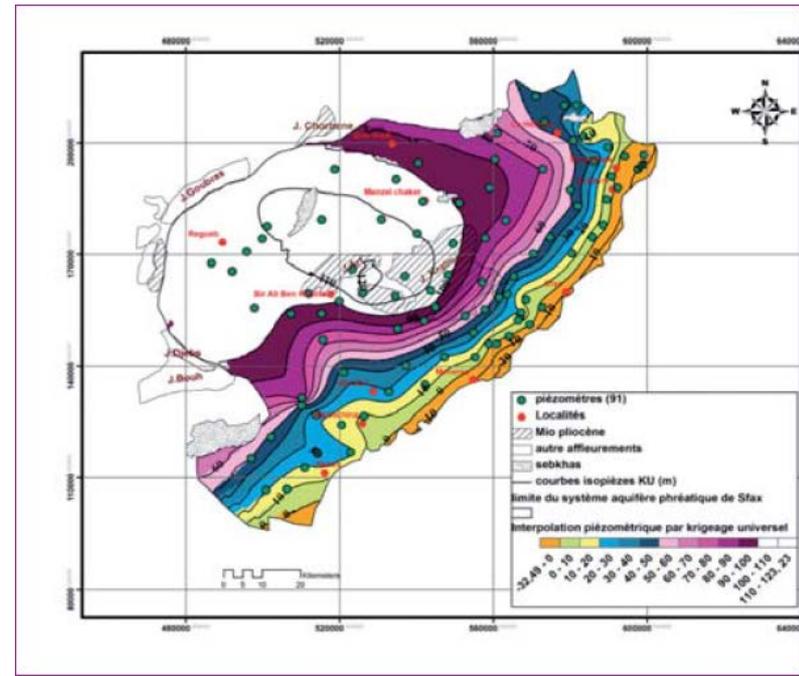
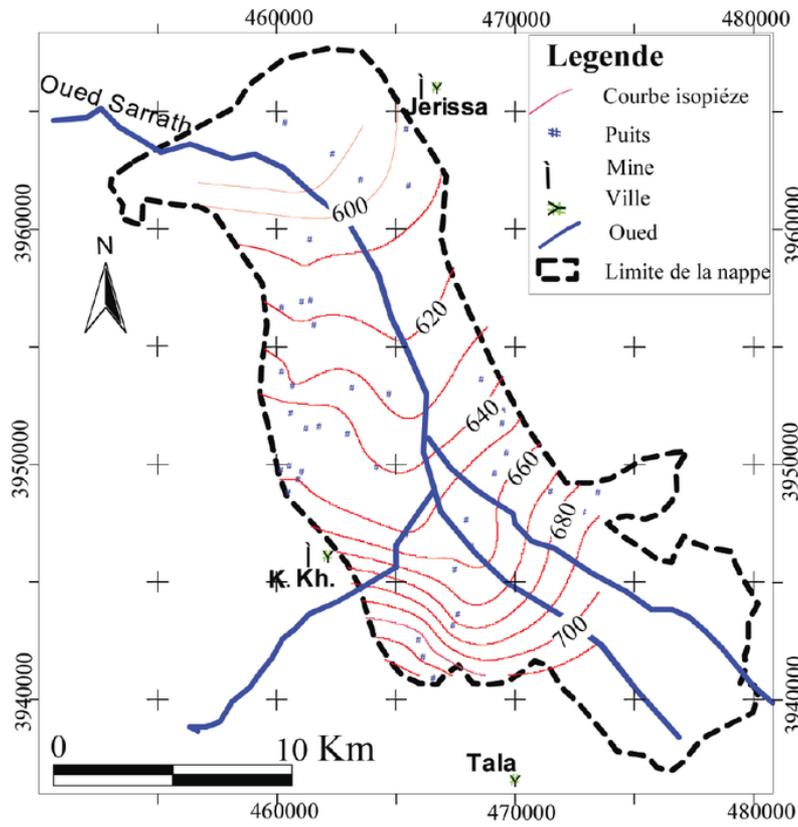


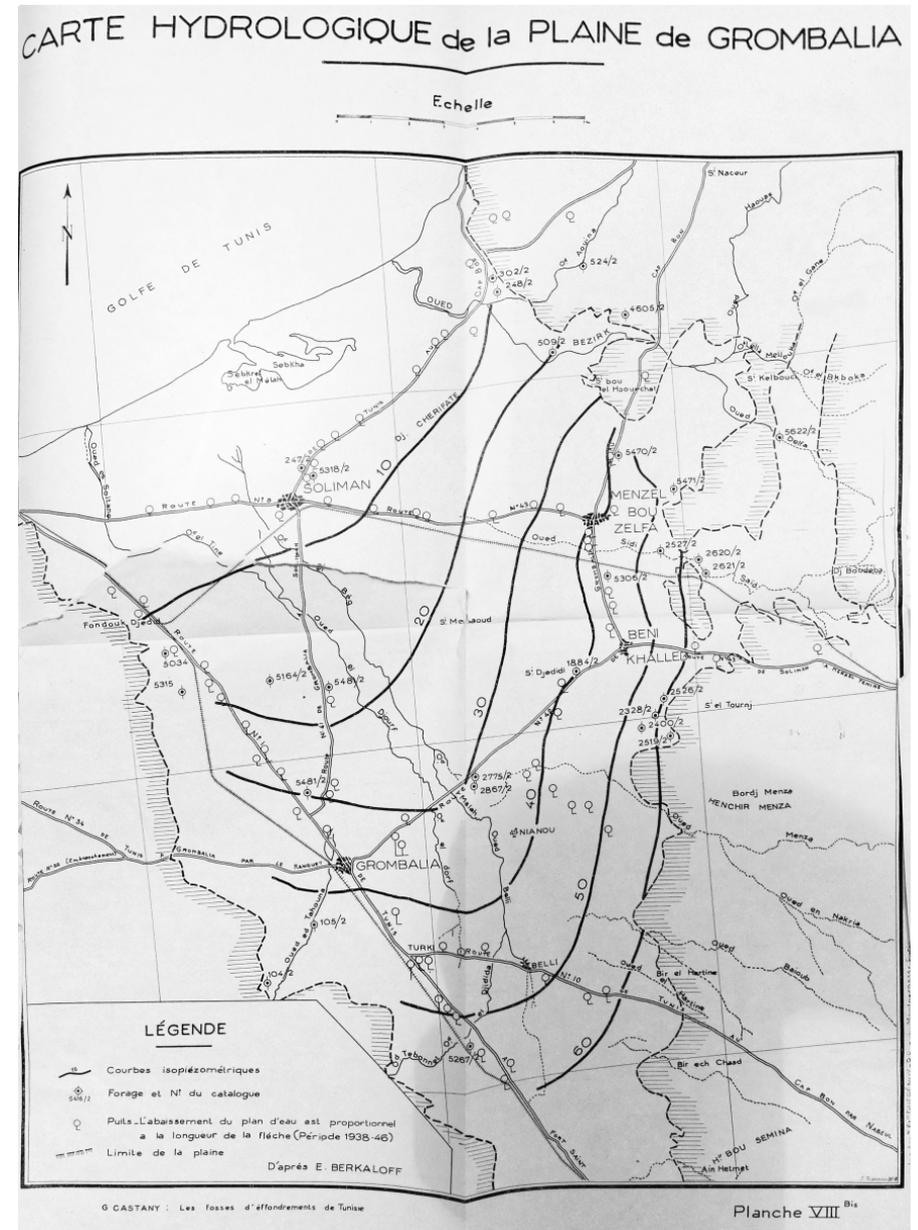
Figure 6a : Carte piézométrique obtenue par Krigeage universel.

Triki I., Hentati I., Trabelsi N., Zairi M. (2014). Evaluation des techniques d'interpolation spatiale de la piézométrie à l'aide de l'extension Geostatistical Analyst d'Arc

6 - Spatialisation : Exemples de traitement sous SIG



Bassin d'oued Serrat, Nord-Ouest Tunisien



7 – Mais que mesure-t-on?

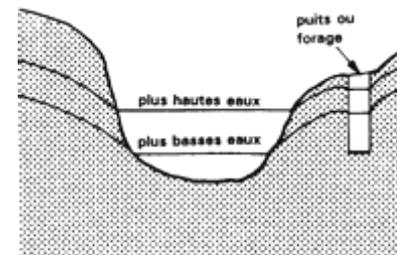
- **Niveau statique:** Niveau piézométrique non soumis à pompage ni à injection ni à recharge → non perturbé. **Niveau à l'équilibre.**
- **Niveau dynamique:** Niveau piézométrique en cours de réajustement suite à une perturbation locale

Quel est le niveau statique?

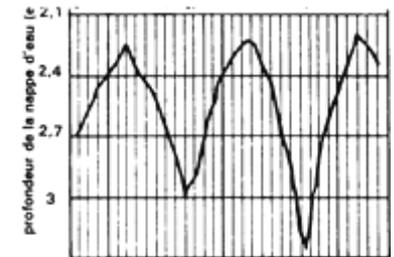
Dans quel "sens" la nappe se réajuste après perturbation(s)?

Perturbations du niveau statique : onde ou flux

- Prélèvements (pompages) : rabattement de la nappe
- Recharge : élévation de la piézométrie
- Charge de la marée, Marée terrestre



variations saisonnières de la profondeur



variations saisonnières du plan de la nappe phréatique

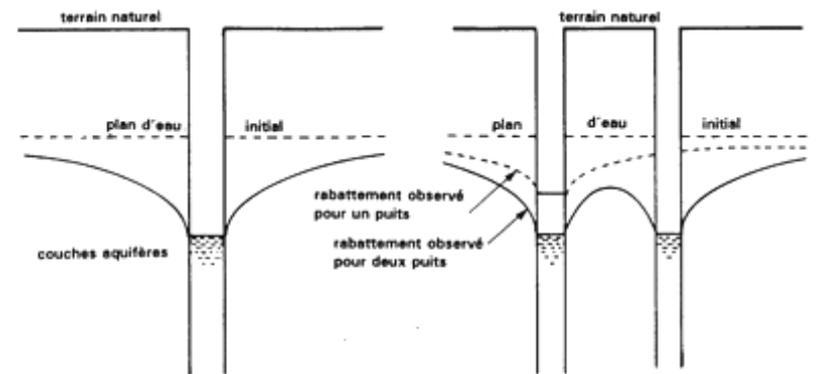
! Importance des références !

→ Toujours identifier les niveaux « min » et « max » pour éviter la surinterprétation (baisse ou hausse)

Concrètement : en fin de saison sèche en milieu semi-aride, la nuit en contexte de pompage...

! Importance du « spatial » !

- 1 « point » s'interprète avec ses points voisins
- cohérence dans les perturbations (atténuation, phasage)



cône de dépression des eaux souterraines

exemple d'interférence de deux forages très voisins l'un de l'autre

8 - Importance des métadonnées en hydrogéologie

Pourquoi?

➤ Pour « partager » les données

- Turnover des agents de terrain (installations, instruments, lectures manuelles, déchargements), des opérateurs (traitement et diffusion des données), des chercheurs (valorisation de la donnée)
 - Identification simplifiée des points de mesures et confusions
 - Multiplicité des études, travaux, communications sur un même site d'étude
- Importance des **métadonnées liées aux conventions**: choix des points de références, des unités de traitement, du format de la donnée finale etc...
 - Importance des **métadonnées spatiales**: géo-localisation des points de mesures pour la valorisation des données (spatialisation)
 - Importance des **métadonnées temporelles**: rapport d'installation des piézomètres (contraintes survenues, choix des sites...) historique-suivi des installations –capteurs, carnets terrain, photos
 - Importance des **métadonnées liées au contexte** pour être en mesure d'interpréter les données dans le temps et l'espace

Solutions pour conserver la métadonnée:

- ➔ Documents de référence (modes opératoires, protocoles, note technique...)
- ➔ Communications entre agents (écrites, orales, réunions techniques...)
- ➔ Structuration des données en BDD

Merci de votre attention !

N'hésitez pas à faire des remarques, des retours
d'expérience et poser des questions !